Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Tratamiento y disposición de lodos

32

IMTA
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

MÉXICO
GOBIERNO DE LA REPÚBLICA

SEMARNAT
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES

CONAGUA
COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Tratamiento y Disposición de Lodos

Comisión Nacional del Agua

www.conagua.gob.mx

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento
Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales:
Tratamiento y Disposición de Lodos

ISBN en tramite

D.R. © Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales
Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña
C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua
Insurgentes Sur No. 2416 Col. Copilco El Bajo
C.P. 04340, Coyoacán, México, D.F.
Tel. (55) 5174•4000

Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

Impreso y hecho en México
Distribución gratuita. Prohibida su venta.
Queda prohibido su uso para fines distintos al desarrollo social.
Se autoriza la reproducción sin alteraciones del material contenido en esta obra,
sin fines de lucro y citando la fuente

Contenido

Presentación XI
Objetivo general XIII
Introducción al diseño para el tratamiento y disposición de lodos de aguas residuales municipales XV

1. Estado actual del tratamiento y disposición de lodos residuales 1
    1.1. Estado actual del tratamiento y disposición de lodos en el mundo 1
    1.2. Situación del tratamiento y disposición de lodos en México 2
    1.3. Tecnologías emergentes para el tratamiento y disposición de lodos 5
2. Consideraciones para la Planeación de un Proyecto de Manejo de Lodos 9
    2.1. Introducción 9
        2.1.1. Normatividad para lodos residuales en México 9
        2.1.2. Normas Oficiales Mexicanas para Establecer la No-Peligrosidad del Lodo Residual 10
        2.1.3. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002 14
    2.2. Consideraciones para la planeación de un proyecto de manejo de lodos 17
    2.3. Planeación 18
    2.4. Sistema de gestión o administración ambiental (SGA) 19
        2.4.1. Los cambios 20
        2.4.2. Panorama general de la gestión 20
        2.4.3. Prácticas de la gestión de la calidad 22
        2.4.4. Relación con grupos interesados 25
        2.4.5. Entrenamiento del sistema de gestión ambiental 27
        2.4.6. Cumplimiento normativo/Requerimientos legales 28
3. Caracterización y producción de lodos 31
    3.1. Introducción 31
    3.2. Sitios de producción de lodos en una planta de tratamiento 31
        3.2.1. Pre tratamiento 31
        3.2.2. Tratamiento primario 32
        3.2.3. Tratamiento secundario 33
        3.2.4. Espumas y grasas 34
    3.3. Análisis para los lodos del agua residual 34
        3.3.1. Muestreo 34
        3.3.2. Métodos de muestreo de lodos y biosólidos 35
    3.4. Características típicas de los lodos residuales 50
        3.4.1. Tratamiento preliminar 50
        3.4.2. Tratamiento primario 51
        3.4.3. Tratamiento secundario 52

3.4.4. Estimación de la cantidad de lodos generados en el tratamiento del agua residual 55
3.4.5. Cantidad de lodos 56
3.4.6. Métodos de estimación de la cantidad de lodos 57
3.4.7. Modelos de simulación detallados 66
3.5. Ejemplo sobre la generación de lodos. Método empírico 67
3.6. Ejemplo sobre la estimación de la producción biológica de lodo 67
4. Aspectos de diseño 73
4.1. Fases para un proyecto de diseño 73
4.2. Selección de los procesos 74
4.3. Balance de masa y diagramas de flujo 76
4.4. Otras consideraciones de diseño. Conservación y recuperación de energía, análisis costo-efectivo 77
4.5. Ejemplo de balance de masa 79
5. Transporte de Lodos 89
5.1. Introducción 89
5.2. Objetivo 89
5.3. Clasificación de bombas 89
5.4. Descripción 89
5.4.1. Bombas centrífugas 89
5.4.2. Bombas de impulsor cerrado 91
5.4.3. Bombas desmenuzadoras 91
5.4.4. Bombas de desplazamiento positivo 91
5.4.5. Bombas de émbolo 91
5.4.6. Bombas de cavidad progresiva (BCP) 93
5.4.7. Bombas de diafragma operadas con aire 93
5.4.8. Bombas rotatorias 93
5.4.9. Bombas con Impulsor de aire 96
5.4.10. Bombas de tornillo de Arquímedes 97
5.5. Aplicaciones típicas 98
5.6. Flujo de lodos 98
5.6.1. Métodos de cálculo de pérdidas de carga para lodos 98
5.7. Ejemplos de selección de bombas 102
5.7.1. Ejemplo 1- Comparación de métodos de cálculo de pérdidas de carga para lodos 102
5.7.2. Ejemplo 2- Bombeo de lodos de recirculación 102
5.8. Recomendaciones 104
5.9. Transportadores de lodos 106
5.9.1. Transportadores de banda 106
5.9.2. Transportadores de Tornillo 113

6. Acondicionamiento y espesamiento de lodos 117
6.1. Introducción 117
6.2. Objetivos 117
6.3. Bases teóricas 118
6.3.1. Acondicionamiento químico de lodos, productos, dosis y selección 118
6.3.2. Otros tipos de acondicionamiento 129
6.3.3. Acondicionamiento para el espesamiento de lodos 131
6.3.4. Espesadores de lodos, tipos y características 133
6.4. Ventajas y desventajas 146
6.4.1. Espesamiento por gravedad en tanques fijos 146
6.4.2. Espesamiento por flotación 146
6.4.3. Espesamiento por gravedad en bandas 147
6.4.4. Espesamiento por centrífugas 147
6.4.5. Espesamiento por tambores rotatorios 147
6.5. Criterios de diseño 147
6.5.1. Espesadores por gravedad 147
6.5.2. Espesadores por flotación con aire disuelto 149
6.5.3. Espesadores de bandas por gravedad 151
6.5.4. Centrífugas 153
6.5.5. Espesadores rotatorios 154
6.5.6. Espesamiento por membrana 155
6.6. Ejemplos de diseño 156
6.6.1. Acondicionamiento químico 156
6.6.2. Acondicionamiento químico con polímero 157
6.6.3. Espesamiento por gravedad 158
7. Estabilización anaerobia 161
7.1. Introducción 161
7.1.1. Consideraciones económicas 161
7.1.2. Consideraciones ambientales 161
7.1.3. Consideraciones de operación 162
7.1.4. Consideraciones sociales 162
7.2. Objetivos 162
7.3. Bases teóricas 162
7.3.1. Bioquímica y microbiología del proceso 163
7.3.2. Parámetros que deben controlarse en la estabilización anaerobia 164
7.3.3. Tipos de procesos 168
7.4. Criterios de diseño 173
7.4.1. Tasa de carga de estabilización 173

7.4.2. Tiempo de residencia hidráulica y de sólidos 173
7.4.3. Tasa de carga de sólidos volátiles 174
7.4.4. Destrucción de sólidos volátiles 174
7.4.5. Pretratamiento 174
7.5. Diseño de las instalaciones del reactor 176
7.5.1. Configuración 176
7.5.2. Geometría del tanque 177
7.5.3. Alimentación 177
7.5.4. Calentamiento del lodo 179
7.5.5. Mezclado 180
7.5.6. Limpieza 181
7.5.7. Usos del Biogás 181
7.5.8. Control de olor 182
7.6. Ejemplo de diseño 182
7.7. Ejemplo de diseño 183
8. Estabilización aerobia de lodos 187
8.1. Introducción 187
8.2. Objetivo 187
8.3. Bases teóricas 187
8.3.1. Descripción del proceso 187
8.3.2. Microbiología 188
8.3.3. Estabilización aerobia semicontinua 189
8.3.4. Estabilización aerobia continua 190
8.3.5. Estabilización aerobia autotérmica. Operación de autocalentamiento 192
8.3.6. Aplicación, ventajas y desventajas de la estabilización aerobia 192
8.4. Consideraciones de diseño 193
8.4.1. Temperatura 194
8.4.2. Reducción de sólidos 194
8.4.3. Volumen del reactor y requerimientos del tiempo de retención 195
8.4.4. Concentración de sólidos en la alimentación 197
8.4.5. Requerimientos de oxigeno 197
8.4.6. Requerimientos de energía para el mezclado 198
8.4.7. Reducción del pH 198
8.4.8. Operación del proceso 199
8.4.9. Desempeño del proceso 199
8.5. Ejemplos sobre el diseño de reactores aerobios 201
8.5.1. Ejemplo 1 201
8.5.2. Ejemplo 2. Diseño de un reactor continuo y discontinuo 204

9. Estabilización de lodos por composteo 213
9.1. Introducción 213
9.2. Objetivos 214
9.3. Bases teóricas 214
9.3.1. Etapas del proceso 215
9.3.2. Sistemas de composteo 217
9.3.3. Control del proceso 218
9.3.4. Estabilidad de la composta 219
9.3.5. Equipos y materiales para el composteo 220
9.3.6. Áreas de un sistema de composteo 222
9.3.7. Calidad de la composta 222
9.3.8. Subproductos 222
9.4. Criterios de diseño 223
9.4.1. Planeación 223
9.4.2. Balance de masa y energía 225
9.4.3. Dimensionamiento de áreas 227
9.4.4. Sistema de ventilación 228
9.4.5. Automatización del proceso 228
9.4.6. Sistema de control de olor 229
9.5. Ejemplo de diseño 231
9.5.1. Ejemplo para un PTAR de 600 L/s 231
9.5.2. Áreas de un sistema de composteo 237
10. Estabilización de lodos por Vermicomposteo 247
10.1. Introducción 247
10.2. Objetivos de la tecnología 247
10.3. Historia del vermicomposteo de lodos residuales 248
10.3.1. Las lombrices de tierra a través de la historia de la humanidad 248
10.3.2. Historia del vermicomposteo de lodos residuales 249
10.4. Bases teóricas 253
10.4.1. Las lombrices como transformadoras de suelo y transformadoras de residuos orgánicos 253
10.4.2. Proceso tecnológico de vermicomposteo 265
10.4.3. Instalaciones para el vermicomposteo 268
10.4.4. Equipo requerido 269
10.4.5. Tipos de Sistemas de Vermicomposteo 270
10.4.6. Alimentación del sistema de vermicomposteo 282
10.4.7. Características y aprovechamiento de la vermicomposta 288
10.5. Criterios de diseño 289

10.6. Estudios de caso 292
10.6.1. Vermicompostero para una planta de menos de 1 L s^{-1} 295
10.6.2. Vermicompostero para la planta de tratamiento de San Nicolás de Ibarra 295
10.6.3. Vermicompostero para la planta de tratamiento de Chapala 297
11. Estabilización alcalina 299
11.1. Introducción 299
11.2. Objetivos 299
11.3. Bases teóricas 299
11.3.1. Eficiencia del proceso 300
11.3.2. Aplicaciones 301
11.3.3. Evolución del tratamiento 302
11.3.4. Modificaciones al proceso 303
11.3.5. Ventajas y desventajas 308
11.4. Criterios de Diseño 308
11.4.1. Tiempo de contacto y pH 308
11.4.2. Dosis de cal 309
11.4.3. Equipo requerido para implementar un sistema de estabilización alcalina 313
11.5. Ejemplo de Diseño 316
11.5.1. Diseño de un sistema de encalado o de estabilización alcalina de lodo 316
11.5.2. Estudio de caso: estabilización con cal de los lodos residuales provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales 319
12. Deshidratación de lodos 327
12.1. Introducción 327
12.2. Objetivo 327
12.3. Bases teóricas 327
12.3.1. Acondicionamiento de lodos 328
12.3.2. Sistemas utilizados en la deshidratación 331
12.3.3. Secado solar de lodos 352
12.3.4. Tecnología utilizada para el secado solar de lodos y análisis de su eficiencia 358
12.3.5. Ventajas y desventajas 364
12.4. Criterios de diseño 366
12.4.1. Lechos de secado 366
12.4.2. Centrífugas 369
12.4.3. Filtros prensa de bandas 373
12.4.4. Filtros prensa de placas 377
12.4.5. Secado solar de lodos 379
12.5. Ejemplos de diseño 380
12.5.1. Ejemplo de diseño de un filtro prensa de bandas 380
12.5.2. Estudio piloto de secado solar 384

12.5.3. Ejemplo de diseño de una centrífuga de tazón sólido o de tornillo 388
12.5.4. Ejemplo de diseño de un lecho de secado 390
12.5.5. Ejemplo de diseño de un sistema de acondicionamiento y deshidratación de lodos con filtro de bandas o centrífuga 391
13. Aplicación y Disposición de Lodo en Suelo 401
13.1. Aplicación del lodo residual en suelo 401
13.1.1. Introducción 401
13.1.2. Objetivo 401
13.1.3. Bases teóricas 401
13.1.4. Criterios de diseño para la aplicación de lodos residuales en suelos agrícolas 425
13.2. Rellenos sanitarios para lodos residuales 436
13.2.1. Introducción 436
13.2.2. Objetivos 437
13.2.3. Bases teóricas 437
13.2.4. Criterios básicos para el diseño de un relleno de lodos 442
13.2.5. Operación y mantenimiento 449
13.2.6. Clausura de un relleno de lodos 450
13.2.7. Ejemplo de cálculo del área para un relleno sanitario 451
14. Tratamiento y uso del biogás 453
14.1. Introducción 453
14.2. Objetivos 453
14.3. Bases teóricas 453
14.3.1. Gas de reactores 454
14.3.2. Gas de rellenos de lodos 454
14.3.3. Utilización del biogás 455
14.4. Producción biogás 455
14.5. Uso del biogás 457
14.6. Calidad y tratamiento del biogás 459
14.7. Equipo utilizado para el aprovechamiento del biogás 463
14.8. Ejemplo sobre la estimación de la producción de biogás 465
15. Estimación de costos 471
15.1. Introducción 471
15.2. Objetivos 472
15.3. Estimación de costos para el tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal promedio de 20 L s^{-1} de agua residual cruda 473
15.3.1. Primer tren de tratamiento 473
15.3.2. Segundo tren de tratamiento 477
15.3.3. Tercer tren de tratamiento 481
15.3.4. Cuarto tren de tratamiento 484

15.4. Estimación de costos para el tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal promedio de 200 L s^{-1} de agua residual cruda 488
15.4.1. Primer tren de tratamiento 488
15.4.2. Segundo tren de tratamiento 492
15.4.3. Tercer tren de tratamiento 496
15.4.4. Cuarto tren de tratamiento 499
15.4.5. Quinto tren de tratamiento 503
15.4.6. Sexto tren de tratamiento 505
15.4.7. Comparación de los costos de los diferentes trenes de tratamiento propuestos. 509
15.5.Estimación de costos para el tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal promedio de 800 L s^{-1} de agua residual cruda 509
15.5.1. Primer tren de tratamiento 510
15.5.2. Segundo tren de tratamiento 515
15.5.3. Tercer tren de tratamiento 519
15.5.4. Cuarto tren de tratamiento 519
15.6. Costos de los equipos 526
Conclusiones del libro 527

Anexos
A. Resistencia específica del lodo residual 529

Glosario 535
Bibliografía 537
Tabla de conversiones de unidades de medida 551
Ilustraciones 561
Tablas 571

Presentación

Uno de los grandes desafíos hídricos que enfrentamos a nivel global es dotar de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento a la población, debido, por un lado, al crecimiento demográfico acelerado y por otro, a las dificultades técnicas, cada vez mayores, que conlleva hacerlo.

Contar con estos servicios en el hogar es un factor determinante en la calidad de vida y desarrollo integral de las familias. En México, la población beneficiada ha venido creciendo los últimos años; sin embargo, mientras más nos acercamos a la cobertura universal, la tarea se vuelve más compleja.

Por ello, para responder a las nuevas necesidades hídricas, la administración del Presidente de la República, Enrique Peña Nieto, está impulsando una transformación integral del sector, y como parte fundamental de esta estrategia, el fortalecimiento de los organismos operadores y prestadores de los servicios de agua potable, drenaje y saneamiento.

En este sentido, publicamos este manual: una guía técnica especializada, que contiene los más recientes avances tecnológicos en obras hidráulicas y normas de calidad, con el fin de desarrollar infraestructura más eficiente, segura y sustentable, así como formar recursos humanos más capacitados y preparados.

Estamos seguros de que será de gran apoyo para orientar el quehacer cotidiano de los técnicos, especialistas y tomadores de decisiones, proporcionándoles criterios para generar ciclos virtuosos de gestión, disminuir los costos de operación, impulsar el intercambio de volúmenes de agua de primer uso por tratada en los procesos que así lo permitan, y realizar en general, un mejor aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas del país, considerando las necesidades de nueva infraestructura y el cuidado y mantenimiento de la existente.

El Gobierno de la República tiene el firme compromiso de sentar las bases de una cultura de la gestión integral del agua. Nuestros retos son grandes, pero más grande debe ser nuestra capacidad transformadora para contribuir desde el sector hídrico a **Mover a México**.

Director General de la Comisión Nacional del Agua

Objetivo general

El *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento* (MAPAS) está dirigido a quienes diseñan, construyen, operan y administran los sistemas de agua potable, alcantarillado y saneamiento del país; busca ser una referencia sobre los criterios, procedimientos, normas, índices, parámetros y casos de éxito que la Comisión Nacional del Agua (Conagua), en su carácter de entidad normativa federal en materia de agua, considera recomendable utilizar, a efecto de homologarlos, para que el desarrollo, operación y administración de los sistemas se encaminen a elevar y mantener la eficiencia y la calidad de los servicios a la población.

Este trabajo favorece y orienta la toma de decisiones por parte de autoridades, profesionales, administradores y técnicos de los organismos operadores de agua de la República Mexicana y la labor de los centros de enseñanza.

Introducción al diseño para el tratamiento y disposición de lodos de aguas residuales municipales

Esta publicación "Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: tratamiento y disposición de lodos" es una guía para los interesados en consultar información relacionada con el tema, para seleccionar trenes de tratamiento y realizar un diseño conceptual.

El libro reúne la experiencia de los últimos años en el tratamiento y disposición de lodos residuales. Es un volumen que presenta la tecnología para el diseño de sistemas de tratamiento de lodos residuales tomando como referencia la revisión bibliográfica actualizada del tema y también se considera la experiencia de algunas plantas de tratamiento de aguas residuales del país en procesos de tratamiento y disposición de lodos, que se presentan como estudios de caso.

El libro contiene 15 capítulos, los cuales incluyen las principales tecnologías para el tratamiento, uso y disposición de lodos residuales. En forma general los capítulos se dividen en objetivos, bases teóricas, criterios de diseño y un ejemplo de diseño de cada operación o proceso considerado.

El capítulo 1, es una revisión general del estado del arte de la tecnología y sus tendencias para el tratamiento y disposición de lodos

El capítulo 2, resume las consideraciones para la planeación de un proyecto de lodos que comprende principalmente el desarrollo de tecnología apropiada y de bajo costo para convertir el lodo en un biosólido y la revisión de la legislación actual en materia de uso y aplicación de lodos.

El capítulo 3, es una guía para caracterizar y cuantificar el lodo generado en un sistema de tratamiento.

El capítulo 4, es una guía para el diseño que considera los aspectos generales, las consideraciones para la selección de procesos, el desarrollo de alternativas de tratamiento y la selección de alternativas. Balance de masa, selección de equipo.

El capítulo 5, está relacionado con el transporte de lodos. Se describen los tipos de bombas que se utilizan para el bombeo de lodos en diferentes puntos del sistema de tratamiento y los métodos para calcular las pérdidas de carga.

El capítulo 6, describe lo relacionado con el acondicionamiento y espesamiento de lodos para después proceder a la estabilización. Se describe la tecnología utilizada para este fin.

Los capítulos del 7 al 11, presentan la tecnología más importante para la estabilización de lodos. Se presenta la tecnología convencional de estabilización aerobia y anaerobia. Se incluye el composteo y vermicomposteo que son tecnologías que además de estabilizar el lodo producen un sustrato o acondicionador de suelo, y finalmente la estabilización alcalina, que produce un acondicionador alcalino para suelos.

El capítulo 12 presenta la tecnología de deshidratación que convierte al lodo en un material sólido para uso o disposición final. Se describen las diferentes tecnologías utilizadas y sus características.

El capítulo 13 es un capítulo sobre manejo de lodo que presenta las bases técnicas para la aplicación de lodo en suelo y los aspectos más importantes de un relleno de lodos.

El capítulo 14 es una introducción de la recuperación del biogás generada en la estabilización anaerobia de lodos y su utilización para la producción de energía y vapor.

El capítulo 15, presenta algunas simulaciones sobre trenes de tratamiento de lodos y estima sus costos por medio del CAPDET.

1

Estado actual del tratamiento y disposición de lodos residuales

El tratamiento y disposición de lodos de plantas de tratamiento municipales es una parte muy importante dentro del tratamiento del agua residual ya que llega a representar hasta un 50 por ciento de la infraestructura y costo utilizada para dar un tratamiento , uso o disposición final tanto al agua como a el lodo residual.

Derivado de lo anterior el tratamiento del lodo tiene su propia tecnología, legislación y manejo que continuamente se está revisando y evolucionando. En este capítulo se muestra brevemente la situación actual de tratamiento del lodo residual y sus tendencias futuras o tecnologías en desarrollo.

1.1. Estado actual del tratamiento y disposición de lodos en el mundo

Un aspecto importante que debe analizarse es la generación de lodos. La producción específica de lodos es significativamente diferente entre los países. Los países desarrollados tienen mayor producción de lodo ya que sus sistemas de tratamiento consideran la remoción de nutrientes por métodos biológicos o químicos y el tratamiento terciario del agua. La producción promedio de lodo para estos países es de 21.9 kg por población equivalente y por año (21.9 kg per cápita/año); en contraste con los países menos desarrollados que tienen una producción promedio 11.5 kg por población equivalente y por año (11.5 kg per cápita/año). La producción de lodos per cápita, se relaciona también con el número de habitantes que están conectados a un sistema de tratamiento de aguas residuales, la tecnología utilizada y el aporte de descargas industriales. (Kelessidis & Stasinakis, 2012)

La legislación de lodos para disposición al suelo se ha hecho más estricta, principalmente en países europeos donde se han reducido los límites máximos permisibles para metales pesados, microorganismos patógenos y micro-contaminantes orgánicos (EL & IEEP, 2009)

Existe una gran variedad de tecnología para el tratamiento del lodo. La estabilización anaerobia y aerobia son los métodos más populares. Se prefiere la deshidratación mecánica a los lechos de secado. El secado térmico y la incineración se aplican frecuentemente en países como Estados Unidos, Alemania, Francia, Japón y Gran Bretaña. (Greater Moncton Sewarage Commission & UN-HABITAT, 2008)

La disposición final del lodo considera principalmente los siguientes métodos:

En los países desarrollados el 54 por ciento del lodo producido se reúsa para aplicación al suelo o para la producción de composta, el 21 por ciento se incinera, 15 por ciento se deposita en relleno

sanitarios y un 10 por ciento utiliza otros métodos de disposición (Milieu Ltd., WRc et al., 2010).

Las tendencias futuras se encaminan a disminuir o desaparecer la disposición en rellenos sanitarios. Se predice un incremento del 20 por ciento en los procesos térmicos, principalmente en la incineración, debido a que los equipos de incineración han reducido costos y consideran la protección del ambiente. Sin embargo, los procesos térmicos tienen varios puntos débiles como son el tratamiento de gases y cenizas, la emisión de dioxinas y furanos, la liberación de metales pesados y el manejo de los residuos (Fytili & Zabaniotou, 2008). Se diseñan nuevos equipos para mejorar el secado del lodo y la recuperación de energía. El secado solar se considera una alternativa económica, especialmente en áreas con adecuadas condiciones climáticas (Dichtl et al., 2007).

Debido a las restricciones de la normatividad, el reúso del lodo en la agricultura o su aplicación al suelo solo podrá realizarse, si se utilizan sistemas de tratamiento avanzados con el fin de alcanzar altos niveles de remoción de patógenos, la remoción de compuestos orgánicos tóxicos y emergentes y la reducción de olor. Entre las tecnologías más adecuadas para alcanzar estos requerimientos se encuentran: El secado térmico, el composteo, la estabilización anaerobia termofílica, la estabilización aerobia autotérmica y la estabilización alcalina.

De acuerdo a las nuevas directrices sobre el uso de energías renovables, se espera una mayor recuperación y utilización del biogás por medio de la estabilización anaerobia de etapas múltiples, la co-estabilización del lodo con desechos sólidos municipales y la estabilización anaeróbica termofílica.

El reúso de lodo solo podrá realizarse bajo estricto control, con el fin proteger la salud humana y el ambiente (EL & IEEP, 2009)

1.2. Situación del tratamiento y disposición de lodos en México

En México hasta el 2009 la generación de aguas residuales municipales era de 237.5 $m^3\ s^{-1}$, de los cuales solo 209.1 $m^3\ s^{-1}$ se recolectan o cuentan con drenaje y 88.1 $m^3 \cdot s^{-1}$ reciben tratamiento(Conagua, 2012), a pesar de lo estipulado en la legislación mexicana (NOM-001-SEMARNAT-1996) y (NOM-002-SEMARNAT-1996), para el año 2006 todos los municipios con población mayor a veinte mil habitantes deberían contar con planta de tratamiento, lo que equivaldría a tratar el 90 por ciento del agua residual generada. (Conagua, 2007). Respecto al agua residual no municipal incluyendo el agua residual industrial en el año 2009 se generaba un total de 190.4 $m^3\ s^{-1}$ de los cuales solo se trataba un caudal de 36.7 metros cúbicos por segundo.

De acuerdo al inventario nacional de plantas de tratamiento de aguas residuales de la Conagua, a finales del 2012, México tenía un total de 2289 plantas de tratamiento de aguas residuales, con una capacidad 137 082.13 L s^{-1} y un caudal tratado de 97 640.22 L s^{-1} que permitieron alcanzar una cobertura de tratamiento de aguas residuales municipales del 46.5 por ciento (Conagua, 2012). De este caudal o porcentaje de tratamiento en su mayoría corresponde a los siguientes procesos de tratamiento: Lagunas, lodos activados y tratamiento primario avanzado, como se observa en la (Tabla 1.1).

Tabla 1.1 Principales procesos de tratamiento de agua residual municipal, (Conagua, 2012)

Proceso	Volumen tratado (%)
Lodos activados	46.43
Lagunas de estabilización	15.59
Lagunas aeradas	8.11
Tratamiento primario avanzado	11.14
Filtros biológicos	5.37
Dual	4.74
Otros procesos	8.63

Generación y tratamiento de lodos

Considerando la cantidad y tipo de agua residual tratada, el agua residual municipal es la principal generadora de lodo. Una gran cantidad de lodo se produce en los drenajes durante la estación de secas como resultado de la sedimentación durante el transporte del agua residual, ya que la velocidad disminuye. La producción de lodos de aguas residuales municipales se estima 640 millones ton·año^{-1} en base seca (SEMARNAT, 2008). Se espera que esta cantidad se incremente en los próximos años debido a un programa de construcción de grandes plantas de tratamiento, siendo la principal de ellas la de la ciudad de México, actualmente en una fase avanzada de construcción.

Actualmente la mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales consideran algún tipo de tratamiento de lodos.

Las plantas pequeñas ≤ 50 L s^{-1} por lo general cuentan con lechos de secado. Las plantas medianas ≥ 50 L s^{-1} en su gran mayoría cuentan con estabilización aerobia y lechos de secado. Algunas plantas con un caudal mayor de 100 L s^{-1} utilizan equipo mecánico para deshidratar el lodo y en general son los filtros bandas.

Plantas con caudales mayores a 250 L s^{-1} tienen un tren de lodos que consiste en: espesamiento por gravedad, estabilización aerobia y deshidratación en filtros de banda. Algunas plantas de este tamaño han implementado la estabilización anaerobia como proceso de estabilización de lodos. Algunas de ellas tienen instalaciones para captar el biogás y después llevarlo a quemadores.

Plantas de tratamiento con una capacidad mayor a 2 m^3 s^{-1} tienen implementado el proceso de estabilización anaerobia de los lodos. Algunos ejemplos de estas plantas son las planta de tratamiento de aguas residuales de León, Guanajuato y las plantas de tratamiento Norte y Dulces Nombres, de la ciudad de Monterrey, Nuevo León. La planta de tratamiento de aguas residuales municipales de León, Guanajuato cuenta con infraestructura para la limpieza y el uso del biogás en la generación de energía eléctrica. Esta inversión le ha permitido generar energía y disminuir en un 40 por ciento la tarifa por consumo de energía eléctrica. (comunicación directa PTAR de León, Guanajuato)

Actualmente se encuentra en etapa de construcción la PTAR de Atotonilco, la cual tendrá capacidad de tratar 23 m^3 s^{-1} mediante tratamiento biológico y 12 m^3 s^{-1} por medio de tratamiento físicoquimico. Para el tratamiento de lodos residuales la planta tendrá un proceso de estabilización anaerobia con un sistema de cogeneración con el fin de convertir el gas metano producido en biogás.

Otras ciudades que cuentan con infraestructura para el tratamiento de lodos residuales y que han implementado programas de manejo de lodos son:

- Ciudad Juárez, Chihuahua que tiene 2 plantas de tratamiento primario avanzado con una capacidad de 4 $m^3 s^{-1}$ y producen 172 800 toneladas de lodo en base seca. Este lodo se deshidrata y se trata rápidamente. Se han implementado proyectos demostrativos para el uso del lodo después de tratamiento con cal para aplicación de suelos alcalinos-sódicos. Se han obtenido buenos resultados en la producción de algodón, alfalfa, maíz y avena
- Monterrey, Nuevo León. Tiene plantas de tratamiento de lodos activados para tratar un capacidad de 8.25 $m^3 s^{-1}$. Las plantas cuentan con sistema de estabilización y deshidratación de lodos. Se han realizado estudios para el uso del lodo estabilizado (biosólido) en la agricultura y para evaluar la acumulación de metales en los cultivos. Tiene una marca registrada del acondicionador de suelo preparado a partir de lodos residuales "Nutriregio".
- Tijuana, Baja California. Cuenta con plantas de tratamiento por medio de procesos de lodos activados, tratamiento primario avanzado y zanjas de oxidación. Está programada la construcción de nueva infraestructura y utilizar el lodo producido como biosólido en los cultivos de algodón
- Sinaloa. El estado de Sinaloa cuenta con infraestructura para trata 4.79 $m^3 s^{-1}$ de agua residual El lodo producido en estas plantas se utiliza como acondicionador de suelos en cultivos de maíz
- Toluca, estado de México, cuenta en plantas de tratamiento con una capacidad de tratar 4.7 $m^3 s^{-1}$. Los lodos tienen el siguiente proceso de tratamiento: Desaguado, estabilización anaerobia y deshidratación. Posteriormente el lodo se utiliza en el suelo y como fertilizante para la producción de flores

Disposición final de lodos

La mayor parte del lodo residual generado en las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales se dispone en el suelo. Aunque México dispone con una legislación para la aplicación del lodo al suelo, NOM-004-SEMARNAT, 2002, no se lleva un control o una vigilancia estricta en su aplicación.

El diagnóstico sobre el manejo del lodo residual en México, elaborado por (Reyes, C. *et al*., 2008) para el Global atlas of excreta, Wastewater Sludge and Biosólidos Management, concluye lo siguiente:

En México el incremento en el tratamiento de aguas residuales debe también ir acompañado de un cambio en el tratamiento y manejo seguro del lodo. De acuerdo a los estudios del INE, el 64 por ciento de la superficie del suelo del país está degradada, lo cual crea una gran oportunidad para el uso de los biosólidos. Sin embargo para tener un uso planeado de este recurso es necesario realizar las siguientes acciones:

- Realizar un inventario nacional sobre producción, características, tratamiento y disposición de lodos y biosólidos
- Completar el marco jurídico para la aplicación de los biosólidos, relacionando las condiciones de aplicación con diferentes aspectos (hasta el momento solo se han establecido las características de los biosólidos)

- Determinar la tecnología para la desinfección de lodos con alto contenido de parásitos, factible desde el punto de vista técnico y económico
- Desarrollar un programa para dar a conocer las aplicaciones exitosas de los biosólidos a la agricultura
- Realizar programas de entrenamiento y capacitación en el manejo, caracterización y uso de los biosólidos

Además de las recomendaciones anteriores para el uso o aplicación de los biosólidos al suelo, se debe también considerar la implementación de la estabilización anaerobia en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales medianas y grandes con el fin de utilizar el biogás en la generación de energía eléctrica.

Todas las recomendaciones anteriores deben ir acompañadas de una concientización de las autoridades y de la población en general de la importancia del manejo integral y sustentable del agua y de los lodos residuales, de tal manera que siempre se cuente con los recursos económicos y el apoyo para una buena operación y mantenimiento.

La implementación ya sea de tecnología para el uso del lodo residual como una fuente alternativa de energía o como un sustrato orgánico para su aplicación en suelo requiere de personal debidamente capacitado que pueda responder a las necesidades técnicas y económicas para un manejo adecuado.

También es necesario desarrollar tecnología nacional, que ayude a la producción de biosólidos estabilizados considerando los altos contenidos de microorganismos patógenos y compuestos tóxicos inorgánicos y orgánicos; así como también de contar con laboratorios acreditados para la caracterización de los lodos residuales, que permitan conocer las limitaciones de los diferentes lodos o biosólidos para un uso o aplicación específica.

Se deben fijar las tasas y períodos de aplicación de lodos o biosólidos con contenido de metales pesados, así como también investigar sobre el contenido de sustancias tóxicas orgánicas y de compuestos emergentes que pueden impedir el uso de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales como acondicionadores de suelos.

Generar líneas de investigación sobre uso de nuevas tecnologías para disminuir la generación de lodos en los sistemas de tratamiento, tecnologías para el uso del lodo en la producción de otros productos como enzimas y biopolímeros. Nuevas tecnologías para la estabilización y secado de lodos. Y en forma general considerar las tendencias de ahorro de energía, el control de las emisiones de gases de efecto invernadero, el control de olor y la actualización de la legislación.

1.3. Tecnologías emergentes para el tratamiento y disposición de lodos

Nuevas tecnologías están en constante desarrollo para el tratamiento de lodos residuales. Algunas de esas tecnologías emergen por la necesidad de cambios en las prácticas actuales del manejo de lodo debido a factores económicos, sociales o por cambios en la legislación. Otras emergen en el afán de modificar o hacer más eficientes la tecnología existente, A continuación se describen brevemente algunas de esas tecnologías y su estado de desarrollo.

La Tabla 1.2. Presenta la tecnología emergente utilizada para el acondicionamiento de lodos residuales.

La tecnología para el espesamiento de lodos, se muestra en la Tabla 1.3, así como las tecnologías Innovativas o en desarrollo para incrementar la concentración de sólidos en el lodo.

Tecnología para la estabilización. Los lodos se estabilizan para reducir patógenos, eliminar olores ofensivos y para reducir o eliminar el potencial de descomposición o putrefacción que desarrolla olores y atracción de vectores. Los procesos de estabilización pueden producir diferentes calidades de lodos o biosólidos dependiendo del tipo de estabilización que proporcionen. A continuación en la Tabla 1.4 se muestran algunas tecnologías innovadoras o en desarrollo con este propósito.

Además de las tecnologías que se muestran en la Tabla 1.3 y la Tabla 1.4 existen muchos procesos térmicos para la destrucción de contaminantes del lodo o producir combustible: como la oxidación supercrítica, la oxidación térmica con plasma, la vitrificación, la gasificación, producción de combustible, entre otras tecnologías actualmente en desarrollo.

Tabla 1.2 Tecnología emergente para el acondicionamiento de lodos (Water Pollution Control Federation, 1995) EPA 2006, WEF 2012)

Tecnología	Objetivo	Descripción	Estado de desarrollo
Acondicionamiento de lodo			
Destrucción química de lodo (micro lodo)	Destruir la membrana celular de los microorganismos del lodo activado para incrementar el desempeño de la estabilización anaerobia. Incrementa la cantidad de biogás en la estabilización anaerobia	El lodo activado del sedimentador secundario entra a una unidad central donde se le adiciona NaOH y posteriormente pasa a una destrucción o lisis celular por medio de un homogeneizador a alta presión. El lodo licuado se mezcla con el lodo primario y pasa a una estabilización anaerobia para producción de biogás	Innovativa. Ya se ha implementado a nivel demostrativo Tiene un costo aproximado de 70-120 US dólares por tonelada de lodo seco
Destrucción celular ultra sónica	Aumenta la velocidad de la estabilización anaerobia, mejora la sedimentación del lodo, facilita la desnitrificación y promueve la recuperación de biogás	Antes de la estabilización del lodo se aplican ondas acústicas, para alcanzar muy altas presiones y temperaturas dentro de los biosólidos. Esto da lugar a la implosión de burbujas de gas, que produce tensiones de cizallamiento que rompen las superficies de bacterias, hongos, y otros materiales celulares. El proceso ha demostrado que aumenta la ruptura de células, reduce el tiempo de estabilización anaerobia, e incrementa la producción de biogás	Innovativa se ha implementado a escala real Costo de inversión $265 000 US dólares para tratar el 30 por ciento del lodo de una planta de 5-8 mgd (millones de galones por día)
Electrocoagulación	Incrementar la velocidad de la estabilización anaerobia de lodos para recuperar biogás y producir energía	La electrocoagulación utiliza una corriente eléctrica para disolver un ánodo de sacrificio y de ese modo introducir aluminio reactivo a los lodos residuales. Estos iones de aluminio cargados positivamente son atraídos por partículas en suspensión negativas. Las aglomeraciones resultantes de las partículas aumentan de tamaño. Al mismo tiempo, los gases formados por la hidrólisis forman burbujas muy finas que se asocian con las partículas y migran a la superficie donde se retiran por flotación	En desarrollo Costo de inversión 500 000 US dólares. Costo de operación y mantenimiento 700 US dólares por día para una planta de 500 gal d^{-1} (galones por día)

Tabla 1.2 Tecnología emergente para el acondicionamiento de lodos (Water Pollution Control Federation, 1995) EPA 2006, WEF 2012) (continuación)

Tecnología	Objetivo	Descripción	Estado de desarrollo
Acondicionamiento enzimático	Degradar la materia orgánica para incrementar el desaguado del lodo, reducir el olor y ayudar a los procesos de estabilización	Mezclas de enzimas, nutrientes especializados (es decir, ácidos húmicos, aminoácidos) y cultivos de bacterias aeróbicas y anaeróbicas se añaden a los sistemas de espesamiento y de estabilización con el fin de reducir fallas en los sistemas de tratamiento biológico y ahorrar en costos	En desarrollo. Las investigaciones muestran buenos resultados en el incremento del porcentaje de sólidos en comparación con los sistemas convencionales Costo de inversión. $32 US dólares por libra de solución enzimática. Se recomienda utilizar 1 libra por cada 1-5 toneladas de lodo

Tabla 1.3 Tecnología emergente para el espesamiento de lodos (EPA, 2006, WEF, 2012)

Tecnología	Objetivo	Descripción	Estado de desarrollo
Espesamiento con membranas	Incrementar el desempeño del espesamiento de lodos activados	Consiste en un tanque con biomasa suspendida y un sistema de membranas que proporciona una barrera para la separación sólido-líquido. Estas membranas se pueden utilizar en un medio aerobio para lograr la separación del líquido a partir de biomasa, alcanzando un espesamiento de 4 por ciento de sólidos. Ambientes anaerobios han agotado las membranas demasiado rápido en las pruebas. Los diferentes tipos de módulos de membranas que se pueden utilizar son: tubulares, de fibra hueca, enrolladadas en espiral, de placas y marcos, de cartucho	Innovativo. Se utilizan actualmente membranas para el espesamiento de lodos en varias plantas de tratamiento. Presentan la ventaja de que requieren muy poco espacio Inversión aproximada de $125 000 US dólar por un tren con dos módulos
Electro desaguado	Aumentar el desempeño de los sistemas de desaguado convencionales usando una corriente eléctrica	El principio del electro desaguado es el movimiento de un líquido polar a través de una membrana u otra estructura porosa bajo la influencia de un campo eléctrico. Cuando se aplica al lodo, un flujo de iones migra del ánodo al cátodo. Este movimiento separa las moléculas de agua de lo sólidos, removiendo el agua intersticial y el agua de flóculo e incrementa la remoción del agua libre	Innovativa Su aplicación es limitada, sin embargo presenta la ventaja de una alta reducción de microorganismos patógenos y virus
Tubo geotextil	Reducir el agua libre presente en el lodo al pasarlo a través de una bolsa o tubo de polipropileno de alta densidad	Por medio de bombeo se llena el tubo geotextil de cualquier longitud. El tubo retiene los sólidos y el agua permea a través de la pared del tubo. Se requiere acondicionamiento con polímero para mejorar el proceso de filtración. El procedimiento se repite hasta llenar el tubo. Posteriormente sigue una etapa de secado por la evaporación del agua	Innovativo Es adecuada para aplicaciones en pequeñas plantas de tratamiento por su bajo costos de inversión y operación. Tiene como desventaja que requiere espacio y es susceptible a las condiciones climatológicas

Tabla 1.4 Tecnología emergente para la estabilización de lodos (EPA, 2006, WEF, 2012)

Tecnología	Objetivo	Descripción	Estado de desarrollo
Estabilización anaerobia con tratamiento con ozono	Oxidar o romper la materia orgánica contenida en el lodo para incrementar el desempeño de la estabilización anaerobia	Biosólidos estabilizados anaeróbicamente se envían desde el reactor a un tanque de reacción donde están expuestos a bajos niveles de ozono En un experimento, Vranitzky y Lahnsteiner (2002) mostró que sólo 0,06 g de ozono por gramo de sólidos disueltos era necesario para destruir la actividad biológica de los biosólidos estabilizados. Después de la ozonación, los biosólidos se envían al tanque de espesamiento y luego regresan al reactor donde se mezclan con los biosólidos tanto ozonizados y no ozonizados	En desarrollo o investigación. Estudios a nivel laboratorio muestran que la velocidad de remoción de la materia orgánica se incrementó a 65 por ciento, comparada con el proceso convencional que es de 45 por ciento. También se incrementa la producción de biogás en un 30-40 por ciento Actualmente no hay una aplicación práctica de esta tecnología
Adición de ferrato FeO4-2 Conocido como Fe(VI)	Estabilización y desinfección de lodos para incrementar su uso potencial	Ferrato es un potente oxidante químico con una mayor reactividad de los oxidantes tradicionales. En forma líquida, el ferrato puede inyectarse a la corriente de proceso sin la adición de equipos especiales de mezcla. Un estudio por el USDA mostró que la dosificación de ferrato a los lodos deshidratados inactivó 99,9 por ciento de E. coli. El pH resultante de los sólidos desinfectados es generalmente entre 12 y 13 dependiendo dosis. Los Ferratos también han demostrado tener afinidad para reaccionar con sulfuros, mercaptanos y alquilaminas compuestos que comúnmente producen olores en los lodos residuales	En desarrollo Se han realizado estudios a nivel piloto
Estabilización y remoción de metales simultáneamente	Incrementar la reducción de patógenos y la solubilidad de los metales durante el proceso de estabilización	El proceso consiste en la estabilización de los lodos y la lixiviación de metales del proceso en forma simultánea por la adición de azufre elemental a los biosólidos durante la estabilización aerobia. Después de varios días, el pH de la mezcla es muy bajo (alrededor de 2), que es propicio para aumentar la solubilidad de los metales tóxicos dentro de los biosólidos	En desarrollo Se han hecho estudios a nivel piloto El proceso tiene un potencial de óxido reducción y una acidez adecuada para la lixiviación de metales tóxicos. Los niveles de nutrientes (N, P y K) se conservan en el lodo. El proceso también fue efectivo para la reducción de olor y de bacterias indicadoras

2

Consideraciones para la Planeación de un Proyecto de Manejo de Lodos

2.1. Introducción

Los países de Latinoamérica y el Caribe concentran sus esfuerzos en el tratamiento del agua residual, mientras que minimizan el manejo del lodo residual (Spinosa, 2007). La prioridad en la inversión se concentra en el abastecimiento del agua potable, en el drenaje y en el tratamiento del agua. La poca atención en el manejo del lodo se refleja en la insuficiente legislación sobre el tema, la cual simplemente se adopta de los países más industrializados y avanzados, sin adecuarla a la realidad local. Las principales necesidades en los países de Latinoamérica se deben centrar en los siguientes temas:

- Desarrollo de tecnología apropiada de bajo costo para convertir el lodo de un residuo a un biosólido que pueda usarse de manera segura en la agricultura
- Desarrollo de una legislación adaptada a los países latinos con un consecuente desarrollo en las capacidades institucionales que garanticen su aplicación

La planeación sobre el manejo de lodos se debe basar en el conocimiento del destino final del lodo ya sea para su aprovechamiento o disposición final. De acuerdo con la EPA (2012) el Plan de Manejo de Biosólidos (PMB) debe ser iterativo, se puede modificar de acuerdo a la experiencia y al conocimiento ganado durante la operación de los sistemas seleccionados.

Este capítulo muestra las etapas básicas para desarrollar un PMB. La EPA (2012) menciona que el tratamiento y el manejo de lodos corresponden al 50 por ciento de los costos anuales de inversión y operación de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Este capítulo presenta los principales temas de importancia en el manejo del lodo residual y se han identificado que son:

1. Normatividad
2. Consideraciones para la planeación de un proyecto
3. Financiamiento del proyecto
4. Planeación
5. Manejo ambiental del sistema (MAS)

2.1.1. Normatividad para lodos residuales en México

Introducción

La normatividad mexicana en materia de lodos residuales se ha ido transformando e incrementado debido a la creciente necesidad de dar solución a la problemática de su manejo.

El gobierno federal ha emprendido diversas acciones, una de las más interesantes es la relativa a la formulación de una normatividad, enfocada a rescatar a los lodos residuales municipales de la clasificación de residuos peligrosos y dar-

les una nueva definición, la de biosólidos, con la que se pretende dar aprovechamiento a estos residuos. Se incluye también en la normatividad los lodos provenientes de desazolve de alcantarillado y los lodos de potabilizadoras, aunque es controversial la consideración de estos desechos como biosólidos. La normatividad de los residuos peligrosos también se ha transformado para dar un nuevo ordenamiento a estos desechos y simplificar el trámite para los generadores de estos residuos.

En la Tabla 2.1 se enlistan las principales normas vigentes y relativas al manejo de lodos residuales.

2.1.2. Normas Oficiales Mexicanas para Establecer la No-Peligrosidad del Lodo Residual

Los lodos residuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales no se encuentran considerados dentro de esta norma, sin embargo la autoridad exige a los generadores de este residuo que den constancia de no peligrosidad. Para establecer la no peligrosidad del lodo residual se aplican las siguientes normas:

NOM-052-SEMARNAT-2005.- Esta norma comprende el procedimiento que establece las características, identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Ayudan a definir si un residuo es peligroso o no. En esta norma se establecen las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Esta norma oficial mexicana es de observancia obligatoria en la definición y clasificación de residuos peligrosos. Fue publicada en el Diario Oficial de la Federación el 23 de junio de 2006. Abroga la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente.

En la Tabla 2.2 se presentan los códigos de peligrosidad que maneja la norma NOM-052-SEMARNAT-2005.

Tabla 2.1 Leyes y normas relativas al manejo de lodos residuales

Denominación	Observaciones	Fecha de expedición o renovación
NOM-052-SEMARNAT-2005	Establece el procedimiento para identificar que un residuo es peligroso el cual incluye los listados de los residuos peligrosos y las características que hacen que se consideren como tales	Publicada en el Diario Oficial de la Federación el viernes 23 de junio de 2006
NOM-053-SEMARNAT-1993	Establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente	
Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002	La NOM-004-SEMARNAT-2002 trata sobre lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Incluye no sólo los lodos residuales generados en las plantas de tratamiento, sino también los provenientes de los desazolves de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal y de las plantas potabilizadoras	Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de agosto de 2003

NOM-053-SEMARNAT-1993, Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente, publicada el 22/X/1993, la cual ha cambiado de nomenclatura en dos ocasiones, la primera, por el Acuerdo Secretarial publicado el 29/XI/1994, siendo modificada a NOM-053-ECOL-1993 y, la segunda, por el Acuerdo emitido en el mismo órgano de difusión el 23/IV/2003, quedando con el nombre que aparece al inicio de esta cita.

Tabla 2.2 Códigos de peligrosidad de los residuos (CPR). (Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT, 2005)

Características	Código
Corrosividad	C
Reactividad	R
Explosividad	E
Toxicidad	T
Ambiental	Te
Aguda	Th
Crónica	Tt
Inflamabilidad	I
Biológico-Infeccioso	B
Cuando se trate de una mezcla de residuos peligrosos de los listados 3 y 4 se identificarán con la característica del residuo de mayor volumen, agregándole al CPR la letra "M".	

Procedimiento para la clasificación de los lodos residuales

Los encargados del manejo de los lodos tienen que demostrar que éstos no presentan ninguna de estas características mediante las pruebas CRIT que es el acrónimo de clasificación de las características a identificar en los residuos peligrosos y que significa: corrosivo, reactivo, inflamable y tóxico ambiental.

Para determinar las pruebas CRIT se llevan a cabo las siguientes pruebas:

Corrosividad. Es Corrosivo cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- Es un líquido acuoso y presenta un pH menor o igual a 2.0 o mayor o igual a 12.5 de conformidad con el procedimiento que se establece en la NMX correspondiente
- Es un sólido que cuando se mezcla con agua destilada presenta un pH menor o igual a 2.0 o mayor o igual a 12.5 según el procedimiento que se establece en la NMX correspondiente
- Es un líquido no acuoso capaz de corroer el acero al carbón, tipo SAE 1020, a una velocidad de 6.35 milímetros o más por año a una temperatura de 328 K (55 °C), según el procedimiento que se establece en la NMX correspondiente

Reactividad. Es Reactivo cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- Es un líquido o sólido que después de ponerse en contacto con el aire se inflama en un tiempo menor a cinco minutos sin que exista una fuente externa de ignición, según el procedimiento que se establece en la NMX correspondiente
- Cuando se pone en contacto con agua reacciona espontáneamente y genera gases inflamables en una cantidad mayor de 1 litro por kilogramo del residuo por hora, según el procedimiento que se establece en la NMX correspondiente
- Es un residuo que en contacto con el aire y sin una fuente de energía suplementaria genera calor, según el proce-

dimiento que se establece en la NMX correspondiente

- Posee en su constitución cianuros o sulfuros liberables, que cuando se expone a condiciones ácidas genera gases en cantidades mayores a 250 mg de ácido cianhídrico por kg de residuo o 500 mg de ácido sulfhídrico por kg de residuo, según el procedimiento que se establece en la NMX correspondiente

Toxicidad Ambiental. Es Tóxico Ambiental cuando: el extracto PECT, obtenido mediante el procedimiento establecido en la NOM-053-SEMARNAT-1993, contiene cualquiera de los constituyentes tóxicos listados en la Tabla 2 de esta Norma en una concentración mayor a los límites ahí señalados, la cual deberá obtenerse según los procedimientos que se establecen en las Normas Mexicanas correspondientes.

En la Tabla 2.3 se presentan los límites máximos permisibles de diferentes constituyentes tóxicos en el extracto PECT.

Inflamabilidad. Es Inflamable cuando una muestra representativa presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- Es un líquido o una mezcla de líquidos que contienen sólidos en solución o suspensión que tiene un punto de inflamación inferior a 60.5 °C, medido en copa cerrada, de conformidad con el procedimiento que se establece en la NMX correspondiente, quedando excluidas las soluciones acuosas que contengan un porcentaje de alcohol, en volumen, menor a 24 por ciento
- No es líquido y es capaz de provocar fuego por fricción, absorción de humedad o cambios químicos espontáneos a 25 °C, según el procedimiento que se establece en la NMX correspondiente
- Es un gas que, a 20°C y una presión de 101,3 kPa, arde cuando se encuentra en una mezcla del 13 por ciento o menos por volumen de aire, o tiene un rango de inflamabilidad con aire de cuando menos 12 por ciento sin importar el límite inferior de inflamabilidad
- Es un gas oxidante que puede causar o contribuir más que el aire, a la combustión de otro material

Se tendrá que llevar a cabo la manifestación basada en el conocimiento científico o la evidencia empírica sobre los materiales y procesos empleados en la generación del residuo en los siguientes casos:

- Si el generador sabe que su residuo tiene alguna de las características de peligrosidad establecidas en esta norma
- Si el generador conoce que el residuo contiene un constituyente tóxico que lo hace peligroso
- Si el generador declara, bajo protesta de decir verdad, que su residuo no es peligroso

Procedimiento para la evaluación de la conformidad

Las muestras para determinaciones analíticas deben ser tomadas directamente a la salida del proceso o del área de almacenamiento en su caso, de conformidad con los procedimientos establecidos en la NMX correspondiente y deberán ser representativas del volumen generado, considerando las variaciones en el proceso y, además, se debe establecer la cadena de custodia para las mismas.

Tabla 2.3 Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT, (Norma oficial mexicana, NOM-053-SEMARNAT, 2003)

No. CAS[1]	Contaminante	LMP[2] (mg L^{-1})
Constituyentes inorgánicos (metales)		
7440-38-2	Arsénico	5.0
7440-39-3	Bario	100.0
7440-43-9	Cadmio	1.0
7440-47-3	Cromo	5.0
7439-97-6	Mercurio	0.2
7440-22-4	Plata	5.0
7439-92-1	Plomo	5.0
7782-49-2	Selenio	1.0
Constituyentes orgánicos semivolátiles		
94-75-7	Acido 2,4-Diclorofenoxiacético (2,4-D)	10.0
93-72-1	Acido 2,4,5-Triclorofenoxipropiónico (Silvex)	1.0
57-74-9	Clordano	0.03
95-48-7	o-Cresol	200.0
108-39-4	m-Cresol	200.0
106-44-5	p-Cresol	200.0
1319-77-3	Cresol	200.0
121-14-2	2,4-Dinitrotolueno	0.13
72-20-8	Endrin	0.02
76-44-8	Heptacloro (y su Epóxido)	0.008
67-72-1	Hexacloroetano	3.0
58-89-9	Lindano	0.4
74-43-5	Metoxicloro	10.0
98-95-3	Nitrobenceno	2.0
87-86-5	Pentaclorofenol	100.0
8001-35-2	Toxafeno	0.5
95-95-4	2,4,5-Triclorofenol	400.0
88-06-2	2,4,6-Triclorofenol	2.0
Constituyentes orgánicos volátiles		
71-43-2	Benceno	0.5
108-90-7	Clorobenceno	100.0
67-66-3	Cloroformo	6.0
75-01-4	Cloruro de Vinilo	0.2
106-46-7	1,4-Diclorobenceno	7.5
107-06-2	1,2-Dicloroetano	0.5
75-35-4	1,1-Dicloroetileno	0.7
118-74-1	Hexaclorobenceno	0.13
87-68-3	Hexaclorobutadieno	0.5
78-93-3	Metil etil cetona	200.0
110-86-1	Piridina	5.0
127-18-4	Tetracloroetileno	0.7
56-23-5	Tetracloruro de Carbono	0.5
79-01-6	Tricloroetileno	0.5

[1] No. CAS: Número del Chemical Abstracts Service (Servicio de Resúmenes Químicos)

LMP: Límite Máximo Permisible

La Secretaría reconocerá las determinaciones analíticas de la prueba CRIT que hayan sido muestreadas y analizadas por un laboratorio acreditado y aprobado conforme a las disposiciones legales aplicables.

Vigilancia de esta Norma

La vigilancia del cumplimiento de la presente NOM corresponde a la Semarnat, por conducto de la Profepa, cuyo personal realizará los trabajos de inspección y vigilancia que sean necesarios. Las violaciones a la misma se sancionarán en los términos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, sus Reglamentos y demás ordenamientos jurídicos aplicables.

2.1.3. Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002

La NOM-004-SEMARNAT-2002 trata sobre lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Incluye no sólo los lodos residuales generados en las plantas de tratamiento, sino también los provenientes de los desazolves de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal y de las plantas potabilizadoras.

El proyecto de norma se publicó en el diario oficial el 18 de febrero del 2002. La respuesta a comentarios se hizo también a través del diario oficial el 18 de junio de 2003, su publicación oficial como norma se hizo en el diario oficial el viernes 15 de agosto de 2003.

El primer paso en la aplicación de esta norma es que los generadores de lodos deben de deshidratar el lodo.

En segundo lugar deben controlar la atracción de vectores, lo cual se logra con una reducción de sólidos volátiles por lo menos de 38 por ciento, demostrando su efectividad para lo cual se menciona en el Anexo I de dicha norma varias alternativas de tratamiento para alcanzar este propósito se menciona en la (Tabla 2.4).

Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clase: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos. Para llevar a cabo esta clasificación se establecen en esta norma los límites máximos permisibles de metales pesados, patógenos y parásitos como se muestra en la Tabla 2.5 y en la Tabla 2.6.

Como se específica en la Tabla 2.7, el aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase.

Se aclara que la aplicación de los biosólidos en terrenos con fines agrícolas y mejoramiento de suelos se sujetará a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal y conforme a la normatividad vigente en la materia. Para la disposición final de los lodos y biosólidos, éstos deben cumplir con la especificación del trámite de No Peligrosidad y con los límites máximos permisibles para el contenido de los indicadores de contaminación, patógenos y parásitos especificados en la (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002), para clase C.

En la norma se establece que los sitios para la disposición final de lodos y biosólidos, serán los que autorice la autoridad competente, conforme a la normatividad vigente en la materia. Esta norma permite que los lodos y biosólidos que cumplan con lo establecido en la presente Norma Oficial

Tabla 2.4 Opciones tecnológicas para la reducción de atracción de vectores, (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002)

Opción	Especificaciones
1	Reducción en el contenido de sólidos volátiles La atracción de vectores se reduce si la masa de sólidos volátiles en los biosólidos es reducida por lo menos un 38 por ciento durante su tratamiento. Este porcentaje es equivalente al conseguido mediante estabilización aeróbica o anaeróbica más alguna reducción adicional que ocurra después de que los biosólidos salen de las instalaciones de estabilización, tales como el procesamiento en lechos de secado o lagunas o mediante el composteo.
2	Estabilización adicional de los biosólidos estabilizados anaeróbicamente Frecuentemente, los biosólidos han sido reciclados a través del tratamiento biológico de las aguas residuales o han transitado durante largos periodos por los sistemas de alcantarillado. Durante este tiempo, sufren una degradación biológica sustancial. Si los biosólidos son subsecuentemente tratados mediante estabilización anaerobia, su atracción de vectores será reducida adecuadamente. Debido a que ingresan al reactor, parcialmente estabilizados, la reducción de sólidos volátiles después del tratamiento frecuentemente es menor de 38 por ciento. Bajo estas circunstancias, pudiera no ser factible la reducción de 38 por ciento requerida en la opción 1. La opción 2 permite al operador demostrar la reducción de atracción de vectores probando una porción de los biosólidos previamente estabilizados en una unidad a escala de laboratorio. Se demuestra la reducción, si después de la estabilización anaerobia de los biosólidos por 40 días adicionales, a una temperatura entre 30 °C y 37 °C, la reducción de los sólidos volátiles en los biosólidos es menor de 17 por ciento.
3	Estabilización adicional de los biosólidos estabilizados aeróbicamente Esta opción es apropiada para los biosólidos estabilizados aeróbicamente que no pueden cumplir con la opción 1, incluye a aquellos producidos por plantas de aeración extendida donde el tiempo mínimo de residencia para los biosólidos en el tren de aguas generalmente excede de 20 días. En estos casos, los biosólidos ya estarán sustancialmente degradados antes de la estabilización aerobia. Bajo esta opción, se considera que los biosólidos estabilizados aeróbicamente con 2 por ciento de sólidos o menos, han logrado la reducción de atracción de vectores si después de 30 días de estabilización aerobia en una prueba de laboratorio a 20°C, la reducción de los sólidos volátiles es menor de 15 por ciento. Esta prueba solamente es aplicable a los biosólidos líquidos estabilizados aeróbicamente.
4	Procesos aerobios a más de 40 °C Esta opción se aplica primordialmente a los biosólidos composteados que también contienen agentes abultadores orgánicos parcialmente descompuestos. Los biosólidos deben ser tratados aeróbicamente por 14 días o más, tiempo durante el cual la temperatura deberá rebasar siempre los 40 °C y el promedio será mayor de 45 °C. Esta opción pudiera aplicarse a otros procesos aeróbicos, tales como la estabilización aeróbica, sin embargo, las opciones 3 y 4 parecen más fáciles de cumplir para los otros procesos aeróbicos.
5	Adición de materia alcalina Se considera que los biosólidos reducen adecuadamente su atracción de vectores si se adiciona suficiente materia alcalina para lograr lo siguiente: Elevar el pH por lo menos hasta 12, medido a 25 °C, y sin añadir más materia alcalina, mantenerlo por 2 horas, y Mantener un pH de al menos 11,5 sin la adición de más materia alcalina durante otras 22 horas. Estas condiciones tienen la intención de asegurar que los biosólidos puedan ser almacenados por lo menos durante varios días en las instalaciones de tratamiento, transportados y posteriormente aplicados sin que el pH descienda a niveles en los que ocurre la putrefacción y se atraen vectores.
6	Reducción en la humedad de biosólidos que no contienen sólidos sin estabilizar Se considera que la atracción de vectores se reduce si los biosólidos no contienen sólidos sin estabilizar generados durante el tratamiento primario y su contenido de sólidos es por lo menos del 75 por ciento antes de ser mezclados con otros materiales. Por consiguiente, la reducción debe lograrse removiendo agua y no mediante la adición de materiales inertes. Es importante que los biosólidos no contengan sólidos sin estabilizar porque los desechos de comida parcialmente degradados que seguramente existen en tales biosólidos atraerían a pájaros, algunos mamíferos y posiblemente a insectos aun si el contenido de sólidos es mayor del 75 por ciento.
7	Reducción en la humedad de biosólidos que contienen sólidos no estabilizados Se considera que la habilidad para atraer vectores de cualesquier biosólido se reduce adecuadamente si su contenido de sólidos se incrementa al 90 por ciento o más sin importar si se trata de biosólidos provenientes del tratamiento primario. El incremento debe conseguirse removiendo agua y no mediante la dilución con sólidos inertes. El secado hasta este punto limita severamente la actividad biológica y destroza o descompone los compuestos volátiles que atraen vectores. La manera en que se manejan los biosólidos secos, incluyendo su almacenamiento antes de la aplicación puede propiciar la atracción de vectores. Si éstos se exponen a una humedad alta, la superficie exterior tendrá un alto contenido de humedad y posiblemente atraerá vectores. Esto debe ser prevenido adecuadamente.

Tabla 2.4 Opciones tecnológicas para la reducción de atracción de vectores, (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002) (continuación)

Opción	Especificaciones
8	Tasa específica de absorción de oxígeno (TEAO) para biosólidos estabilizados aeróbicamente Frecuentemente, los biosólidos estabilizados aeróbicamente son circulados a través de los procesos biológicos de tratamiento aeróbico de las aguas residuales hasta por 30 días. En estos casos, los biosólidos que entran al reactor aeróbico ya están parcialmente estabilizados, lo cual dificulta cumplir con la Opción 1. La Tasa Específica de Absorción de Oxígeno (TEAO) es la masa de oxígeno consumida por unidad de tiempo y por unidad de masa en peso seco de los sólidos totales de los biosólidos. La reducción en la atracción de vectores puede demostrarse si la TEAO de los biosólidos que son aplicados, determinada a 20°C, es igual o menor de 1,5 mg de $O_2 \cdot h^{-1} \cdot g^{-1}$ de sólidos totales (peso seco). Esta prueba se basa en el hecho de que, si los biosólidos consumen muy poco oxígeno, su valor como fuente alimenticia para los microorganismos es muy baja como para atraerlos. Se pueden utilizar otras temperaturas para la prueba si los resultados se corrigen sobre la base de 20°C. Esta prueba solamente es aplicable a los biosólidos aeróbicos.
9	Opción 9: Incorporación de biosólidos al suelo Los biosólidos deben ser incorporados al suelo dentro de las 6 horas posteriores a su aplicación sobre el terreno. La incorporación se consigue arando o mediante algún otro método que mezcle los biosólidos con el suelo. Si los biosólidos son Clase A con respecto a patógenos, el tiempo entre la aplicación y el procesado no debe exceder de 8 horas.

Tabla 2.5 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos, (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002)

Contaminante (determinados en forma total)	Excelentes mg kg^{-1} en base seca	Buenos mg kg^{-1} en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Tabla 2.6 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos, (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002)

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
nbsp;	Coliformes fecales NMP·g^{-1} en base seca	Salmonella spp. NMP g^{-1} en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1(*)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35
*Huevos de helmintos viables NMP número más probable			

Tabla 2.7 Aprovechamiento de biosólidos, (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002)

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para clase B y C
Excelente o bueno	B	Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación Los establecidos para clase C
Excelente o bueno	C	Usos forestales Mejoramientos de suelos Usos agrícolas

Mexicana, pueden ser almacenados hasta por un periodo de dos años, sólo exige que el predio en el que se almacenen debe ser habilitado para que no existan infiltraciones al subsuelo y contar con un sistema de recolección de lixiviados.

La norma también proporciona una estrategia para el muestreo y análisis de los biosólidos. Para el muestreo y determinación de los valores y concentraciones de los parámetros establecidos en esta Norma, se deben aplicar los métodos de prueba establecidos en los anexos II, III, IV, V y VI de la norma. La frecuencia de muestreo y análisis para los lodos y biosólidos se realizará en función del volumen de lodos generados como se establece en la (Tabla 2.8).

Tabla 2.8 Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos, (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002)

Volumen generado por año (ton/Año) en base seca	Frecuencia de muestreo y análisis	Parámetros a determinar
Hasta 1 500	Una vez al año	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor de 1 500 hasta 15 000	Una vez por semestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos
Mayor de 15 000	Una vez por trimestre	Metales pesados, indicador bacteriológico de contaminación, patógenos y parásitos

La vigilancia del cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, así como a los gobiernos estatales, municipales y del Distrito Federal, en el ámbito de sus respectivas competencias. Las violaciones a la misma se sancionarán en los términos de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, sus reglamentos y demás ordenamientos jurídicos aplicables. La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por conducto de la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, así como los gobiernos estatales, municipales y del Distrito Federal, en el ámbito de su respectiva competencia, llevarán a cabo de manera periódica o aleatoria los muestreos y análisis de los lodos y biosólidos, con objeto de verificar el cumplimiento de los límites máximos permisibles de contaminantes establecidos en la presente Norma Oficial Mexicana.

2.2. Consideraciones para la planeación de un proyecto de manejo de lodos

En este punto se presentan los factores que se deben considerar en la planeación de un proyecto de manejo de lodos. Los generadores de lodos deben lograr acuerdos con las autoridades regulatorias, así como con las autoridades regionales para

llevar a cabo el proyecto de manejo de lodos. De tal forma con estos acuerdos se puede elaborar un plan, solicitar financiamiento y llevar a cabo el manejo de biosólidos.

2.3. Planeación

La planeación es el punto inicial para la elaboración de un programa para el procesamiento y manejo de los lodos o Biosólidos (PMB), en una planta de tratamiento. El plan se debe basar e iniciar con el uso final que se quiere dar a los lodos. Se debe tomar en cuenta la tecnología de tratamiento requerida, los riesgos de los procedimientos de manejo, las fases del proyecto, así como otras consideraciones. Los autores del PMB tienen que generar una guía que marque las decisiones que se deben tomar, las cuales deben ser claras y justificables, se deben marcar los riesgos, rutas alternativas, responsabilidades, la sustentabilidad del proyecto, incorporar la mejora continua, tener el apoyo de la parte interesada y el soporte público (WEF, *et al.*, 2012)

Debido a que el PMB inicia con la decisión del uso que se quiere dar a los lodos, se deberá establecer la alternativa o alternativas tecnológicas requeridas y los problemas que se requieren resolver para su selección e implementación. El PMB deberá establecer un plan de trabajo para el desarrollo del programa. Se deberá proveer la información básica, para el programa de mejoramiento de capital (PMC), que incluye una lista de prioridades del proyecto, un programa de implementación, una estimación de costos de inversión, un plan de financiamiento, y la documentación de la función desempeñada por la junta directiva para lograr la aprobación del plan final por parte del organismo gubernamental. Las actividades se deberán basar en decisiones sistemáticas y bien consideradas y en la implementación de un proceso de definición de responsabilidades técnicas y legales. Se pueden presentar problemas en el desarrollo de un proyecto cuando no hay responsabilidades definidas, no hay una buena administración del gerente, diferentes perspectivas, conflicto de intereses, información limitada e inadecuada asesoría o alternativas tecnológicas. Estos asuntos organizacionales, técnicos y legales, deben ser resueltos antes de iniciar un proyecto y no después de que el programa se ha iniciado (WEF, *et a.*, 2012).

Existen diferentes métodos para desarrollar el PMB. Un ejemplo es el método que se lleva a cabo en seis etapas. Este proceso puede proveer beneficios organizacionales para el desarrollo de un proyecto. Incluye el establecimiento de un líder y responsabilidades, identificación de conflictos en los objetivos, provisión de herramientas para la resolución de conflictos, creación de un registro de decisiones tomadas, procesos auditables y mejoras, y la implementación de consejos. El proceso de seis etapas también se enfoca en la identificación de la corrección de problemas, la identificación de alternativas importantes, dirección de riesgos (incertidumbre), y proveer de una plataforma para colectar información esencial del proyecto. La participación significativa de los interesados debe ocurrir en cada paso y básicamente realizar una junta que permita una aportación importante de las partes interesadas

Las seis etapas y preguntas que deben ser resueltas en cada etapa se presentan a continuación:

1. Desarrollo de liderazgo y responsabilidades ¿Por qué el proyecto debe ser hecho? ¿Quiénes son los que toman las decisiones? ¿Quiénes son los grupos externos involucrados? ¿Qué papel juega cada

persona, individualmente? Respuestas a estas cuestiones son la fundamentación de un proceso de decisiones exitoso, proveen la visión y los límites para el proyecto, aseguran la credibilidad de los recursos con las limitaciones, e incluyen a las personas correctas en un equipo efectivo de trabajo

2. Enmarcar el problema. ¿Cuáles son los temas centrales que deben ser resueltos? ¿Qué decisiones, incertidumbres, y valores deben ser aclarados? ¿Cómo se relacionan uno a otro? ¿Qué políticas, estrategias y tácticas se conocen? ¿Qué clase de información general se requiere para evaluar las alternativas?
3. Construcción del modelo de evaluación. ¿Cómo se podrán hacer evaluaciones cuando los objetivos establecidos se han alcanzado? ¿Qué significa la jerarquía de los objetivos para alcanzar exitosamente la alternativa planteada? ¿Cómo se pueden asociar los resultados con cada alternativa medida? ¿Cuáles son los principales controladores para obtener los resultados?
4. Recolección de los datos más significativos y confiables. ¿Qué datos son necesarios? ¿En qué formatos? ¿Cómo se pueden incorporar las opiniones de los expertos? ¿Se encuentran los datos técnicos disponibles para una revisión de un comité revisor? ¿Los datos son creíbles para los tomadores de decisiones y los grupos externos involucrados?
5. Evaluación de alternativas y toma de decisiones. ¿Cuál es la mejor estrategia a seguir? ¿Cuáles son las mejores estrategias alternativas? ¿Cuáles son los riesgos existentes? ¿Cuáles son los factores que podrían cambiar una estrategia alternativa? ¿Existen suficientes datos para seleccionar una estrategia y cuáles datos adicionales se requieren? ¿Fue el problema correctamente solucionado?
6. Desarrollo del plan de implementación. ¿Cómo se informa el proceso de decisión? ¿Qué tareas se requieren y que barreras existen para obtener el éxito? ¿Cómo se pueden superar las barreras? ¿Quién es responsable de cada tarea? ¿Qué contingencias deben considerarse? ¿Cuál de los más importantes grupos externos involucrados deben ser incluidos en el proceso de la toma de decisiones

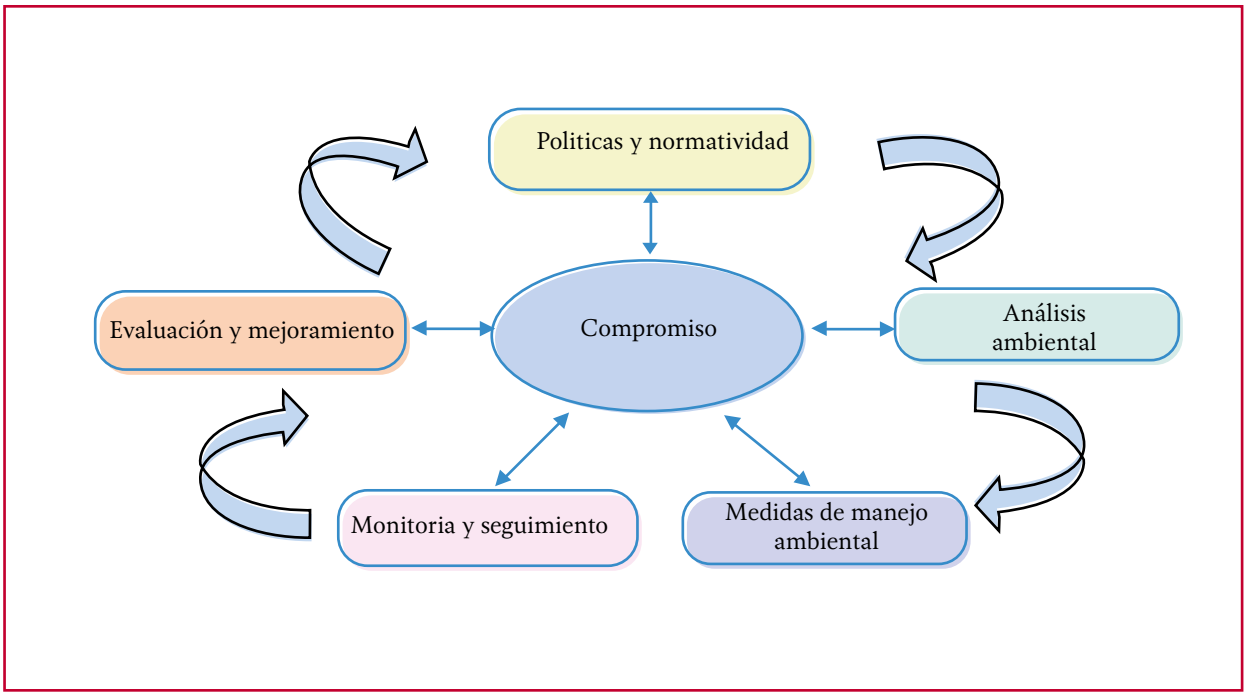
El proceso requiere de transparencia y de la inclusión de los grupos externos. El éxito de un PMB incluirá la priorización de proyectos, las bases para el PMC, la preparación del financiamiento y la planeación de las instalaciones (WEF, *et al*., 2012).

2.4. Sistema de gestión o administración ambiental (SGA)

La gestión ambiental de los sistemas de tratamiento en una planta debe ser un aspecto esencial e importante. Se requiere que todo el personal se encuentre perfectamente consciente del papel que desempeñan dentro de la organización y dentro de las metas que la organización tiene que alcanzar.

En la Ilustración 2.1, se presenta la estructura típica de un sistema de gestión ambiental. En este esquema se presentan cinco componentes, cuyo eje principal es el compromiso del organismo operador o empresa responsable del proyecto ambiental. Sin un compromiso claro y formal con respecto a su responsabilidad ambiental no

Ilustración 2.1 Sistema de gestión ambiental



podrá tener éxito ninguna gestión que se pretenda hacer, para mejorar las condiciones ambientales en las cuales se desarrolla la actividad.

La política organizacional deberá comprender tres compromisos claves: continuo mejoramiento, prevención de la contaminación, y el cumplimento de las leyes y normas vigentes (WEF, *et al*., 2012).

2.4.1. Los cambios

Los cambios se refieren a asegurar el apoyo necesario para llevar a cabo la gestión ambiental, documentar los procedimientos estándar de la operación, y asegurar el cumplimento de la normatividad. La implementación de estas tres acciones garantiza un buen desarrollo del SGA.

2.4.2. Panorama general de la gestión

Las autoridades administrativas necesitan revisar y estar de acuerdo con el proceso requerido para desarrollar el SGA, esto incluye el tiempo dedicado y de manera significativa la inclusión de los grupos externos involucrados, así como el compromiso con una filosofía de mejoramiento continuo que es necesaria para un efectivo SGA. Las autoridades también requieren de entender la relación costo beneficio de un SGA (WEF, *et al*., 2012).

2.4.2.1. Política de gestión y soporte

Es esencial que las autoridades de las plantas acepten, conozcan y sobre todo se comprometan

en el desarrollo del sistema de gestión ambiental y no sólo ellos, sino que el mismo conocimiento y compromiso debe difundirse a través de toda la organización. Se debe apoyar al grupo de trabajo y ayudarlos en su esfuerzo explicándoles el SGA, cómo pueden integrarse y fortalecer las prácticas existentes para asegurar su cumplimento, aumentar su eficiencia, promover la aceptación pública y así desarrollar una mayor eficiencia en los procesos de tratamiento. La promulgación de la política de manejo por parte de las autoridades es una declaración de su compromiso con el medio ambiente, ayuda a proveer una visión medio ambiental unificada que compromete a toda la organización. La política ambiental de la organización sirve como marco para establecer los objetivos y metas, planes y acciones. La política del SGA debe comprender tres compromisos claves: continuo mejoramiento, prevención de la contaminación, y el cumplimento de las leyes y normas vigentes (WEF, et al., 2012).

2.4.2.2. Metas y objetivos para un continuo programa de mejoramiento

Los propósitos de una organización se materializan en acciones concretas con ayuda de los objetivos y metas. Estas metas ambientales y objetivos deberán estar dentro de un plan estratégico. Esto facilita la integración de la gestión ambiental con el manejo de otros procesos de la organización (WEF, *et al*., 2012).

Las metas se pueden aplicar a toda la institución o a unidades individuales, departamentos o actividades específicas, dependiendo de dónde será necesario aplicar estas acciones. Para el establecimiento de los objetivos de una política medio ambiental, es necesario considerar el aspecto ambiental, social y financiero. Se deberán considerar los aspectos ambientales más importantes, legislación aplicable y otros puntos de vista, opciones tecnológicas, financieras, operativas y otras consideraciones organizacionales. Los objetivos y metas de una organización deberán reflejar lo que hace la organización, que tan bien lo hace y que es lo que quiere alcanzar (WEF, *et al*., 2012).

2.4.2.3. Tareas y responsabilidades

Para tener un buen y efectivo sistema de gestión ambiental, las tareas y responsabilidades se deben definir y comunicar claramente. El compromiso del personal es necesario para implementar y mantener exitosamente el SGA. Las autoridades tienen una tarea muy importante otorgando los recursos necesarios para implementar el SGA. En algunas organizaciones el líder principal puede ser una sola persona y en otras organizaciones hay un grupo de líderes encargados de la administración del sistema. Dentro de las tareas de este líder o grupo de líderes se encuentra asegurar lo siguiente: 1) Establecer un sistema de gestión ambiental e implementarlo; 2) Preparar reportes para su mejoramiento; y 3) Las autoridades deben de involucrarse con los operadores para modificar en caso necesario el SGA (WEF, *et al*., 2012).

2.4.2.4. Evaluación del sistema de gestión ambiental

La evaluación del SGA es importante, ya que ofrece la oportunidad de mantener un programa eficiente y con un costo efectivo. Si alguno de los procedimientos o actividades

no añaden valor, entonces estos pueden ser eliminados. El evaluador debe buscar contestar las siguientes preguntas: ¿El sistema está trabajando? ¿Es apropiado, adecuado y efectivo de acuerdo a nuestras necesidades? (WEF, *et al*., 2012).

2.4.3. Prácticas de la gestión de la calidad

En esta sección se discutirán los tipos de prácticas de gestión de la calidad que son aceptadas desde el punto de vista del público y de las normatividad, si todas estas se realizan correctamente.

2.4.3.1. Lineamientos sobre buenas prácticas de la gestión

Una buena práctica de la gestión o manejo puede ser definida como una práctica, o combinación de prácticas, que es o son las más efectivas y viables para el control de los procesos o para lograr los objetivos sobre el control de fuentes de contaminación en el aire, suelo o calidad del agua. Las guías sobre las buenas prácticas dependen de las necesidades requeridas en el manejo del sistema.

2.4.3.2. Manual de lineamiento sobre prácticas seguras

Son los procedimientos para cada una de las buenas prácticas y procedimientos estándar de operación para asegurar que los empleados permanezcan seguros y que la salud pública y el medio ambiente se protejan.

2.4.3.3. Aspectos ambientales y puntos críticos de control

La identificación de los puntos críticos de control a lo largo de la cadena de valor de los biosólidos de una organización es fundamental para operar con eficacia un SGA. Mediante la identificación de los puntos críticos de control y los efectos ambientales asociados, una organización puede planear e implementar etapas proactivas y controles operacionales. Estos esfuerzos aseguran que los productos o materiales vertidos al medioambiente cumplen con las características de acuerdo con el uso o disposición final al que están destinados.

2.4.3.4. Controles operacionales

Los controles operacionales son necesarios para asegurar que los compromisos establecidos en las políticas ambientales se satisfacen y que ciertas operaciones y actividades sean controladas. Cuando las operaciones o actividades son complejas y/o tienen un impacto ambiental significativo, los controles pueden incluir procedimientos documentados. Los procedimientos pueden ayudar a la organización a manejar los aspectos ambientales más significativos, asegurar el cumplimiento de la normatividad y alcanzar los objetivos ambientales. Los procedimientos juegan un papel prominente en el entrenamiento de los empleados.

Los procedimientos pueden estar documentados para prevenir desviaciones de la política ambiental (incluyendo los compromisos de conformidad con la prevención de la contaminación) o

de los objetivos y metas. Determinando cuáles operaciones deberán ser documentadas y como estas deberán ser controladas, lo cual es un paso critico en el diseño eficaz de SGA.

Para determinar qué operaciones y actividades necesitan ser controladas, uno debe observar más allá de la producción o de los servicios rutinarios. Actividades como el mantenimiento del equipo, manejo, contratos y servicios provistos por los proveedores o vendedores pueden afectar significativamente el desempeño ambiental de la organización.

2.4.3.5. Monitoreo y mediciones

Un SGA deberá tener procesos de monitoreo y medición efectivos. El monitoreo y la medición permite a la organización:

- Evaluar el desempeño ambiental
- Analizar las causas de los problemas
- Asegurar que se cumplan con los requerimientos legales
- Identificar las áreas que requieren acciones correctivas
- Mejorar el desempeño e incrementar la eficiencia

El monitoreo ayuda tener una mejor administración de la organización. La prevención de la contaminación y otras oportunidades estratégicas se identifican más rápidamente cuando existen datos actuales y confiables disponibles. Los datos históricos son de ayuda en la realización e identificación de tareas y evaluaciones forenses.

La organización deberá desarrollar procedimientos para:

- El monitoreo de las características claves de operación y actividades que pueden tener efectos significativos ambientales o consecuencias en su cumplimiento
- El rastreo del desempeño (incluyendo el progreso para alcanzar los objetivos y las metas)
- Calibración y mantenimiento del equipo de monitoreo
- Evaluación del cumplimento con las leyes y normas vigentes a través de auditorías internas periódicas

2.4.3.6. Documentación y registros históricos

Para asegurar que toda la organización trabaja con los documentos adecuados del SGA, la organización deberá tener un procedimiento que describa cómo se deben contralar tales documentos. La implementación de este procedimiento deberá asegurar que:

- Los documentos SGA deben ser fácilmente localizables (El personal sabe dónde poder consultar o localizar dichos documentos)
- Deben revisarse periódicamente (El personal checa si aún son válidos)
- Las versiones actualizadas se encuentran disponibles cuando se requieren (El personal se asegura que las personas adecuadas tienen acceso a ellas)
- Los documentos obsoletos se eliminan (El personal no debe usar documentos obsoletos por error)

Los procedimientos deberán designar responsabilidades y a asignar al personal para preparar documentos, hacer cambios en estos y mantenerlos actualizados. Si la organización sigue un sistema

ISO 9001, se deberá adoptar para los propósitos del SGA.

2.4.3.7. Auditorias, no conformidades, acciones preventivas y correctivas

Una vez que la organización ha establecido un SGA es necesaria una auditoria, para identificar y resolver las deficiencias. En organizaciones pequeñas esto es particularmente invaluable. Para que un programa de auditorías internas del SGA sea efectivo, una organización deberá:

- Desarrollar procedimientos y protocolos de auditoria
- Determinar una apropiada frecuencia de auditorías
- Seleccionar y capacitar a los auditores
- Mantener los registros de las auditorias

Los resultados de las auditorias deben estar ligados a las acciones preventivas y correctivas. Las auditorías internas deberán ser desarrolladas por el personal de la organización o por una organización externa calificada. Debido a que las auditorías consumen el tiempo laboral del personal, deberán ser críticas y efectivas.

2.4.3.8. Preparación y respuesta para emergencias

A pesar de los esfuerzos de una organización, existe la posibilidad de accidentes y otras situaciones de emergencia. La preparación y la respuesta efectiva pueden reducir daños, prevenir y minimizar efectos ambientales, proteger a los empleados y vecinos, reducir la pérdida de bienes y minimizar el paro de actividades.

Ilustración 2.2 Entrevistas con productores de Aguascalientes sobre el impacto del uso de lodos residuales en sus cultivos

Ilustración 2.3 Comité de tratamiento de aguas residuales en Cabo San Lucas en coordinación con Organismo Operador

Un programa efectivo de preparación y respuesta de emergencia deberá incluir las siguientes provisiones:

- Evaluación de accidentes potenciales y emergencias
- Prevención de incidentes y sus efectos ambientales asociados
- Planes y procedimientos para responder a los incidentes
- Evaluación periódica de los planes y procedimientos de emergencia
- Mitigación de los efectos de estos accidentes

Es importante revisar las mejoras a la respuesta a una emergencia después de que el incidente ha ocurrido. Esta revisión puede usarse para determinar si se requiere de mayor entrenamiento o si los planes/procedimientos se deben de revisar.

Para evaluar los Planes de Emergencia y Autoprotección y asegurar la eficacia y operatividad de los planes de actuación en ellos incluidos, se deberán realizar simulacros de emergencia, con la periodicidad mínima que fije el propio Plan y, en todo caso, al menos una vez al año evaluando sus resultados. Los simulacros implicarán la activación total o parcial de las acciones contenidas en el plan de actuaciones en caso de emergencia.

Prevención emergencias en plantas de tratamiento en México

2.4.4. Relación con grupos interesados

2.4.4.1. Participación pública

El SGA se basa en la planeación a través del uso o disposición del biosólido. Se debe buscar la aceptación del público a través de un programa, enfocado a resaltar los usos benéficos del lodo. La información al público debe estar considera-

da en los objetivos y metas del SGA, debido a que la aceptación pública repercutirá en el posterior éxito del plan. Se debe implementar una aproximación proactiva consistente en el interés del público, el antecedente histórico de la participación pública, el método de manejo de los biosólidos y otras circunstancias locales. En las ilustraciones se observan dos ejemplos de la participación ciudadana en los programas ambientales, uno es la entrevista directa con productores en Aguascalientes, con personal del organismo operador y técnicos del IMTA, para conocer la experiencia de los agricultores en el uso del lodo residual en cultivos de maíz y el otro ejemplo es la participación de los vecinos de la Colonia Los Cangrejos, en Los Cabos, Baja California Sur, en un Comité de tratamiento de aguas residuales en coordinación con el Organismo Operador Municipal del Sistema de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento, el objetivo de la conformación de este comité es que vigile el desarrollo de la obra, dentro de los programas de contraloría social, de acuerdo a lo planeado. El propósito final es que con esta planta se resuelva el derrame de aguas negras, logrando que las familias no padezcan de enfermedades intestinales, ni se vean afectadas en ningún aspecto por esta situación.

2.4.4.2. Comunicación y trabajo social (interno, externo, normatividad)

Pueden existir grupos interesados en el desempeño y esfuerzos de la gestión de las organizaciones ambientales fuera de la organización oficial. El manejo ambiental efectivo requiere de comunicaciones internas y externas. La comunicación efectiva dentro y fuera de la organización ayuda a:

- Motivar la fuerza de trabajo
- Ganar la aceptación de los planes y esfuerzos
- Explicar la política ambiental y el SGA y cómo ellos están relacionados con la visión total de la organización
- Asegurar la comprensión de las tareas y de las expectativas
- Mostrar el manejo del compromiso
- Monitorear y evaluar el mejoramiento
- Identificar las mejoras potenciales del sistema

La Comunicación externa es el "conjunto de mensajes emitidos por cualquier organización hacia sus diferentes públicos externos, encaminados a mantener o mejorar sus relaciones con ellos, a proyectar una imagen favorable o promover sus productos o servicios". En este inciso entra en juego las relaciones públicas que son "el conjunto de actividades y programas de comunicación efectuados por cualquier organización para crear y mantener buenas relaciones con sus diferentes públicos externos, y para proyectar ante ellos una imagen favorable."

La comunicación de dos vías con grupos externos es también importante para un efectivo SGA. Teniendo etapas para obtener el punto de vista de los grupos externos involucrados, que pueden incluir vecinos, clientes, grupos de la comunidad, autoridades regulativas, los cuales ayudarán a la organización a un mejor entendimiento de cómo la perciben otros.

Estos grupos externos involucrados pueden brindar temas importantes a la organización que se pueden adicionar al SGA. La organización también debería considerar las formas de obtener consejos específicos de estos grupos ex-

ternos, cuando desarrollan elementos críticos del SGA y de los objetivos y metas. Involucrar a estos grupos, sin embargo, no quiere decir que la organización deberá ceder el control de SGA o de las decisiones sobre él, pero lo fortalecerá y lo hará más responsable con los intereses de la comunidad, proveen de beneficios a largo plazo a la organización.

La organización deberá incluir procedimientos para comunicación interna (entre niveles y funciones) y solicitando, recibiendo, documentando, y respondiendo a comunicaciones externas. La Comunicación interna (Ilustración 2.4) es el conjunto de actividades efectuadas por cualquier organización para la creación y mantenimiento de las buenas relaciones con y entre sus miembros, a través de distintos medios de comunicación que los mantengan informados, integrados y motivados para contribuir con su trabajo al logro de los objetivos organizacionales. La comunicación efectiva interna requiere de un mecanismo de información que vaya de arriba hacia abajo y hacia los lados, y cruce las líneas funcionales. Debido a que los empleados están en las líneas frontales, ellos deben de ser una fuente de información de resultados, problemas e ideas.

2.4.5. Entrenamiento del sistema de gestión ambiental

Existen dos razones fundamentales para el entrenamiento de los empleados en el sistema de gestión ambiental:

- Cada empleado tiene efectos potenciales en el ambiente
- Cualquier empleado puede tener buenas ideas acerca del mejoramiento del manejo del ambiente

Cada persona y función en la organización puede jugar un papel en el sistema de gestión ambiental. Por esta razón, el programa de entrenamiento deberá ser amplio. Cada empleado y jefe deberá conocer la política ambiental, los efectos ambientales significativos de sus actividades laborales, las tareas y responsabilidades claves del SGA, procedimientos que aplican en su trabajo, y la importancia de estar de acuerdo con los requerimientos del SGA. Los empleados también deberán entender las consecuencias potenciales de no seguir los requerimientos del SGA (tales como descensos, despidos, multas u otras penalidades).

Ilustración 2.4 Comunicación interna para lograr un trabajo unificado

Todo el personal debe recibir un entrenamiento apropiado. Tal entrenamiento deberá ser diseñado para diferentes necesidades de varios niveles o funciones en la organización. El entrenamiento es un elemento para establecer competencias, sin embargo, se basa en la combinación de educación, entrenamiento y experiencia. Para ciertos trabajos, tareas particulares que pueden tener un efecto significativo en el ambiente, la organización deberá establecer criterios para medir el mejoramiento en la competencia de tales tareas. En la Ilustración 2.5, vemos de manera esquemática el lento avance de la capacitación y certificación del personal demandado por las empresas en México. De acuerdo a esta ilustración en México hace falta capital humano capacitado con las competencias que demandan las empresas. De acuerdo a las cifras que se presentan en la ilustración de los 16 000 000 millones de empleados que hay en México, sólo 3 por ciento está certificado. De 1994 a 2006 se emitieron 150 000 certificados y de 2007 a 2013 se emitieron 335 000 certificados, haciendo un total de 485 000, trabajadores certificados.

2.4.6. Cumplimiento normativo/ Requerimientos legales

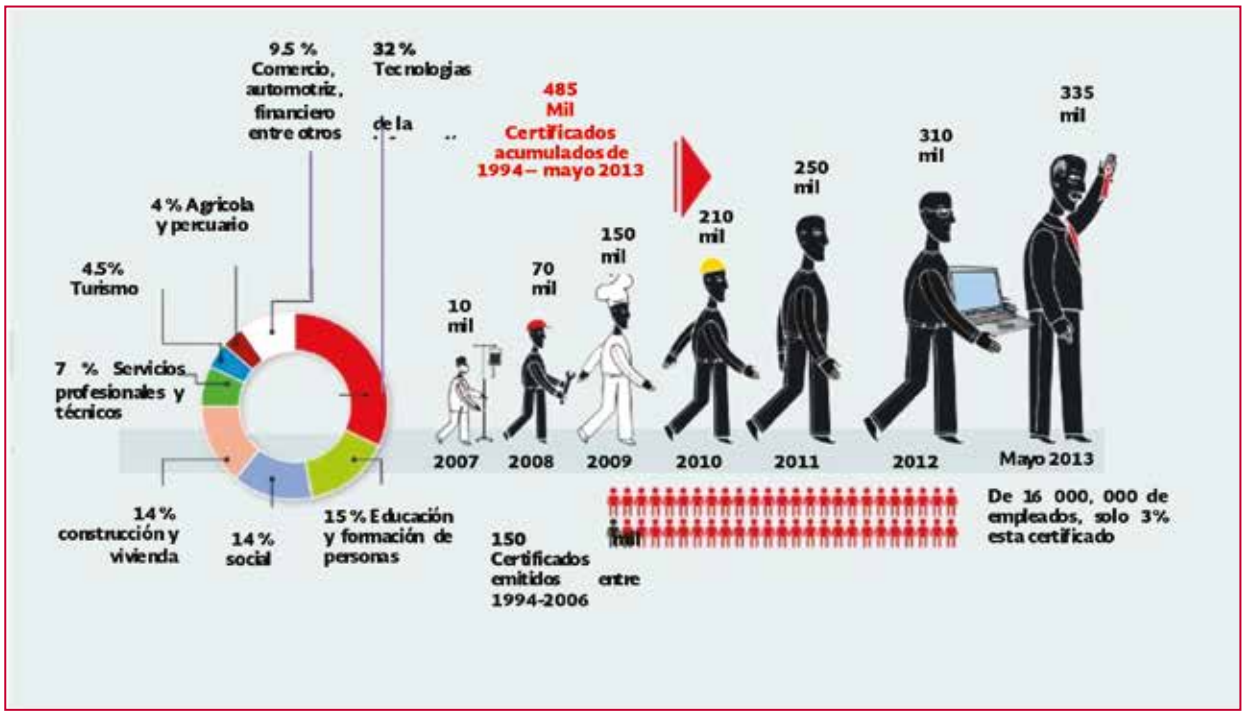
Para cumplir con las leyes y normas que aplican a la organización, los empleados deberán primero conocer cuáles son y cómo afecta lo que ellos hacen. El cumplimiento de los requerimientos legales es una parte crítica de las bases de una política ambiental. El costo potencial del no cumplimiento (daño posible al ambiente, pérdida de ingresos y daño a la imagen pública) pueden ser altos. De esta forma un SGA debe incluir procesos para:

- Identificar y comunicar los aspectos legales aplicables y otros requerimientos
- Asegurar que estos requerimientos se encuentren asignados dentro de los esfuerzos del manejo de la organización
- Responder rápidamente a evidencias de no cumplimento, investigar las causas de los no cumplimientos y asegurar que las prácticas y procedimientos apropiados se apliquen para prevenir futuros no cumplimientos
- Revisar la existencia de nuevos requerimientos legales, ya que esto deberá requerir de una modificación de los objetivos ambientales o el cambio de otros elementos del SGA. Anticipando nuevos requerimientos y haciendo cambios a las operaciones se puede evitar algunas futuros cumplimientos obligatorios y sus costos

La organización debe considerar los siguientes factores de ajuste en los objetivos y metas:

- Prevención de no cumplimientos
- Prevención de la contaminación de la fuente
- Minimización de la transferencia de contaminantes
- Mejoramiento del ambiente

Ilustración 2.5 Lento avance del personal demandado por las empresas en México



ECIRCULAC
2
3
1

3

Caracterización y producción de lodos

3.1. Introducción

El propósito final del tratamiento de agua residual en una planta de tratamiento, es la remoción de partículas contaminantes solubles y no solubles del agua residual y la separación y el tratamiento de la biomasa generada en un proceso biológico. El origen, la cantidad y características de los lodos generados en una planta de tratamiento de agua residual (PTAR) afectan significativamente la línea de lodos y la del agua. En la línea de lodos, el criterio de diseño establecido por los sólidos afecta el tamaño de las unidades del proceso, el periodo de operación, y los costos totales. El criterio establecido en el tratamiento de los lodos afecta los procesos de la línea de agua, debido a que las eficiencias del tratamiento en la línea del agua están influenciadas por la remoción de sólidos.

Este capítulo cubre los sitios de producción, cantidades, y características de los lodos producidos en el sistema de tratamiento del agua residual. Se discuten también los métodos por medio de los cuales se pueden estimar las cantidades y características de los lodos. El término "lodos" se refiere a los sólidos generados en los procesos de tratamiento del agua residual, y "biosólido" al obtenido después de un proceso de estabilización por medios biológicos o químicos.

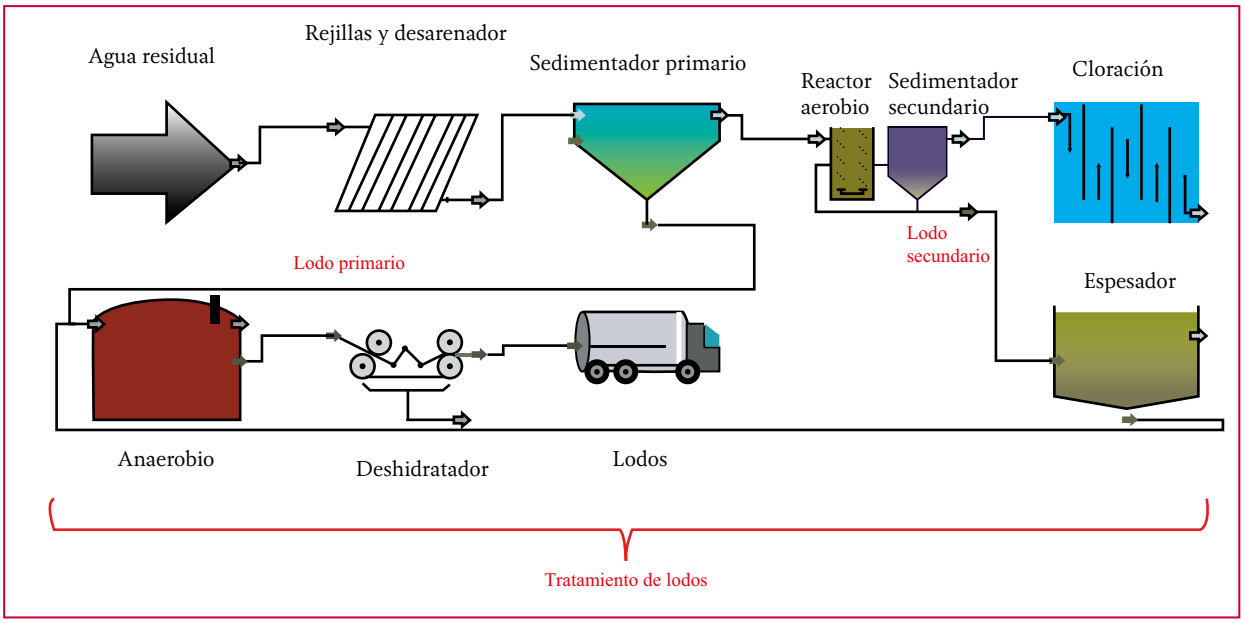
3.2. Sitios de producción de lodos en una planta de tratamiento

Los sitios de generación de lodos residuales para una planta de tratamiento de lodos activados (Ilustración 3.1), se presentan en la Tabla 3.1. Las principales fuentes de generación de lodos son el sedimentador primario y el sedimentador secundario. Estos lodos por separado o en forma conjunta se llevan al sistema de tratamiento, que generalmente inicia con el espesamiento del lodo secundario.

3.2.1. Pre tratamiento

El cribado consiste en la remoción de materiales tales como: sólidos gruesos, sólidos finos de origen orgánico e inorgánico por medio de las cribas que se encuentran localizadas en la entrada de la PTAR. Las cribas finas tienen aberturas de 0.25 a 6 mm y las cribas para materiales gruesos son de aberturas de 38 mm. Las cribas con aperturas mayores de 38 mm se componen de recipientes de basura. En algunas plantas de tratamiento, las cribas finas pueden reemplazar la sedimentación primaria.

Ilustración 3.1 Sitios de generación de lodos residuales dentro del tren de tratamiento de agua residual



El material cribado puede contener patógenos, es una material con mal olor y puede atraer vectores como roedores e insectos. Se puede manejar con otros lodos o se puede llevar a un relleno sanitario o incinerarse. Sin embargo, el material cribado se maneja de forma separada de otros lodos, especialmente si se hace un uso benéfico de los lodos. El material cribado se transporta mediante bandas, en canales, en carros, en contenedores y carros tapados. El método de transporte frecuentemente se relaciona al tamaño relativo y al método de remoción y tratamiento de las cribadoras. En muchas plantas de tratamiento nuevas, las cribadoras cuentan con un sistema de lavado y compactación, se usan para remover materiales orgánicos y por lo tanto reducen el mal olor del cribado y los costos de disposición. El lavado de las cribadoras retorna una gran cantidad de sólidos orgánicos a la corriente del agua.

Las gravas y arenas de consistencia densa, sólidos gruesos que están presentes en el agua residual cruda se remueven antes de la sedimentación primaria o de otros procesos. Las arenas pueden removerse del lodo primario después de la separación del agua residual. Las arenas incluyen el material abrasivo de alta densidad pero también incluyen cenizas, granos, granos de café, semillas, y otros materiales. La remoción de arenas se acompaña de materiales orgánicos, grasas antes de continuar con el tratamiento. El uso de lavadores reduce el contenido de materia orgánica y también el contenido de las arenas finas que se encuentran presentes.

Las arenas transportan como una mezcla de agua y residuos, mediante bombas de tornillo o transportadores; o en contenedores tales como carros o camiones. Una vez separadas del agua residual, se disponen en un relleno sanitario.

3.2.2. Tratamiento primario

Muchas PTAR usan sedimentación primaria para remover los sólidos sedimentables. Las espumas y la materia flotante también se remueven en la sedimentación primaria, (Ilustración

Ilustración 3.2 Lodo generado en el sedimentador primario de una PTAR.

3.2). Las descargas industriales en las PTAR afectan las propiedades del lodo primario. En muchas plantas, la recirculación que llega al afluente también afecta la generación de lodos primarios. Estas corrientes de reciclo incluyen el lavado de retorno de filtros, del espesamiento y la deshidratación de lodos, el sobrenadante de los reactores y los residuos de los lodos. El uso de químicos (ejemplo, cal, aluminio, cloruro de hierro) en los sedimentadores primarios para la remoción de fósforo o la coagulación aumentará la cantidad de lodo primario y la fracción inerte de los sólidos.

Los lodos primarios se transportan por medio de diferentes clases de bombas: sumergibles, bombas de pistón, bombas centrífugas, bombas de diafragma, bombas de cavidad progresiva, bombas de lóbulos rotatorios y bombas trituradoras, (ver capítulo 5). Los lodos primarios tratan por separado o en conjunto con los lodos secundarios, en el tratamiento que incluye espesamiento y estabilización.

3.2.3. Tratamiento secundario

Los lodos secundarios se generan durante los diferentes tratamientos biológicos tales como: lodos activados, filtros percoladores y filtros bilógicos rotatorios. Los lodos biológicos secundarios son típicamente de color café, tienen apariencia de flóculos, y cuando son frescos tienen un olor relativamente inofensivo a tierra, (Ilustración 3.3). Cuando se almacenan se vuelven de café oscuro y pueden desarrollar un olor ofensivo, que se convierte en séptico. Los lodos secundarios consisten de sólidos suspendidos inertes presentes en el agua residual, biomasa viva y productos en descomposición. La contribución relativa de estos componentes de los lodos está influenciada por las propiedades del agua residual cruda, los tipos de procesos empleados en el pre tratamiento (ejemplo, cribadoras finas, sedimentación primaria), y las condiciones de operación del tratamiento secundario (ejemplo, tiempo de residencia de los lodos, temperatura, tipo de tratamiento biológico). La adición de

Ilustración 3.3 Lodo generado en el sedimentador secundario. Cortesia PTAR de Valle de Bravo

químicos a la entrada del tratamiento biológico para la remoción de fósforo incrementará la cantidad de lodos generados y la fracción inerte de los lodos secundarios.

Los lodos secundarios se transforman por bombas sumergibles, bombas centrífugas, bombas de diafragma, bombas de cavidad progresiva, bombas de lóbulos rotatorios y bombas de lóbulos, ver capítulo 5. Se tratan por espesamiento, estabilización y deshidratación antes de llevarlos al relleno sanitario, aplicación a suelo o uso benéfico. El tratamiento depende del uso específico al que se destinen.

3.2.4. Espumas y grasas

Las espumas consisten en materiales flotantes que se remueven de la superficie en los procesos de sedimentación primaria y secundaria, de las cámaras de arena, de los tanques de contacto de cloro, de los espesadores de gravedad y de los reactores.

Las espumas contienen grasas, aceites vegetales y minerales, grasas animales, ceras, jabones, residuos de alimentos, vegetales y cáscaras de frutas, pelo, papel, algodón, colillas de cigarros, materiales plásticos y materiales similares. Cuando las grasas, aceites y lubricantes se encuentran presentes, el valor energético de los materiales es alto.

Algunas PTAR municipales, están comenzando a explorar la adición de aceites y grasas a los sistemas de estabilización anaerobia para aumentar la producción de energía.

En la Tabla 3.1 se muestran las características de los lodos según su origen.

3.3. Análisis para los lodos del agua residual

Se deben usar técnicas apropiadas de muestreo y de análisis para la caracterización de los lodos del tratamiento del agua residual. El muestreo y análisis se realiza para obtener los datos para el control y mejoramiento de los procesos, para el cumplimento normativo, y para la toma de decisiones. Este capítulo provee de un panorama del muestreo y análisis de sólidos.

3.3.1. Muestreo

El objetivo del muestreo es colectar una porción del material tan pequeña en volumen para ser transportada convenientemente y tan grande para propósitos analíticos, mientras que sea representativa de la corriente de agua que se desea estudiar. Diferente frecuencia y volúmenes de muestra se sugieren dependiendo de las unidades de proceso que quieran evaluarse.

Antes de llevar a cabo un plan de muestreo, se debe desarrollar a detalle el protocolo de mues-

Tabla 3.1 Características del lodo residual según su origen (Metcalf & Eddy, 2003)

Lodo	Descripción
Tamizado	Todo tipo de basura, material orgánico e inorgánico removido en rejillas o tamices
Arenas	Partículas que sedimentan con alta velocidad especialmente arenas y algunas partículas orgánicas
Grasas y aceites	Provenientes de la superficie de los sedimentadores primarios y secundarios. Pueden ser grasas minerales y vegetales, detergentes, desechos de alimentos, desechos plásticos, papel, algodón y materiales similares. Gravedad específica entre 1.0 y 0.95
Lodo primario	Alta concentración de materia orgánica, tiene un olor extremadamente ofensivo
Lodo de tratamiento químico	El lodo de precipitación con sales metálicas es generalmente de color oscuro, por presencia de hierro. El lodo encalado es de color café claro. Lodos de tratamientos con aluminio y hierro son gelatinosos. Tienen mal olor, pero no tan ofensivo como los lodos primarios
Lodos activados	Son de color café. Si el lodo es oscuro significa que está séptico. Si el lodo es muy claro significa que le falta aeración o que no sedimenta fácilmente. Lodo típico tiene un olor a tierra mojada. Puede descomponerse rápidamente y generar muy mal olor
Lodo de filtros percoladores y biodiscos	Tienen aspecto de un humus. Se descomponen lentamente y generan menos olor. Se estabilizan con facilidad
Lodos de estabilización aerobia	Son de color café a café oscuro y están formados de flóculos biológicos. Si están bien estabilizados no producen mal olor y se deshidratan bien en lechos de secado
Lodos de estabilización anaerobia	Son de color oscuro o negro y contienen altas cantidades de gases. Estos lodos según su origen producen gas metano

treo y el plan de aseguramiento de calidad. Se deben especificar por lo menos, los siguientes puntos en el plan de aseguramiento de calidad (Pepper, *et al.*, 1996). En el Standard Methods (APHA, *et al.,* 2012), y NOM-004-SEMARNAT-2002 se encuentra información adicional sobre el muestreo.

1. Plan de muestreo.- Es el número de muestras requeridas, localización de los puntos de muestreo, tipo de muestras e intervalos de muestreo
2. Tipo y tamaño de muestras.-Tipo de muestras simples o compuestas y el volumen requerido
3. Etiquetas de las muestran y la cadena de custodia.- Etiquetas de las muestras, hoja de campo, cadena de custodia y designación de análisis para las muestras
4. Métodos de muestreo.-Técnicas y equipo para el muestreo
5. Almacenamiento de muestras y preservación.- Tipo de contenedores (plástico o vidrio), métodos de preservación, y tiempo máximo de entrega
6. Constituyentes de las muestras.- Lista de parámetros que van a ser medidos
7. Métodos analíticos.- Lista de métodos de prueba para campo y laboratorio y procedimientos utilizados y los límites de detección para los métodos individuales

3.3.2. Métodos de muestreo de lodos y biosólidos

Las presentes recomendaciones para el muestreo de lodos y biosólidos se encuentran descritas en la norma oficial mexicana, (Norma Oficial MexicanaNOM-004-SEMARNAT,2002), donde se presentan las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. El muestreo consiste en obtener una porción del volumen generado de lodo, la cual debe conservar la integridad de todos sus constituyentes desde el momento en que se toma la muestra (parte representativa de un universo o población finita

obtenida para conocer sus características), hasta el final de su análisis o determinación en el laboratorio. El tiempo en que éstas permanecen estables dependerá de sus características y método de preservación utilizado.

El muestreo constituye una parte integral y fundamental para evaluar la calidad de los lodos y biosólidos, para su depósito final.

El tamaño y número de muestras dependen de las fuentes generadoras, así como de los procesos utilizados para su estabilización. Es importante considerar la selección del sitio de muestreo, la homogeneidad y representatividad de la muestra, el grado de degradación, el volumen, tipo de análisis y la accesibilidad al sitio seleccionado para el muestreo.

3.3.2.1. Método para obtener muestras representativas de lodos y biosólidos

Es necesario que se mantenga la integridad física, química y biológica de las muestras durante el periodo de tiempo que transcurre entre la toma de muestra y el análisis. El análisis inmediato es la forma más segura de evitar errores debido al deterioro de la muestra. Los métodos de preservación del lodo incluyen almacenamiento y enfriamiento a 4 °C y acidificación. Las muestras deben homogeneizarse para minimizar errores. Se recomienda el uso de instrumentos especiales y botellas que minimicen la cantidad de muestra que se adhiere a las paredes del equipo o botellas.

Se deben obtener muestras representativas de lodos y biosólidos para determinar su contenido de Coliformes fecales, *Salmonella spp.*, huevos de helmintos, tasa específica de absorción de oxígeno (TEAO), contenido de sólidos totales y sólidos volátiles, arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc. En la Tabla 3.2 se presentan los equipos y materiales necesarios para el muestreo de lodos residuales.

Tabla 3.2 Equipos y materiales para el muestreo (NOM-004-SEMARNAT-2002)

Sólo se relacionan los equipos y materiales que son de relevancia para el presente método.
Equipo.
Báscula con capacidad mínima de 100 kg y precisión de 10 g
Báscula con capacidad mínima de 10 kg y precisión de 1 g
Criba M 2.00 según Norma Mexicana NMX-B-231-1990
Materiales
Bieldos
Bolsas de polietileno de 0,70 m x 0,50 m y calibre mínimo del No. 200
Bolsas de polietileno de 1,10 m x 0,90 m y calibre mínimo del No. 200
Botas de hule
Brocha de tamaño adecuado para la limpieza
Cascos de seguridad
Escobas
Guantes de carnaza
Ligas de hule de 1,5 mm de ancho
Marcadores de tinta permanente, preferentemente color negro
Mascarillas protectoras
Overoles
Papelería y varios (formatos de muestreo, lápices, gomas y otros)
Papelería y varios (informe de campo, marcadores, ligas, etc.)
Bolsas de polietileno estéril sin pastilla de tiosulfato o recipientes de polietileno o propileno inerte, de boca ancha y con tapa y cierre hermético, de 500 ml de capacidad y susceptibles de ser esterilizados en autoclave, para coliformes fecales
Recipientes de polietileno o propileno inerte o de vidrio, de boca ancha y con tapa y cierre hermético, de 50 ml, para metales
Recipientes de polietileno o propileno inerte, de boca ancha y con tapa y cierre hermético, de 500 ml de capacidad, para huevos de helmintos, sólidos y TEAO

3.3.2.2. Tipos de lodos

A continuación aparecen las recomendaciones de la NOM-002-SEMARNAT-2002, sobre los puntos de muestreo para diferentes tipos de lodos y algunos tipos de muestras.

a) Muestras líquidas o semisólidas

   Colectar la muestra directamente del vertedor en un recipiente de plástico de 20 L, hasta obtener como mínimo,el doble del volumen por utilizar para cada uno de los análisis por realizar

b) Tuberías

   Colectar la muestra directamente de la tubería a través la válvula de purga que presente un diámetro interno mínimo de 3.8 cm

c) Canales

   Colectar la muestra en el vertedor o en otro punto donde el lodo esté bien mezclado

d) Reactores

   Colectar la muestra de un tanque mezclado que es alimentado a través de líneas provenientes de diferentes niveles en el reactor. Antes del muestreo asegurarse de eliminar el lodo acumulado previamente en las líneas

e) Tanques

   Mezclar completamente el tanque y colectar varias muestras a diferentes profundidades y puntos. Juntar todas las muestras en una sola antes de realizar el análisis

f) Lodos de sitios específicos en plantas de tratamiento. Los siguientes puntos de muestreo se recomiendan para el muestreo de lodo en plantas de tratamiento de agua residual

   - Lodo primario.- Tomar una muestra de la purga de lodo del sedimentador primario. Puede ser en el cárcamo del lodo primario antes de bombeo, en la tubería que conduce al lodo primario al sistema de estabilización de lodos, mezclar perfectamente y colectar una muestra representativa en este punto. Alternativamente colectar muestras de la bomba de lodos y de las tuberías, cercanas a éstas instalaciones
   - Lodo activado.- Colectar muestras en: a) cárcamo de bombeo de lodo secundario; b) de la bomba o tubería adyacente

g) Punto de descarga de los lodos de retorno al afluente secundario, lodos de retorno o de recirculación

   - El punto de muestreo se debe localizar en una región de buena agitación para la suspensión de sólidos. Puede ser en el cárcamo de recirculación de lodo secundario o en la tubería que conduce al lodo secundario hacia el tanque de estabilización de lodos
   - Lodo estabilizado.- Colectar muestras en la tubería de descarga del reactor al equipo o lechos de secado
   - Lodos del lecho de secado.- Colectar muestras del mismo tamaño en diferentes puntos del lecho sin incluir arena. Mezclar totalmente
   - Lodo filtrado.- Colectar porciones del mismo tamaño (utilizar cortadores de galletas) en la descarga del filtro
   - Azolves.- Para el caso de los azolves, aplica cuando ha sido extraída una muestra representativa de la zona donde se encuentran depositados

h) Muestras sólida

Para conformar las muestras se usa el método del cuarteo. Para eso: Se toman de 4 a 8 bolsas de polietileno de 0.70 m x 0.50 m o 1.10 m x 0.90 m, se selecciona al azar el mismo número de sitios diferentes. Posteriormente, se llena cada una de las bolsas con el material de cada sitio y se trasladan a un área plana horizontal de aproximadamente 4 m x 4 m, preferentemente de cemento pulido o similar y bajo techo y se deposita su contenido en montículo. Traspalear el material con pala o bieldo, para obtener una mezcla homogénea. A continuación, dividir en cuatro partes aproximadamente iguales A, B, C y D y eliminar las partes opuestas A y C o B y D. Repetir esta operación hasta dejar 10 kg aproximadamente de lodo o biosólido. La pila resultante sirve para determinar en el laboratorio el contenido de Coliformes fecales, *Salmonella spp*., huevos de helmintos, contenido de sólidos totales y sólidos volátiles, arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc. El material restante se usa para determinar el peso volumétrico de los lodos in situ, conforme al punto 8. Trasladar la muestra al laboratorio en bolsas de polietileno debidamente selladas e identificadas (véase marcado). Evitar que queden expuestas al sol durante su transporte, además tener cuidado en el manejo de la bolsa que contiene la muestra para que no sufra ninguna ruptura. El tiempo máximo de transporte de la muestra al laboratorio, no debe exceder de 8 horas

i) Preparación de la muestra

La secuencia del muestreo por parámetro se debe realizar conforme con lo descrito en los puntos correspondiente con el propósito de minimizar sesgos en los resultados

j) Recipientes para cada parámetro

A la muestra, antes de ser procesada, se le determinará el contenido de sólidos totales en por ciento en peso, para el caso del TEAO el contenido de éstos deberá ser menor o igual al 2 por ciento

k) Coliformes fecales y *Salmonella* spp

Los recipientes de polietileno o polipropileno inerte de 500 ml de capacidad, antes del muestreo deben ser esterilizados preferentemente en autoclave. Posteriormente, se deposita la muestra que corresponda a 4 g de sólidos totales. Etiquetarlo y mantenerlo en refrigeración hasta su análisis

l) Huevos de helmintos, Sólidos totales y Sólidos volátiles y TEAO

Los recipientes de polietileno o polipropileno inerte de 500 ml de capacidad, antes de la toma de muestra deben ser enjuagados primero con agua potable a chorro y luego con agua destilada. Para el caso de huevos de helmintos, se toma el peso en fresco que corresponda a 2 g de sólidos totales. Para el caso de sólidos totales y volátiles y TEAO se llenan los recipientes hasta un 75 por ciento de su capacidad total, se cierran, etiquetan y mantienen en refrigeración, hasta su análisis, excepto para

TEAO que se mantiene a temperatura ambiente

m) Compuestos inorgánicos: arsénico, cadmio, cobre, cromo, mercurio, níquel, plomo y zinc

El recipiente de polietileno o polipropileno inerte, o de vidrio de 50 ml de capacidad, se debe enjuagar antes de la toma de muestra primero con agua potable a chorro y luego destilada. Posteriormente, se deposita la muestra hasta el total de la capacidad, se cierra, se etiqueta y se mantiene en refrigeración hasta su análisis

n) Preservación y almacenamiento de la muestra

En la Tabla 3.3 se presenta la preservación y tiempo máximo para el análisis de cada uno de los parámetros

Tabla 3.3 Preservación y tiempo máximo de análisis de muestras de lodo con diferentes parámetros

Parámetros	Preservación	Tiempo máximo de análisis
Coliformes fecales y Salmonella spp. 4 °C 48 horas.	4 °C	48 horas
Huevos de helmintos 4°C 30 días.	4 °C	30 días
Arsénico, cadmio, cobre, cromo, níquel, plomo y zinc 4 °C 180 días.	4 °C	180
Mercurio 4°C 13 días [a] (plástico). 38 días [b] (vidrio).	4 °C	13 días [a] plástico 38 días [b] vidrio
Sólidos totales 4°C 24 horas.	4 °C	24 horas
Sólidos volátiles 4°C 24 horas.	4 °C	24 horas
Tasa específica de absorción de oxígeno **	No requiere	Inmediato

*A partir de su toma y hasta antes de iniciar el análisis, la muestra debe mantenerse en refrigeración.

**Si la muestra se toma en el laboratorio, debe mantenerse la temperatura constante o ambiente durante el transporte y analizarla inmediatamente.

o) Control de calidad

El programa de muestreo debe operar con un sistema control de la calidad. El responsable del muestreo debe mantener los registros de los nombres y títulos de los técnicos que realizaron el muestreo y el del encargado de control de calidad que verificó los mismos y las bitácoras o formatos en los que se contengan cuando menos la siguiente información:

- Identificación de la muestra
- Cantidad de muestra utilizada
- Tipo de muestra
- Tipo de análisis a realizar
- Además, debe mantener la información original reportada por el personal técnico que intervino en el muestreo, traslado y recepción de las muestras, así como de la información complementaria

p) Etiquetado

La muestra se identifica con una etiqueta, la cual debe contener la siguiente información:

- Localidad, Municipio y Estado
- Identificación de la muestra
- Cantidad de muestra utilizada
- Tipo de muestra
- Tipo de análisis a realizar
- Además, debe mantener la información original reportada por el personal técnico que intervino en el muestreo, traslado y recepción de las muestras, así como información complementaria

q) Etiquetado

La muestra se identifica con una etiqueta, la cual debe contener la siguiente información:

- Localidad, Municipio y Estado
- Fecha y hora del cuarteo

- Condiciones climatológicas
- Cantidad de lodos tomados para el cuarteo, en kg
- Cantidad de lodos obtenidos para la selección en subproductos, en kg
- Datos del responsable del cuarteo
- Observaciones

r) Cálculos

Para determinar el peso volumétrico del lodo se utilizan recipientes limpios, sin abolladuras. La báscula empleada deberá estar nivelada. A continuación se pesa el recipiente vacío, tomando este peso como la tara del recipiente. Se llena hasta el tope con el lodo homogeneizado obtenido de las partes eliminadas del primer cuarteo (descrito anteriormente). El recipiente se golpea contra el suelo tres veces dejándolo caer desde una altura de 10 cm. Llenar hasta el tope teniendo cuidado de no presionar al colocarlo en el recipiente; esto con el fin de no alterar el peso volumétrico que se pretende determinar. Es importante vaciar dentro del recipiente todo el material, sin descartar los finos. Para obtener el peso neto del lodo, se pesa el recipiente con éstos y se resta el valor de la tara. Cuando no se tenga suficiente cantidad de material para llenar el recipiente se marca en éste la altura alcanzada y se determina dicho volumen. El peso volumétrico del lodo se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$Pv = \frac{P}{V} \qquad \text{Ecuación 3.1}$$

Dónde:

Pv = Peso volumétrico del lodo, en $kg \cdot m^{-3}$

P = Peso del lodo (peso bruto menos tara), en kg

V = Volumen del recipiente, en m^3

s) Interferencias

Colectar las muestras en el momento cuando el parámetro a analizar es inestable, por ejemplo la Tasa Específica de Absorción de Oxígeno (TEAO), o cuando se requiere realizar lo antes posible el análisis (por ejemplo el análisis microbiológico)

En la Ilustración 3.4, se observa un muestreo de lodos en la planta de Quiroga, Michoacán. a) Se dividieron los lechos de secado en seis cuadrantes cada uno, con ayuda de mecahilo. b) Se seleccionaron al azar el número de sitios dentro de estos cuadrantes donde se tomaron muestras de lodo que se iban vaciando en ocho bolsas de polietileno negro de 0,70 m x 0,50 m o 1,10 m x 0,90 m; c) Las bolsas con el lodo de cada sitio, se trasladaron a un área plana horizontal de aproximadamente 4 m x 4 m, donde se colocó una lona y se vació el contenido de todas las bolsas, para formar un montículo, se traspaleó el material con pala, para obtener una mezcla homogénea, se dividio la mezcla en cuatro partes iguales A, B, C y D, se eliminaron las partes opuestas A y C o B y D, se repitió esta operación hasta dejar 10 kg de lodo. d) De la pila de 10 kg se tomaron las muestras correspondientes para determinar los parámetros de la NOM-004-SEMARNAT-2002. El material restante se usó para determinar el peso volumétrico de los lodos in situ. Las muestras se trasladaron al laboratorio en envases de polietileno debidamente sellados e identificados y en hielo. Se evitó que quedaran expuestas al sol durante su transporte. El tiempo máximo de transporte de la muestra al laboratorio, no excedió de 8 horas.

Ilustración 3.4 Muestreo de lodos en lechos de secado por el método del cuarteo

A)

B)

C)

D)

3.3.2.3. Constituyentes que se encuentran en los sólidos

Los lodos pueden ser líquidos, semilíquidos y sólidos, ya que contienen de 0.25 a 12 por ciento de sólidos por peso. Por lo tanto el principal constituyente del lodo es el agua. El resto de los constituyentes son sólidos (no líquidos), los cuales son sustancias responsables de la naturaleza negativa del lodo. Los constituyentes sólidos incluyen: sólidos suspendidos, orgánicos biodegradables, nutrientes, patógenos, metales, y tóxicos orgánicos. En la Tabla 3.4 se enlistan los constituyentes sólidos encontrados en los biosólidos.

Tabla 3.4 Constituyentes sólidos encontrados en los lodos (adaptado de Metcalf y Eddy, Inc., 2003)

Constituyentes	Comentarios
Sólidos suspendidos	Partículas sólidas que permanecen en suspensión en el agua como coloides o debido al movimiento del agua. Algunas de las propiedades del lodo que son afectadas por la cantidad de sólidos suspendidos son: Color, densidad y viscosidad
Orgánicos biodegradables	Están compuestos de proteínas, carbohidratos y grasas. La principal fuente de los orgánicos biodegradables es la comida, productos secundarios producidos por los humanos y células del tratamiento secundario.
Inertes	Sustancias que tienen poca o ninguna habilidad para reaccionar con otras sustancias.
Nutrientes	Nutrientes comunes encontrados en los biosólidos incluyen el carbono, nitrógeno y fósforo.
Contaminantes	Compuestos orgánicos e inorgánicos que son conocidos o se sospecha que son carcinogénicos, mutagénicos, teratogénicos o tienen alta toxicidad.
Patógenos	Organismos que trasmiten enfermedades.
Metales	Pueden ser esenciales o perjudiciales para las plantas o animales.

Los sólidos y los constituyentes del lodo varían dependiendo del origen de la materia orgánica e inorgánica, la cantidad de tiempo que tengan y el tipo de proceso al que se sometieron. Entre los constituyentes químicos se incluyen nutrientes, cuyo análisis es importante.

3.3.2.4. Métodos de análisis

Los análisis usados para determinar los constituyentes en el lodo se dividen en: físicos, biológicos y químicos. Los detalles analíticos se pueden encontrar en el Manual de Métodos Estándar (APHA, *et al.*, 2012), la NOM-004-SEMARNAT-2002 y otras Normas oficiales mexicanas como la NMX-AA-034-SCFI-2008 para la determinación de sólidos.

3.3.2.5. Propiedades físicas

Una propiedad física es cualquier aspecto o sustancia que se puede medir o percibir sin un cambio químico o biológico en la muestra. En muchos de los casos, las propiedades físicas se determinan por observación. Una de las más importantes características físicas del lodo es su contenido y composición de los sólidos. El contenido de sólidos se describe en términos de peso en base seca (sólidos totales). en la Tabla 3.5 se muestran las pruebas, los parámetros físicos y las unidades de medida.

Los sólidos incluyen materia inorgánica tales como sales, arenas, gravas y arcillas. Material orgánico como fibras de plantas y microorganismos que se encuentran en forma natural y como fuente humana. Los sólidos se clasifican por su tamaño y estado, características químicas y distribución de tamaño. Los sólidos pueden estar dispersos en el agua en formas suspendidas o disueltas. De acuerdo a su tamaño los sólidos se pueden clasificar como suspendidos, sedimentables, coloidales o disueltos. Se caracterizan por ser volátiles o no volátiles. El agua y el lodo residual contienen una gran variedad de materiales sólidos que varían en un gran rango de tamaños, desde partículas finas y materiales coloidales hasta partículas gruesas como arenas y gravas. En la Ilustración 6.2 (capítulo 6) se observan los diferentes tamaños de las partículas que pueden estar presentes en los lodos.

La clasificación del tipo de sólidos que se encuentran presentes en el agua y lodos residuales y los parámetros con los cuales se pueden analizar en el laboratorio se describen en la Tabla 3.6.

Tabla 3.5 Resumen de las propiedades físicas de los lodos (adaptado de Metcalf & Eddy, 2003)

Prueba	Unidades	Descripción
Densidad	kg m^{-3}	Masa por unidad de volumen de sólidos. Cuando se expresa la densidad, se debe diferenciar entre la densidad de la muestra y la densidad tomada en campo del lodo apilado o dispuesto o descargado en el relleno. La densidad en el campo puede ser menor que la densidad de la muestra debido a los poros creados con el método de manejo.
Gravedad específica	Sin unidades	Relación de la densidad de los sólidos y la densidad del agua.
Sólidos húmedos	kg, toneladas húmedas	Peso de la muestra entera, incluyendo los sólidos y los líquidos asociados en la muestra. Es usado para expresar la producción de sólidos, especialmente cuando la medida se basa en el peso total de los sólidos (ejemplo, costos de relleno sanitario, etc.).
Sólidos secos	kg, toneladas, por ciento	Peso de la masa de sólidos en la muestra. Este peso o masa está asociado con los sólidos y excluye el peso o masa del agua. Esta medida se usa para expresar la producción de sólidos procesados.
Volumen	m^3	Es el espacio ocupado por los sólidos. Cuando se expresa el volumen, se debe diferenciar entre el volumen de la muestra y el volumen del lodo en condiciones de campo, en el relleno sanitario o apilado. Cuando los sólidos son manipulados o descargados, los poros entre terrones (aglomerado de sólidos) incrementan el volumen.
Sólidos totales	mg L^{-1}, por ciento	Material residual después de la evaporación de una muestra y su subsecuente secado en un horno de 103 a 105 °C a peso constante. Este valor se da también en porcentaje del peso total como (por ciento de sólidos totales).
Sólidos totales disueltos	mg L^{-1}	Material residual después de la filtración de una muestra a través de un filtro de fibra de vidrio y el posterior secado en un horno a 180 °C.
Sólidos volátiles	mg L^{-1}, por ciento	La cantidad de sólidos totales que se volatiliza y queda después de la incineración a 550 °C, en la presencia de un exceso de aire.
Sólidos fijos	mg L^{-1}, por ciento	El residuo que permanece después de que los sólidos se combustionan a 550 °C, en la presencia de un exceso de aire. Los sólidos fijos algunas veces se denominan sólidos inertes.
Sólidos sedimentables	mL L^{-1}	El volumen ocupado por los sólidos sedimentables de una muestra en un periodo específico de tiempo. La prueba se lleva a cabo con un cono lmhoff durante un periodo de tiempo de 45 minutos.
Olores	D/T	Dilución del umbral (D/T) es la cantidad de dilución de una muestra de olor que resulta en la mitad de un panel de olor que detecta el olor cuando se presenta en un olfatómetro. Los olores son causados por los gases producidos por la descomposición de compuestos orgánicos incluyendo el sulfuro reducido, mercaptanos, escatoles, indoles, ácidos inorgánicos, aldehídos, cetonas y otros compuestos que contienen sulfuro y nitrógeno. El tipo y característica del olor depende de los compuestos presentes. La caracterización del olor incluye factores tales como intensidad, carácter, hedonismo, y el nivel de detección. Algunas veces, mide o determina la concentración de los constituyentes específicos del olor.
Color		Los sólidos con color se relacionan a la composición y concentraciones de ciertos elementos tales como sulfuros metálicos.
Distribución de tamaño de partículas	µm	La prueba cuantifica la cantidad y rangos del tamaño de las partículas. Esta prueba es importante para evaluar la efectividad del proceso de tratamiento. Los tres métodos usados son la filtración en serie, el conteo electrónico de partículas y la observación directa en microscopio.
Temperatura	°C	La temperatura de los sólidos y del lodo es importante por su efecto en las reacciones químicas. Por ejemplo, durante el composteo la temperatura del lodo alcanza los 40 °C o más alta en cinco días.
Conductividad	mS m^{-1} o µmho cm^{-1}	La conductividad es la habilidad de los sólidos para conducir una corriente eléctrica.

Tabla 3.6 Clasificación de los sólidos presentes en el agua y lodos residuales, (Metcalf y Eddy, 2003)

Parámetro	Descripción
1.-Sólidos totales (ST)	Es la cantidad de todos los ST que son determinados por secado en un horno, en un volumen conocido de una muestra de agua o lodo residual, colocada en una cápsula de porcelana, previamente tarada. La muestra se evapora y se seca a una temperatura específica (103°-105°C). La cápsula se pesa nuevamente . Los sólidos se determinan usando la siguiente fórmula: $$ST = \frac{(M1 - M2)}{V}$$ Dónde: M1= masa de la cápsula de porcelana después de secarse en un horno a 105 °C (mg) M2= masa inicial de la cápsula de porcelana (mg) V = Volumen de la muestra (L))
2.-Sólidos totales volátiles (STV)	Son los sólidos que pueden volatilizarse y quemarse cuando los ST se incineran (500 ± 50°C). Es la cantidad de sólidos que se volatilizan cuando la muestra se coloca en una mufla a 550 °C. Esta estimación es útil para determinar el contenido orgánico de una muestra de agua y lodo residual. La muestra se incinera a 550°C durante 2 horas en la mufla. La cápsula con la muestra se saca de la mufla con guantes de lona y se coloca en un desecador, para que se enfríe y se pueda volver a pesar. Los sólidos volátiles se determinan usando la siguiente fórmula: $$SVT = \frac{(M1 - M3)}{V}$$ Dónde: M1 = Masa de la cápsula de porcelana después del secado a 105 °C (mg). M3 = Masa de la cápsula después de la incineración a 550 °C (mg)) V = Volumen de la muestra (L) Los STV se pueden dividir en fracción suspendida y fracción filtrable.
3.-Sólidos totales fijos (STF)	Los residuos que permanecen después de que los ST son incinerados (500 ± 50°C). Es la cantidad de sólidos que no se volatilizan a 550 °C. Esta medida se usa para calcular la cantidad material mineral contenida en el agua o lodo residual. Es la diferencia entre los ST y los SV. Se puede dividir en fracción suspendida y fracción filtrable.
4.-Sólidos suspendidos totales (SST)	Porción de los ST retenidos en un filtro con un poro específico, se miden después de ser secados a una temperatura específica (105°C). El filtro usado más comúnmente es el filtro de fibra de vidrio, que tiene un poro nominal de 1.58 µm. Se usan filtros de tipo Gooch de porcelana previamente tarados, los filtros se secan a 105°C, después de la filtración, se ponen a enfriar en el desecador a temperatura ambiente y después se pesan. Los sólidos suspendidos totales se determinan usando la siguiente fórmula: $$SST = \frac{(M4 - M5)}{V}$$ Dónde: M4 = masa del filtro después de secarse a 105 °C (mg) M5 = masa del filtro inicial (mg) V = Volumen de la muestra (L))

Tabla 3.6 Clasificación de los sólidos presentes en el agua y lodos residuales, (Metcalf y Eddy, 2003) (continuación)

Parámetro	Descripción
5.-Sólidos suspendidos volátiles (SSV)	Los SSV son una porción de los SS que pueden ser removidos por incineración en una mufla. La incineración se realiza a 550°C dura 2 horas, el filtro se enfría en un desecador a temperatura ambiente y posteriormente la muestra se pesa. Los SSV se determinan usando la siguiente fórmula: $$SSV = \frac{(M4 - M6)}{V}$$ Dónde: M4 = masa del filtro después de secado a 105 °C (mg) M6 = masa del filtro después de incineración a 550 °C (mg) V = Volumen de la muestra (L)
6.-Sólidos suspendidos fijos (SSF)	Son los residuos que permanecen después de que los SST son incinerados (500 ± 50°C). Los SSF se determinan sustrayendo los SSV de los SST.
7.-Sólidos disueltos totales (SDT)= (ST- SST)	Son aquellos sólidos que pasan a través del filtro, y después se evaporan y secan a una temperatura específica. Los sólidos disueltos totales son los coloidales y disueltos. Los sólidos coloidales están en un rango de 0.001 a 1 µm. Los SDT o sólidos filtrables, se determinan sustrayendo los SST de los ST.
8.-Sólidos disueltos volátiles (SDV)	Son los sólidos que se pueden evaporar e incinerar cuando los SDT se incineran (500 ± 50°C).
9.-Sólidos disueltos fijos (SDF)	El residuo que permanece después de que los SDT se incineran (500 ± 50°C).
10.-Sólidos sedimentables	Son los sólidos suspendidos, expresados en mL por litro, que sedimentarán de la suspensión, en un cono Imhoff, en un periodo de tiempo específico, que puede ser de una hora. En el cono Imhoff se puede leer el volumen de los sólidos sedimentables. Se expresa en mL L^{-1}.

Las interrelaciones entre las diferentes fracciones de sólidos, que se encuentran en el agua residual o lodo, se representan en la Ilustración 3.5. La prueba para obtener los sólidos sedimentables consiste colocar una muestra de agua en un cono Imhoff de 1 L de capacidad y anotar el volumen de sólidos en mililitros que se sedimentan después de un tiempo determinado. Alrededor del 60 por ciento de los sólidos en un agua residual municipal son sedimentables. Los sólidos totales (ST) se obtienen evaporando la muestra de agua o lodo y registrando el peso final en el residuo. Como se puede observar, en la Ilustración 3.5, la etapa de filtrado se usa para separar los sólidos suspendidos totales (SST) de los sólidos disueltos totales (SDT). En la Ilustración 3.6 se presenta el equipo y material que se usa para determinar los diferentes tipos de sólidos en los lodos.

3.3.2.6. Propiedades biológicas

Cuantifica las propiedades biológicas y describe la presencia de organismos específicos en una muestra, cómo la muestra se descompone cuando las reacciones biológicas ocurren y el potencial del sistema. En la Tabla 3.7 se incluyen las descripciones de las propiedades biológicas de los sólidos.

3.3.2.7. Propiedades químicas

Las propiedades químicas se usan para cuantificar y describir cómo las sustancias reaccionan y cambian cuando se combinan con otras. Las propiedades químicas de los sólidos y los lodos incluyen pH, alcalinidad, concentraciones de elementos, conductividad, y temperatura. En la Tabla 3.8 se describen las propiedades químicas más comunes.

Tabla 3.7 Resumen de propiedades biológicas de los lodos adaptada de (Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering Treatmentand Reuso, 2003)

Prueba	Descripción
Densidad de microorganismos	El número de microorganismos por unidad de masa de sólidos totales (peso húmedo) en el lodo.
Organismos patógenos	Organismos que causan enfermedades, tales como bacterias, protozoarios, virus y huevos de helminto.
Organismos indicadores	Organismos que indican la presencia potencial de organismos patogénicos. Usados y analizados debido a que son más numerosos y fáciles de analizar que otros organismos de interés.
Toxicidad	La toxicidad del lodo indica los efectos de los constituyentes encontrados en el lodo que afectan al ambiente. Se lleva a cabo con organismos indicadores.
Atracción de vectores	La disponibilidad del lodo o sólidos de atraer roedores, moscas, mosquitos u otros organismos capaces de trasmitir agentes infecciosos.
Tasa específica de consumo de oxígeno	La masa de oxígeno consumida por unidad de tiempo por unidad de masa de los sólidos totales (base seca) cuando la estabilización se hace con base a condiciones aerobias.

Ilustración 3.5 Interrelaciones entre los diferentes tipos de sólidos en agua y lodos residuales

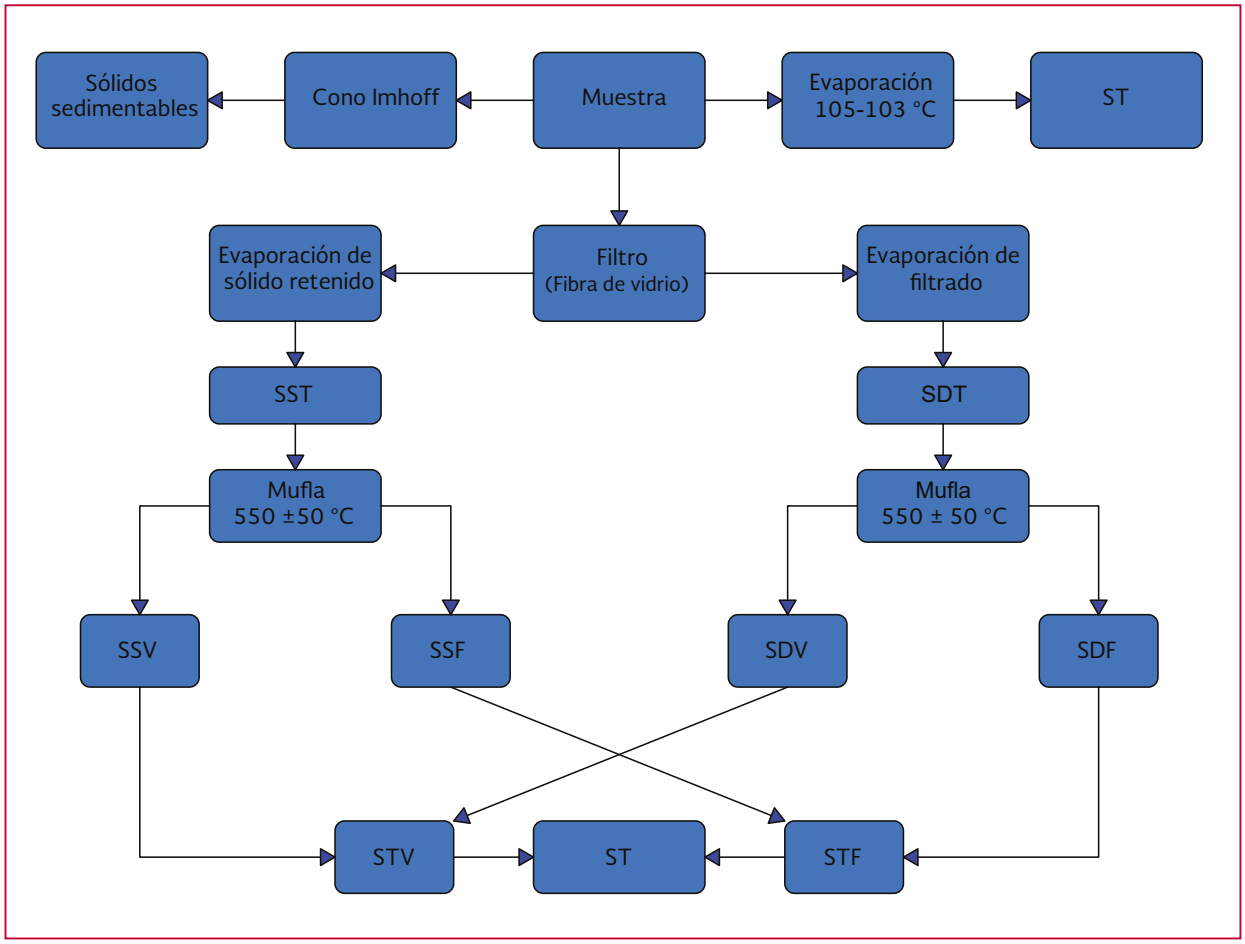


Tabla 3.8 Resumen de las propiedades químicas en los sólidos (adaptada de Metcalf & Eddy, 2003)

Prueba	Unidades	Descripción
pH		Indicador de la acidez de una sustancia. El pH es el logaritmo negativo del ion hidrógeno: $pH=-\log_{10}[H^+]$
Alcalinidad	mg L^{-1} como $CaCO_3$	La habilidad de resistir el cambio en el pH en la presencia de ácidos débiles y bases débiles. La alcalinidad resulta de la presencia de hidróxidos [OH^-], carbonatos [CO_2^{3-}], y bicarbonatos [HCO_3^-] de elementos tales como el calcio, magnesio, sodio, potasio y amoníaco.
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg L^{-1}	La cantidad de oxígeno requerido para una completa oxidación de una sustancia a dióxido de carbono y agua. Los métodos de análisis incluyen el método de reflujo abierto y cerrado (titrimétrico y colorimétrico).
Compuestos volátiles orgánicos (COV´s)	% ST	Compuestos con alta presión de vapor y baja solubilidad en agua. Son fáciles de evaporar a temperatura ambiente; pueden ser tóxicos, teratogénicos o carcinogénicos en los humanos. Los métodos de análisis incluyen cromatografía de gases, técnicas de masa espectrofotométricas y cromatografía de gases con detección fotoionización (PID) y con detección de conductividad electrolítica (ELCD) en serie.
Grasas, aceites y lubricantes (G y A	% ST	Sustancias usadas en la preparación de alimentos que son líquidos a temperaturas altas pero se vuelven viscosos o sólidos con cambios de temperatura. Se pueden usar como productos benéficos (ejemplo, en la estabilización anaerobia y en el incremento de la producción de gas). Se determinan por extracción (ASTM DO77).
Compuestos orgánicos	% ST	Compuestos que contienen carbón, por ejemplo, proteínas, celulosa, ligninas y potasio. La cantidad de compuestos orgánicos se expresa como porcentaje del total del peso seco.
Compuestos inorgánicos	% ST	Compuestos que no contienen carbón. Los compuestos inorgánicos más comunes son sulfuro, hierro, y sílice.
Compuestos ácidos orgánicos	mg kg^{-1}	Son los compuestos orgánicos con propiedades ácidas. Los compuestos más comunes son los ácidos acéticos, fórmicos, cítricos y oxálicos. Los ácidos orgánicos se producen durante los procesos de fermentación.
Gases	%	Los gases típicos incluyen el dióxido de carbono, metano y sulfuro de hidrógeno.
Nutrientes	mg kg^{-1}	Las más comunes e importantes formas de nutrientes en el lodo son el nitrógeno y fósforo. El nitrógeno se encuentra como amoníaco, nitrógeno gas, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico. Las formas del fósforo en solución acuosa incluyen el ortofosfato, polifosfatos y fósforo orgánico. El fósforo enlazado orgánicamente es un importante constituyente de los lodos de aguas residuales.
Metales	mg kg^{-1}	Muchos metales que se encuentran en los biosólidos son requeridos para el crecimiento vegetal, pero a concentraciones altas pueden ser tóxicos. Se determinan por absorción atómica, absorción atómica electrotérmica, plasma acoplado inductivamente (ICP), o espectofotometría de masas. Los analitos estudiados son: arsénico, cadmio, cobre, plomo, mercurio, molibdeno, níquel, selenio y zinc.
Contenido de energía o Capacidad calorífica	kJ kg^{-1} de ST	Es la cantidad de calor producida por la combustión de cierta cantidad de lodo o sólido. Medida en calorías o joules.

3.3.2.8. Consideraciones analíticas adicionales

Límites contaminantes.-Los límites de contaminantes es un valor numérico que describe la cantidad de contaminantes permitidos por cantidad de lodo (ejemplo, miligramos por kilogramo de sólidos totales). Dependiendo de las investigaciones ecotoxicológicas, los límites se determinan por volumen de material que puede aplicarse por unidad de área en suelo (ejemplo, litros o kilogramos por hectárea)

Micro constituyentes.- Es un término que se usa desde mediados de los años 1990 por la EPA y otros investigadores, para identificar químicos y sustancias que no tienen un valor normativo en este momento. Han sido descubiertos recientemente en las corrientes y existen sospechas del detrimento de vida acuática o del ambiente. Los micro

Ilustración 3.6 Equipo y materiales que se usan para determinar los diferentes tipos de sólidos en los lodos y aguas residuales

Estufa de secado

Mufla

Desecador

Balanza analítica

Equipo de filtración, conformado por matraz, pinzas, embudo

Conos Imhoff

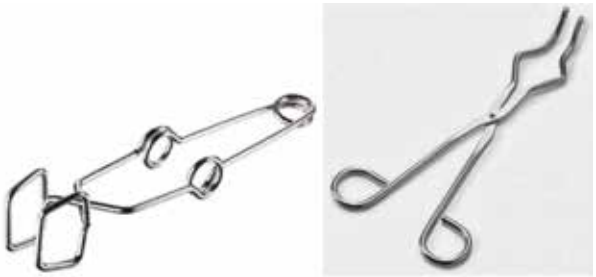
Ilustración 3.6 Equipo y materiales que se usan para determinar los diferentes tipos de sólidos en los lodos y aguas residuales (continuación)

Papel filtro

Equipo para medir los SDT

Cápsulas de porcelana

Crisol de Gooch de porcelana



Pinzas de laboratorio

Guantes de asbesto

constituyentes no son necesariamente compuestos químicos nuevos pero incluyen contaminantes que recientemente se han identificado y evaluado. Se han identificado varias clases de microconstituyentes:

Contaminantes orgánicos persistentes.- Son compuestos que no son fácilmente degradados y se acumulan en las células grasas de los animales. Ejemplos de estos compuestos son los éteres difenilos polibromados (PBDE´s), utilizados como inhibidores de llama en distintas aplicaciones, por ejemplo, en plásticos y tejidos. Su uso comenzó a extenderse en los años 70, y desde entonces han demostrado ser contaminantes medioambientales, por lo que en el año 2004 fueron objeto de regulación internacional para disminuir su presencia en el medioambiente. Los PBDE´s causan daños en el DNA, daña el hígado, el sistema reproductivo y el sistema nervioso

Productos farmacéuticos y de cuidado personal.- Incluyen muchas drogas prescritas (ejemplo, antidepresivos, para el control de presión); medicamentos sin prescripción médica (ejemplo, ibuprofeno); bactericidas (ejemplo, triclosan); protectores solares y mascarillas sintéticas. Esta clase de compuestos incluyen algunos metabolitos

Disruptores endocrinos (EDC´s).- Incluyen estrógenos sintéticos (ejemplo, 17 α-etinilestradiol, PCPP) y andrógenos (ejemplo, trenbolona que es un esteroide, droga veterinaria), de forma natural se presentan estrógenos (ejemplo, 17β-estradiol, testosterona); y otros muchos (ejemplo, pesticidas organoclorados, alquilfenoles) que son capaces de modular las funciones hormonales normales y la síntesis de esteroides en los organismos acuáticos

Medicinas veterinarias.-Tales como anti-microbianos, antibióticos, anti fungicidas, promotores de crecimiento y hormonas

Nanomateriales.-Tales como nano tubos de carbón o partículas a nano escala como dióxido de titanio, de los cuales se conoce poco su destino o efectos en el medio ambiente

3.4. Características típicas de los lodos residuales

3.4.1. Tratamiento preliminar

Las características del material cribado variarán ampliamente con las características del agua residual y el tamaño de las aberturas de las cribas y el método de cribado manual, lavado y compactación. A medida que el tamaño de apertura de las cribas disminuye, la cantidad de material cribado aumenta rápidamente. El material cribado frecuentemente contiene sólidos fecales y algunas grasas y aceites. La cantidad de material cribado se expresa en peso por volumen de flujo. En la Tabla 3.9 se representan las características del material cribado.

La cantidad de arenas y gravas varía ampliamente en cada planta. Los factores que afectan la cantidad de arenas y gravas incluyen la edad del sistema y si los drenajes son separados o combinados. Se espera que haya mayor cantidad de arenas y gravas en los sistemas más viejos y con drenajes combinados. Las ca-

Tabla 3.9 Características de los materiales residuales del tratamiento preliminar de cribado adaptado de (US, EPA, 1979)

Material residual	Contenido de sólidos (%)	Fracción volátil (%)	Valor de combustión kJ kg^{-1}	Peso húmedo kgv m^{-3}
Material cribado	6.1-20	80-96	11,600-18,142.4	40-67
Arenas y gravas	35-87	1-56		

racterísticas de las gravas se muestran en la Tabla 3.9. La gravedad específica de las arenas y gravas varía de 1.3 a 2.7. La calidad de las arenas y gravas se puede controlar implementando un lavado para remover el material putrescible; sin embargo, un excesivo lavado removerá las arenas finas. Las gravas y arenas contienen patógenos.

3.4.2. Tratamiento primario

Las propiedades de los lodos primarios se presentan en la Tabla 3.10. Tienen un contenido alto de sólidos (5 a 6 por ciento,), debido a buenas características de sedimentación. Varios factores afectan o influyen en la concentración de sólidos removidos en los sedimentadores primarios:

Tabla 3.10 Composición química de sólidos primarios y de lodos activados de purga (adaptada de Metcalf & Eddy, 2003)

Parámetro	Lodos primarios no tratados		Lodo primario estabilizado		Lodo activado no tratado
	Rango	Típico	Rango	Típico	Rango
Sólidos totales en base seca (por cientoST)	5-9	6	2-5	4	0.8-1.2
Sólidos volátiles(por ciento de ST)	60-80	65	30-60	40	59-88
Grasas y aceites(por ciento de ST)					
Solubles	6-30	-	5-20	18	-
Extracto	7-35	-	-	-	5-12
Proteínas (por ciento de ST)	20-30	25	12-20	18	32-41
Nitrógeno (N, por ciento de ST)	1.5-4	2.5	1.6-3.0	3.0	2.4-5.0
Fósforo (P_2O_5, por ciento de ST)	0.8-2.8	1.6	1.5-4.0	2.5	2.8-11
Potasio (K_2O, por ciento de ST)	0-1	0.4	0.0-3.0	1.0	0.5-0.7
Celulosa (por ciento de ST)	8-15	10	8-15	10	-
Hierro (no como sulfuro)	2.0-4.0	2.5	3.0-8.0	4.0	-
Sílice (S_iO_2 por ciento de ST)	15-20	-	10-20	-	-
pH	5.0-8.0	6.0	6.5-7.5	7.0	6.5-8.0
Alcalinidad (mg L^{-1} como $CaCO_3$)	500-1500	600	2 500-3 500	3 000	580-1 100
Ácidos orgánicos (mg L^{-1} como HAc)	200-2 000	500	100-600	200	1 100-1 700
Contenido de energía kJ de $STkg^{-1}$	23 000-29 000	25 000	9 000-14 000	12 000	19 000-23 000

- Una remoción pobre de arenas y gravas o falta de remoción de arenas y gravas en el pre tratamiento, anterior al sedimentador
- Altos niveles de lodos, gravas y arenas en el afluente por aguas pluviales y lavados por el incremento de flujo por fuertes precipitaciones
- Descargas industriales que contribuyen significativamente a la carga de los sólidos sedimentables
- Co-espesamiento de sólidos primarios con sólidos biológicos
- Limitaciones mecánicas de remoción de lodo y equipo de bombeo
- Septicidad y largos tiempos de retención en los sedimentadores, especialmente durante los meses de verano

3.4.3. Tratamiento secundario

Los procesos biológicos de tratamiento generan lodos secundarios. Las características de estos lodos varían de acuerdo a las condiciones de operación específicas de los sistemas de tratamiento.

3.4.3.1. Lodos activados convencionales

Los lodos que se generan en los tratamientos convencionales de lodos activados se preceden algunas veces de sedimentación primaria; por lo tanto los lodos son producto de un crecimiento biológico. En la Tabla 3.11 se presentan las características de los lodos activados de los procesos convencionales. La concentración de sólidos en

Tabla 3.11 Características físicas y cantidades de lodos producidos por diferentes operaciones y procesos de tratamiento (adaptado de Metcalf & Eddy, 2003)

Operaciones y procesos de tratamiento de agua residual	Gravedad específica de los sólidos	Gravedad específica del lodo	Sólidos secos kgx 10^{3}· m^{-3}	
			Rango	Típico
Sedimentación primaria	1.4	1.02	110-170	150
Lodos activados (biosólidos)	1.25	1.005	70-100	80
Filtro percolador (biosólidos)	1.45	1.025	60-10	70
Aeración extendida (biosólidos)	1.30	1.015	80-120	100[a]
Lagunas aeradas (biosólidos)	1.30	1.01	80-120	100[a]
Filtración	1.20	1.005	12-24	20
Remoción de algas	1.20	1.005	12-24	20
Adición de químicos a los tanques primarios para remoción de fósforo				
Con baja dosis de cal (350-500 mg L^{-1})	1.9	1.04	240-400	300[b]
Con alta dosis de cal (350-500 mg L^{-1})	2.2	1.05	600-1300	800[b]
Nitrificación Crecimiento suspendido c				
Desnitrificación crecimiento suspendido	1.20	1.005	12-30	18
Filtros gruesos	1.28	1.02	-	-d

a = Sin tratamiento primario

b = Sólidos adicionales a los normalmente removidos en la sedimentación primaria

c = insignificante

d = Incluidos en la producción de biosólidos de los procesos de tratamiento secundario

los lodos activados depende de las características de sedimentación de los sólidos y de la carga de los procesos de sedimentación secundaria. La sedimentabilidad de los lodos se ve afectada por:

Características biológicas de los lodos.-Las características dependen de los tiempos de retención de lodos o tiempos de retención celular (TRC) y de las condiciones de operación. Tiempos de retención cortos y una baja concentración de oxígeno disuelto en ambientes aeróbicos permite el crecimiento de organismos filamentosos. Este tipo de organismos afectan las propiedades de sedimentación. El lodo con organismos filamentosos (bulking o abultamiento de lodos) se produce también por desbalance de nutrientes o por otras condiciones que afectan la sedimentación.

Temperatura.- Las bajas temperaturas aumentan la densidad del agua lo cual reduce la tasa de sedimentación que puede reducir la concentración de sólidos. Bajas temperaturas pueden afectar también las características físicas del lodo

Límites mecánicos del sistema de transporte de lodo.-Algunos equipos de manejo de sólidos no deben transportar lodos con altas concentraciones de sólidos debido a la naturaleza pseudo plástica y viscosa de estas corrientes

Presencia de sólidos suspendidos densos.-La adición de químicos para la remoción de fósforo resulta en la formación de precipitados densos que aumentan las propiedades de sedimentación. En instalaciones donde no hay sedimentación primaria, la presencia de sólidos fijos en el lodo aumentará la concentración de sólidos

Procesos biológicos típicos.-La sedimentabilidad de los sólidos en el clarificador o sedimentador secundario está influenciada por los procesos biológicos. Plantas con selectores en la entrada del sistema de lodos activados producen mejor sedimentación y sólidos muchos más consistentes. Los procesos de remoción biológica de fósforo también producen sólidos que sedimentan más rápidamente que otros procesos

3.4.3.2. Aeración extendida/laguna de oxidación

El proceso de aeración extendida, no es precedido por sedimentación primaria y se opera con altos tiempos de retención. Los sólidos generados en este proceso tienen altas concentraciones de sólidos inertes en relación a los generados en el proceso de lodos activados convencional.

Remoción biológica de nutrientes.-El proceso de remoción biológica de nutrientes (RBN) usa ambientes alternativos (aerobio, anóxico, anaerobio) para facilitar la remoción de nitrógeno y fósforo por medios biológicos. Se pueden combinar estos procesos con adición de químicos cuando se requieren concentraciones de fósforo más bajas. La operación de los procesos RBN afecta las propiedades de los lodos generados. El nitrógeno presente en los lodos activados de un proceso de RBN está asociado a la materia celular y los constituyentes están en un rango de 8 a 12 por ciento de peso seco. El fósforo puede ser tomado por la biomasa durante la síntesis celular (1.5 a 2 por ciento en base seca) o se almacena como cadenas largas de polifosfatos en los procesos de

remoción biológica de fósforo (RBP). Este último mecanismo resulta en un contenido de fósforo de 3.5 a 6 por ciento. Los polifosfatos están sujetos a una rápida liberación a formas solubles si los lodos son expuestos a condiciones anaerobias, (por ejemplo, sedimentadores secundarios con mantos profundos de lodos, espesadores de gravedad y corrientes de recirculación de los deshidratadores). La liberación del fósforo soluble da como resultado recirculación significativa de fósforo al tratamiento del agua de las corrientes de espesamiento y deshidratación. En algunas instalaciones, los lodos biológicos son residuos de los reactores aerobios más que de los clarificadores secundarios, con el propósito de eliminar la disolución del fósforo asociada con las condiciones anaerobias. Esta práctica resulta en la producción de grandes volúmenes de lodos secundarios diluidos, que requerirán de espesamiento durante el manejo del lodo

Biopelícula fija/Procesos híbridos.-Los proceso de biomasa fija que incluyen los filtros percoladores y filtros biológicos de contacto o biodiscos. Muchas innovaciones recientes incluyen reactores biológicos con lecho móvil (RBLM), sistemas integrados de lecho fijo con lodos activados (LF-LA) y filtros biológicos aerados (FBA). Los lodos de los procesos de biomasa fija pueden presentar un aumento de la concentración de organismos superiores incluyendo algas, hongos, protozoarios y lombrices. Los lodos que se producen en sistemas con biopelícula mejoran ligeramente las características de sedimentación comparados con los lodos de crecimiento suspendido. Cuando se remueven de los clarificadores secundarios, el contenido de sólidos es ligeramente superior comparados con otros procesos biológicos. El rendimiento observado en estos sistemas es ligeramente menor a los sistemas convencionales debido al alto tiempo de retención de los sólidos en la biopelícula

Bioreactores de membrana.-En el tratamiento del agua residual se ha incrementado el uso de los bio-reactores de membrana (BRM) . Los principios del tratamiento son similares a los de otros tratamientos biológicos, pero tienen varios rasgos particulares que afectan las propiedades de los lodos

Los reactores de membrana requieren del uso de cribas finas (por ejemplo, 1 a 2 mm de abert ura) antes del proceso secundario para minimizar que la membrana falle. Además, si los sólidos fijos se remueven aguas arriba, los sólidos generados tendrán una fracción volátil más alta

Los bio reactores de membrana operan frecuentemente con valores de tiempo de retención celuar cortos (TRC) o bajos valores de A/M y tienen una fracción volátil alta que resulta del cribado fino aguas arriba. Esto puede ser una desventaja para la estabilidad de los sólidos en comparación con tiempos de retención más altos. La producción de lodos es menor que en otros sistemas biológicos

Tratamiento terciario.- Los requerimientos son más estrictos en estos sistemas. Los tratamientos terciarios se usan para darle una mayor calidad al efluente. Los procesos terciarios incluyen filtración, tratamiento químico para una remoción adicional, procesos de membranas para

reúso de agua e instalación de post nitrificación y desnitrificación. Las características de los sólidos dependen de los procesos usados. Por ejemplo, los sólidos removidos por filtración serán parecidos a los del proceso biológico pero estarán más diluidos antes del espesamiento. Los sólidos químicos generados de la precipitación del fósforo tendrán una concentración más alta de sólidos inertes, se pueden espesar en un reactor con altas concentraciones de sólidos

3.4.4. Estimación de la cantidad de lodos generados en el tratamiento del agua residual

3.4.4.1. Criterios para el diseño del tratamiento de lodos

Las corrientes de lodos en una planta se diseñan tomando en cuenta la producción promedio anual y mensual estimadas a 10 o 20 años. Diferentes condiciones de diseño se aplican en las diferentes etapas en el proceso de tratamiento.

Producción anual.-La producción promedio anual se define como el promedio diario de producción de lodos para un proceso o sistema de tratamiento cuando los datos se promedian sobre un periodo anual. En muchos casos, el promedio anual de la producción de lodos se usa para dos propósitos.

1. Determinar las condiciones normales del proceso de tratamiento. Cuando se consideran las condiciones de puesta en marcha para determinar la duración de la operación del sistema de lodos. El promedio anual de producción de lodos se usa cuando se requiere en el futuro una fase adicional de construcción del sistema de tratamiento de lodo
2. Determinar los costos de operación. Las cantidades promedio anuales se usan para estimar los costos de operación presentes y futuros asociados con los sistemas de tratamiento de lodos

Máximo mensual.-El tamaño de las unidades de proceso se determinan de acuerdo a las condiciones de producción mensual de lodos para un futuro diseño.

La producción mensual de lodos se define como la más alta tasa promedio de producción diaria de lodos determinada por mes para un periodo anual dado. Se puede usar como criterio de diseño el pico de 30 días, que corresponde al más alto promedio de producción en 30 días. El uso del máximo mensual o pico de 30 días debe ser consistente con el criterio seleccionado para una corriente líquida (por ejemplo, si el criterio del pico 30 días se establece para la corriente líquida, entonces se recomienda que el criterio del pico de 30 días se use para diseñar el sistema de tratamiento).

Pico semanal.- El pico semanal se usa para estimar la máxima producción de lodos del sistema de tratamiento. El pico semanal de producción de lodos se define como la máxima producción diaria de lodos cuando se considera el promedio de una semana en un calendario anual. Un pico semanal puede ser una semana calendario o un periodo pico de siete días. El pico semanal de producción de lodos permite que los procesos de tratamiento puedan manejar la producción esperada, ya sea para almacenamiento o para estimar el incremento de horas de operación de los sistemas de espesamiento y deshidratación.

Pico diario.-El pico diario de producción de lodos no se usa como criterio de diseño para un sistema de tratamiento. La producción pico diaria representa una condición extrema de producción de sólidos la cual no se presenta en un periodo largo de tiempo. Este criterio, se aplica para retirar la porción sólida en una corriente (por ejemplo, el bombeo de lodos). Este criterio se usa para revisar el sistema de bombeo y asegurarse que todos los sólidos se retiran bajo estas condiciones de producción. En muchos casos, las bombas se diseñan para una operación intermitente que manejen alta producción de lodos a través de una operación prolongada. Sin embargo, se recomienda que los sistemas de bombeo y transporte usados para la remoción de sólidos de una corriente líquida tengan capacidad suficiente para manejar estos picos potenciales en la producción de lodos. Al igual que el pico semanal, el almacenamiento o la atenuación de una corriente líquida deben ser parte integral del manejo de la producción de lodos.

Horas de operación. Son un criterio de diseño establecido para el espesamiento, deshidratación, u otros procesos de tratamiento donde se requiere la presencia del operador para la puesta en marcha, paro y otros aspectos de la operación. El criterio de diseño seleccionado depende de los procesos específicos y corresponde a turnos de trabajo. Las horas de operación se deben considerar cuidadosamente en el dimensionamiento final de las unidades de proceso y debe ofrecer flexibilidad para manejar un producción mayor al promedio. Por ejemplo, la operación de deshidratación en un filtro prensa de banda debe diseñarse para la producción máxima mensual y con una concentración de sólidos de 3 a 4 por ciento. Si el diseño del sistema se basó en un periodo de tiempo menor de 24 horas, 7 días por semana, entonces se requiere una capacidad adicional para el tratamiento y manejo de flujos inesperados. Una instalación diseñada para ser operada de 5 a 16 horas por día, debe extender el tiempo de operación para manejar los picos de producción. Adicionalmente, si el proceso de tratamiento de los lodos está fuera de operación debido a reparaciones inesperadas, se pueden incluir horas extras de trabajo para alcanzar y reestablecer las condiciones de operación del sistema.

3.4.5. Cantidad de lodos

Muchos factores influyen en la cantidad de lodos producidos incluidas las características del afluente, el tamaño del tratamiento primario y secundario, y las condiciones de operación. Además, se recomienda que se consideren los datos específicos de la planta y que se establezca el balance de masa de la planta.

Si se quiere realizar una estimación inicial de producción de lodos se pueden aplicar algunas reglas práctica. Por ejemplo, la producción de lodos es de 1 g en base seca por 4 litros tratados. La cantidad variará ampliamente de acuerdo a la distribución entre sólidos primarios y lodos activados.

En la Tabla 3.11 se muestra la cantidad de sólidos de las diferentes unidades de proceso. Estas características se deben usar con precaución. Lo más recomendable es usar los datos de la planta para establecer los criterios de diseño específicos para cada una de las unidades de tratamiento.

3.4.6. Métodos de estimación de la cantidad de lodos

3.4.6.1. Perspectiva general

Las cantidades de lodos se pueden estimar usando datos históricos, cuando se encuentran disponibles, métodos empíricos, y métodos basados en modelos. Se debe verificar la confiabilidad de los datos históricos usando los estimados de producción de lodos y un enfoque basado en un modelo.

Las estimaciones empíricas de producción de lodos se realizan utilizando las cargas actuales o proyectadas de la planta y datos de desempeño, las dosis de químicos y la producción de lodos de los procesos en la planta. Por ejemplo, si se usa la masa de DBO removida en un proceso de lodos activados y una tasa de producción de lodo, es posible estimar la masa de lodo secundario producido.

Los modelos se basan en un balance de masas para predecir la producción de lodos. Existen modelos de diseño como los publicados por la Comisión de Investigación del Agua (Water Research Commission, 1984), Wentzel, *et al.,* (1990) y Tchobanoglous *et al.,* (2003), o los modelos de simulación dinámica que incluyen más detalle de los procesos de lodos activados tales como ASM1, ASM2d, o ASM3 (Henze et al., 2000). Ambos modelos se basan en el balance de masa de la demanda química de oxígeno (DQO), incorpora cinéticas de crecimiento biológico y proporciona comparativos de producción de lodos.

3.4.6.2. Análisis de los datos históricos

La fuente de datos de la producción de sólidos incluye los registros históricos, datos de muestreos, y datos de la literatura. Muchas plantas miden los flujos de las corrientes de lodo o los lodos de desecho al medir los cambios de volumen en los tanques de almacenamiento o usan curvas de bombas (ejemplo, en bombas de desplazamiento positivo el recorrido de la bomba es el factor principal para definir capacidad y grados de la presión de la bomba. Mayor desplazamiento (movimiento más largo) produce tasas de flujo más altas y mayor presión/succión por carrera). También se mide la concentración de sólidos en las corrientes de lodo.

Las mediciones se basan en muestras simples o compuestas. Se prefieren las muestras compuestas porque se relacionan con el flujo y por lo tanto son más representativas. Los permisos municipales requieren de muestras compuestas para las corrientes del afluente y del efluente de una planta, pero el muestreo de las corrientes de lodo frecuentemente se basa en muestras simples y además se toman con menor frecuencia. Las muestras simples se deben usar con cuidado porque dependen de cuándo se colecten durante el ciclo de remoción del lodo. Cuando en una planta no hay datos disponibles, se debe realizar un estudio de muestreo para aumentar los datos históricos.

Antes de usar los datos históricos, se deben analizar estadísticamente para detectar algunos datos que estén fuera de lugar, identificar tendencias, seleccionar los datos representativos y calcular las tasas de producción promedio de lodos. Los datos estadísticos básicos requeridos son el promedio, la mediana, el mínimo, el máximo, la desviación estándar y la varianza, además de la elaboración de gráficos de producción de lodos en el tiempo. El percentil del grupo de datos puede ser de ayuda para seleccionar los datos representativos.

3.4.6.3. Técnicas para la estimación empírica del lodo

Las técnicas de estimación empírica de lodo se basan en el uso de las características de los procesos, producción de lodo, de la adición estequiométrica de químicos, para calcular la producción de lodos. Para los sedimentadores primarios, la producción de lodos a partir de los sólidos suspendidos se puede calcular como sigue:

Producción de lodo en el sedimentador primario (*LP*)

$$LP_M \frac{Q \times SST_{afl} \times E}{1\,000} \qquad \text{Ecuación 3.2}$$

donde:

LP_M	=	Masa de lodo primario, kg d^{-1}
Q	=	Flujo del afluente primario, m^3 d^{-1}
SST	=	Sólidos suspendidos totales del afluente primario, mg L^{-1}
E	=	Eficiencia de remoción como fracción

En la Tabla 3.12 se presentan las eficiencias de remoción de los clarificadores primarios para DBO, Sólidos suspendidos totales (SST) y el fósforo total (PT).

Tabla 3.12 Eficiencias de remoción de los clarificadores primarios (adaptado de WEF et al., 2009)

Parámetro	Sin coagulación química	Con coagulación química
	Remoción (%)	
DBO	25-40	40-70
SST	40-70	60-90
PT	5-10	70-90

En la Tabla 3.13 se presenta la producción de lodos en los sistemas de tratamiento secundario. Estos datos se pueden usar para estimar la producción de lodos en la planta. La cantidad de lodos es variable debido a que la producción de lodos secundarios depende de muchos factores entre los cuales se incluyen:

- Materia orgánica aplicada al sistema biológico, expresada como DBO o DQO en kg d^{-1}
- SST aplicados al proceso biológico, expresados en kg d^{-1}
- Tiempo de retención de sólidos efectivo, expresado en días.
- Temperatura del agua residual
- Características de la materia orgánica del afluente (DBO ó DQO), SST y el tipo de sistema de tratamiento biológico

La masa de la materia orgánica afecta la producción de sólidos biológicos debido a que estos se generan de la materia orgánica aplicada. La masa de sólidos suspendidos totales afecta la producción de sólidos biológicos debido a que una porción de los SST no es biodegradable. Se incluyen los sólidos fijos (o no volátiles) los sólidos suspendidos fijos (SSF) y una porción de sólidos suspendidos volátiles (SSV) que no se degradan o remueven en el sistema de tratamiento biológico. En las plantas de tratamiento municipal del 30 al 40 por ciento de los SSV no son biodegradables en los sistemas biológicos de tratamiento.

El tiempo de retención de sólidos afecta la producción de sólidos ya que tiene un efecto sobre la degradación de la materia orgánica del afluente. El aumento del tiempo de residencia hidráulica (TRH) incrementa la respiración endógena, que permite una mayor degradación de sólidos biológicos sintetizados. La respiración endógena da como resultado la conversión de los sólidos biológicos sintetizados a dióxido

de carbono (CO_2) y agua (H_2O). En la síntesis biológica, los sólidos no se oxidan completamente, debido a que quedan los residuos no biodegradables. Así, en los sistemas biológicos la producción de lodos no se puede reducir a cero por medio del tiempo de retención. El tiempo de retención de lodos o tiempo de retención celular, afecta la degradación de la materia particulada del afluente. Un tiempo corto de retención (menos de tres días), produce una pequeña degradación de la materia orgánica particulada. Más de tres días de retención, la materia orgánica particulada se degrada, quedando sólo residuos no biodegradables. Las características de los sistemas biológicos de agua residual afectan directamente a las características de la producción de sólidos biológicos. La degradabilidad de la materia orgánica del afluente afecta la conversión de la materia orgánica, a los sólidos biológicos y su subsecuente oxidación como resultado del incremento del tiempo de retención. Las características de los sistemas biológicos afectan la producción de los sólidos biológicos y las tasas de degradación.

Los reactores de membrana y los sistemas de biomasa fija tendrán una producción de sólidos que son más bajas que los valores mostrados por los lodos activados convencionales.

Los sólidos químicos se producen por la adición de reactivos químicos para remover el fósforo. La cantidad de lodos químicos producidos se puede estimar usando la dosis de sales de metálicas, el fósforo removido y la reacción química estequiométrica. El procedimiento tradicional para estimar el lodo formado incluye primero cálculos para determinar la cantidad de fosfatos metálicos formados y después el cálculo de los hidróxidos formados con el exceso de iones metálicos. La masa de fosfatos metálicos formados se calcula usando la estequiometria de la reacción química y la masa de fosfato removido. El exceso de los iones metálicos se calcula con base a la dosis de las sales metálicas. La masa de los hidróxidos metálicos formada se estima posteriormente utilizando la reacción estequiométrica. La masa del lodo químico se determina usando este método que frecuentemente incrementa la cantidad del lodo en 35 por ciento, debido a que el método estequiométrico es sólo una aproximación de las reacciones químicas que ocurren (USEPA, 1987).

La cantidad del lodo formada debido a la remoción de sólidos disueltos (ejemplo, orgánicos solubles) se puede estimar usando la siguiente fórmula y asumiendo una eficiencia de remoción de orgánicos solubles del 30 por ciento (USEPA, 1987):

$$DS_M = COTS_{afl} \times E_{sol} \times 1.6 \times 1.18 \qquad \text{Ecuación 3.3}$$

$$DS_M = DQOS_{afl} \times E_{sol} \times 1.6 \times 1.18 \qquad \text{Ecuación 3.4}$$

$$DS_M = DBOS_{afl} \times E_{sol} \times 1.6 \times 1.18 \qquad \text{Ecuación 3.5}$$

DS_M = Masa del lodo producida por la remoción de sólidos disueltos, kg d^{-1}

$COTS_{afl}$ = Carbono orgánico soluble total en el afluente, mg L^{-1}

$DQOS_{afl}$ = Demanda química de oxígeno soluble en el afluente, mg L^{-1}

$DBOS_{afl}$ = Demanda biológica de oxígeno soluble en el afluente, mg L^{-1}

E_{sol} = Porcentaje de remoción de orgánicos solubles, por ciento

En los procesos de remoción biológica de fósforo (RBP) se espera un aumento en la producción de lodo secundario comparado con los procesos de lodos activados convencionales. Esto ocurre

por el almacenamiento de grandes cantidades de polifosfatos inorgánicos y sus contraiones asociados, y la baja tasa de decaimiento de los organismos que acumulan fósforo. (Wentzel y Ekama, 1997). La masa del lodo secundario en un reactor de remoción biológica de fósforo (RBP) aumenta de 20 a 25 por ciento con agua residual cruda y de 45 a 55 por ciento para agua residual sedimentada, comparada con el proceso convencional de lodos activados de acuerdo al modelo de Wentzel *et al*.,1990.

Estimación de la producción de lodo biológico

Los lodos biológicos se producen en los procesos de tratamiento tales como lodos activados, filtros biológicos y biodiscos. Las cantidades y características de estos lodos varían con el metabolismo y la velocidad de crecimiento de los microorganismos presentes en el sistema.

Tabla 3.13 Producción de lodos en procesos de crecimiento suspendido (WEF,2012)

Tipo de proceso	Tasa de producción de lodo Y (kg SST (lodo)/ kg DBO removida)
Lodos activados después de clarificación primaria	0.7
Lodos activados sin clarificación primaria	
Convencional (aeración gradual, completamente mezclado, flujo pistón, alimentación por etapas)*	0.85
Aeración extendida y laguna de oxidación	0.65
Estabilización por contacto	1.0

*Para sistemas con tiempos de retención hidráulica menores de 10 horas.

Producción de lodos activados de desecho o purga de lodos (DLA)

La cantidad de lodos activados de desecho (DLA) depende de dos parámetros: el peso seco del lodo y la concentración del lodo. A continuación se presenta la forma de estimar la producción de lodos activados de desecho en base seca.

Para calcular la producción de lodos se debe conocer la cantidad de materia orgánica removida en el proceso, la cantidad o masa de microorganismos en el reactor, los sólidos suspendidos biológicos inertes a la entrada del reactor y la cantidad de sólidos suspendidos que salen en el efluente.

Estas variables pueden calcularse a partir de las siguientes ecuaciones:

$$P_x = (Y \times S_r) - (k_d)(M) \qquad \text{Ecuación 3.6}$$

$$DLA = P_x + SSF_{afl} - SST_E \qquad \text{Ecuación 3.7}$$

donde:

Tabla 3.14 Símbolos utilizados para representar los parámetros cinéticos en los procesos biológicos. (EPA, 1979)

Como en este capítulo. Símbolo	Nombre	Otros símbolos que se utilizan para cantidades similares	Otros nombres que se utilizan
Px	Producción biológica de sólidos	ΔXv, dX/dt, A, S, dM/dt	Acumulación, crecimiento neto, producción en exceso de microoganismos
Y	Coeficiente de rendimiento o producción	A, ks,c	Coeficiente de crecimiento, coeficiente de síntesis.
S_r	Sustrato removido	dA/dt, S, B, Fi, R	Alimento,consumo, carga
k_d	Coeficiente de decaimiento	B, ke	Respiración endógena, energía de mantenimiento, auto-oxidación
M	Masa de microorganismos	S, X, Xv	Masa de microoganismos, sólidos bajo aeración, sólidos suspendidos del licor mezclado

DLA = Lodos activados de desecho o purga de lodos activados, kg d^{-1}

P_X = Producción biológica de sólidos, gSSV producidos d^{-1}

SSF_{afl} = SS no volátiles o fijos alimentados al proceso de lodos activados, kg d^{-1}

SST_E = SS en el efluente, kg d^{-1}

Y = Coeficiente de rendimiento o producción, kg kg^{-1}

S_r = Sustrato removido (por ejemplo, DBO), kg d^{-1}

K_d = Coeficiente de decaimiento, d^{-1}

M = Masa de los microorganismos en el sistema de lodos activados (SSV), kg

Las ecuaciones 3.6 y 3.7 son las que se usan generalmente, sin embargo los autores utilizan diferentes símbolos presentados en la Tabla 3.14 para representar los términos que utilizan estas ecuaciones.

Para calcular la ecuación 3.6 se necesita conocer los coeficientes Y y K_d, que se pueden determinar experimentalmente o utilizar datos reportados en la literatura para PTAR municipales. (Metcalf & Eddy, 2003; EPA 1979).

Para la ecuación 3.7 es necesario estimar SSF_{afl} y SST_E

El término SSF_{afl} incluye:

- Sólidos suspendidos fijos del afluente, considerando corrientes de recirculación o reciclo
- Precipitados químicos, por ejemplo si se adicionan sales de aluminio en el proceso de lodos activados
- Sólidos del agua de lluvia, si no se remueven antes del proceso
- El contenido normal de sólidos fijos en el proceso de lodos activados. Este es aproximadamente de 20 por ciento a 25 por ciento de los SST

Los sólidos suspendidos del efluente (SST_E) se pueden considerar alrededor de 10 mg L^{-1}. Otros factores que influyen en la producción de lodo son la relación A/M (alimento/microorganismos) y el tiempo de retención celular (TRC). El ejemplo 3.6 ilustra el cálculo de la producción de lodo activado de desecho.

Producción de lodo en sistemas de biomasa fija (filtros biológicos y biodiscos)

Aunque hay diferencias entre estos sistemas, la metodología para calcular la producción de lodos es similar y se puede hacer mediante la siguiente ecuación:

$$P_x = (Y' \times S_r) - (k'_d)(A_m) \qquad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde:

P_X = Producción biológica de sólidos, kgSSV producidos d^{-1}

Y' = Coeficiente de rendimiento o producción, kg·kg^{-1}

S_r = Sustrato removido (por ejemplo, DBO), kg d^{-1}

K'_d = Coeficiente de decaimiento, d^{-1}

A_m = Promedio del área superficial total del reactor, m^2

3.4.6.4. Estimación basada en el Modelo Teórico

Muchos factores afectan la producción y composición del lodo: 1) la composición del afluente; 2) La eficiencia del sedimentador primario; 3) el tiempo de retención de sólidos; y 4) la temperatura.

Características del afluente del agua residual.-La estimación de la producción de lodos requiere información detallada de las características del agua residual para identificar los componentes que forman la carga orgánica total. Los métodos para medir los diferentes componentes se describen en WERF (2003) en donde clasifican los componentes de la DQO total en soluble, coloidal (no sedimentable), y particulada. Así como la fracción soluble biodegradable e inerte, y la fracción particulada, como se muestra en la Ilustración 3.7. Esta caracterización es crítica para estimar la producción de lodo. Adicionalmente se debe conocer el contenido de sólidos inorgánicos suspendidos (SIS) (SIS = SST-SSV). También, la relación DQO/SSV del afluente tiene un efecto sobre la producción de lodo y la composición del lodo activado y del lodo primario

La división de la DQO del afluente dentro de cuatro componentes primarios se define por tres fracciones (f_{US}, f_{UP}, y f_{BS}), expresadas como un valor decimal.

f_{US} = fracción de la DQO total del afluente, fracción soluble no biodegradable

f_{UP} =fracción de la DQO total del afluente, fracción particulada no biodegradable

f_{BS} = fracción de la DQO total del afluente, que es realmente biodegradable

Si se usan estas fracciones, la división de la DQO total en el afluente se divide en cuatro componentes como sigue:

$$S_{us} = f_{us} \times S_{T,AFL} \quad \text{Ecuación 3.9}$$

$$X_I = f_{up} \times S_{T,AFL} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

$$S_{BS} = f_{ub} \times S_{T,AFL} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

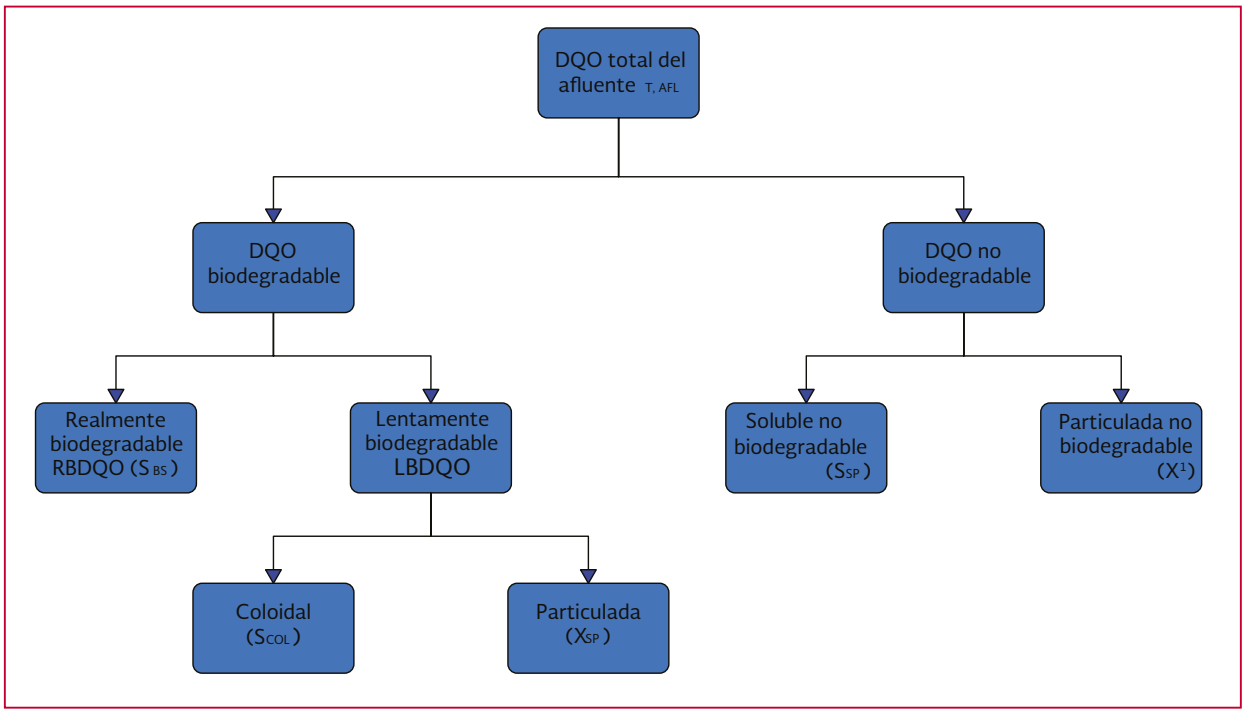
$$LBDQO = (1 - f_{BS} - f_{US} - f_{UP}) \times S_{T,AFL} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

dónde:

S_{US}	=	Concentración de DQO soluble no biodegradable (mg L^{-1})
X_I	=	Concentración de DQO particulada no biodegradable (mg L^{-1})
S_{BS}	=	Concentración de DQO soluble realmente biodegradable (mg L^{-1})
$LBDQO$	=	DQO lentamente biodegradable (mg L^{-1})
$S_{T,AFL}$	=	Concentración del DQO total del afluente (mg L^{-1})

Para modelar la remoción de materia orgánica en los tanques de sedimentación primaria y la composición y la carga de DQO de la corriente que pasa al sistema de lodos activados, es importante distinguir entre las porciones de la DQO lentamente biodegradable (LBDQO) que son coloidales y particuladas debido a que sólo una porción del material lentamente biodegradable

Ilustración 3.7 Fraccionamiento de la demanda química de oxígeno (DQO) del afluente



es sedimentable. Esta división de LBDQO dentro de las porciones coloidales y particuladas se define por otra fracción:

$$X_s = f_{XSP} \times LBDQO \qquad \text{Ecuación 3.13}$$

$$S_{COL} = (1 - f_{XSP}) \times LBDQO \qquad \text{Ecuación 3.14}$$

dónde:

S_{COL} = Concentración de DQO coloidal lentamente biodegradable (mg L^{-1})

X_S = Concentración de DQO particulada lentamente biodegradable (mg L^{-1})

En resumen

$$S_{T,AFL} = S_{BS} \times S_{US} \times X_1 \times X_{SP} \times S_{COL}$$

Ecuación 3.15

$$X_{ISS} = SST - SSV \qquad \text{Ecuación 3.16}$$

Los componentes orgánicos de un agua residual municipal se muestran en la Tabla 3.15. La DQO del agua residual es de 600 mg L^{-1}. Se considera una remoción de 60 por ciento de sólidos en el sedimentador primario y una concentración de 2 por ciento de sólidos en el lodo primario.

La producción primaria de volátiles en el lodo por unidad de la carga de DQO del afluente se puede estimar con base a la fracción de la masa que se remueve en el clarificador primario y la definición de la fracción de DQO del afluente como sigue:

Tabla 3.15 Composición del afluente y efluente del tratamiento primario de agua residual municipal

Componente	Afluente crudo	Efluente primario	Unidades
DQO total (ST,AFL)	600	378	m L^{-1}
Fracciones			
f_{US}	0.05	0.079	
f_{UP}	0.13	0.084	
f_{BS}	0.16	0.254	
f_{XSP}	0.75	0.550	
Concentraciones			
S_{BS}	96	96	m L^{-1}
S_{US}	30	30	m L^{-1}
X_I	78	32	m L^{-1}
S_{COL}	99	99	m L^{-1}
X_{SP}	297	121	m L^{-1}
Otras características			
DBO	295	202	m L^{-1}
DQO/DBO	2.04	1.87	mg mg^{-1}
SSV	235	96	m L^{-1}
SST	290	118	m L^{-1}
XSSI = SSI = SST -SSV	55	22	m L^{-1}
$f_{CV,P}$	1.6	1.6	mg mg^{-1}

$$\frac{PS_{SSV}}{MS_T} = \frac{f_{REM} \times Q_{AFL} \times (X_I + X_I / f_{CV,P})}{Q_{AFL} \times S_{T,AFL}}$$

$$= f_{REM} \times [f_{XSP} \times (1 - f_{US} - f_{UP} - f_{BS}) + f_{UP}] / f_{CV,P}$$

Ecuación 3.17

$$\frac{PS_{SST}}{MS_T} = \frac{PS_{SSV}}{MS_T} + \frac{f_{REM} \times Q_{AFL} \times SSI}{Q_{AFL} \times S_{T,AFL}}$$

$$= \frac{PS_{SSV}}{MS_T} + f_{REM} \times \frac{X_{SSI}}{S_{T,AFL}}$$

Ecuación 3.18

donde:

PS_{SSV} = Tasa de producción de SSV de lodo primario (g d^{-1})

MS_T = DQO total del afluente crudo (g d^{-1})

Q_{afl} = Flujo del afluente crudo (m^3 d^{-1})

f_{REM} = Fracción de masa removida de STP

$f_{CV,p}$ = DQO/SSV

La producción del lodo primario por unidad de carga de DQO del afluente se puede estimar adicionando el componente de SSI como sigue:

donde:

PS_{SST} = Tasa de producción de SST de lodo primario (g d^{-1})

X_{SSI} = Concentración de SSI del afluente crudo (mg L^{-1})

3.4.6.5. Estimación biológica

Para cuantificar la producción de lodos en un sistema de lodos activados de aguas residuales municipales, con determinada operación y tiempo de retención de sólidos, se requiere de la siguiente información:

- Masa de sustrato utilizado para crecimiento de biomasa
- Coeficiente de rendimiento o producción (Y)
- Tasa de respiración endógena (b)
- Cantidad de residuos endógenos generados (cuantificados por el factor f definido abajo
- Partículas orgánicas inertes (no biodegradables) del afluente
- Sólidos suspendidos inorgánicos del afluente (SSI = SST-SSV)

Esta sección resume las ecuaciones en estado estacionario para cuantificar la cantidad de lodo activado y la composición como una función del tiempo de retención de sólidos (TRS) y la temperatura. Se debe tomar en cuenta que la determinación de las fracciones de DQO se hace con respecto a la corriente de lodo activado. Si el proceso de tratamiento tiene sedimentador primario esas fracciones son diferentes de las del agua residual cruda o afluente a la planta de tratamiento.

La masa de DQO para el crecimiento de biomasa por día se puede calcular usando la siguiente ecuación:

$$M\Delta S = Q_{afl} \times S_{T,afl} \times (1 - f_{US} - f_{UP}) = MS_{T,afl} \times (1 - f_{US} - f_{UP})$$

Ecuación 3.19

donde:

$M\Delta S$ = Masa de sustrato utilizado por día (g DQO d^{-1})

Q_{afl} = Flujo o caudal del afluente de lodos activados (m^3 d^{-1})

$S_{T, afl}$ = DQO total de afluente de los lodos activados (mg DQO L^{-1})

$MS_{T, afl}$ = Masa del sustrato en el afluente (gDQO d^{-1})

f_{US} = Fracción de $S_{T, afl}$, la cual es soluble y no biodegradables (sin unidades)

f_{UP} = Fracción de $S_{T, afl}$, la cual es particulada y no biodegradable (sin unidades)

La cantidad de sólidos producidos en un sistema biológico se pueden estimar usando las siguientes ecuaciones:

$$MX_T = MX_V + MX_{SSI}$$

Ecuación 3.20

$$MX_V = MX_H + MX_E + MX_I$$

$$= MS_{T,afl} \times \phi_X \times \left\{ \frac{\gamma \times (1 - f_{US} - f_{UP})}{1 + b \times \phi_X} x \left(1 + f \times b \times \phi_X + \frac{f_{UP}}{f_{CV,P}} \right) \right\}$$

Ecuación 3.21

$$MX_{SSI} = Q_{afl} \times X_{SSI} \times \varnothing x$$

Ecuación 3.22

donde:

MX_T = Masa de sólidos totales (g d^{-1})

MX_H = Masa de biomasa activa (g d^{-1})

MX_E = Masa de residuo endógeno (g d^{-1})

MX_I = Masa de sólidos inertes (g d^{-1})

$S_{T, afl}$ = DQO total del afluente de lodos activados (mgDQO L^{-1})

f_{US} = Fracción de $S_{T afl}$, que es soluble no biodegradable (sin unidades)

f_{UP} = Fracción de $S_{T, afl}$, que es particulada y no biodegradable (sin unidades)

γ = Rendimiento o producción (mg SSV mg^{-1} de DQO) -0.47 mg SSV mg^{-1} DQO

b = Coeficiente de decaimiento (d^{-1})
-0.24 $(1.029)^{T-20}$ d^{-1}

F = Fracción de células remanentes como inertes después de la respiración endógena (sin unidades)
-0.2 (sin unidades)

Otras relaciones útiles son la fracción activa de SSV y la producción de lodo por unidad de DQO removida del afluente.

La biomasa (activa) de la fracción de sólidos volátiles:

$$f_{AV} = \frac{MX_H}{MX_V}$$

$$\frac{1}{1 + f_{xbx\phi} + \left(\frac{f_{UP}}{f_{CV,P}}\right) x\left((1 + b + \phi_X)/[\gamma\, x\,(1 - f_{US} - f_{UP})]\right)}$$

Ecuación 3.23

La producción de SSV por unidad de DQO removida del afluente (DQO afluente menos DQO del efluente filtrado.

$$\frac{M\Delta S_V}{M\Delta S} = \frac{MX_V \big/ \phi_X}{M\Delta S}$$

$$= \frac{([\gamma \times (1 - f_{US} - f_{UP})]/(1 + f_{xbx\phi_X}) + (f_{UP}/f_{CV,P}))}{1 - f_{US}}$$

Ecuación 3.24

La producción de SST por unidad de DQO del afluente removido (DQO del afluente menos el DQO del efluente filtrado):

$$\frac{M\Delta S_T}{M\Delta S} = \frac{MX_T \big/ \phi_X}{M\Delta S}$$

$$= \frac{\left(\left\{\frac{[\gamma \times (1 - f_{US} - f_{UP})]}{1 + b \times \phi_X}\right\} \times (1 + f \times b \times \Theta_X) + \left(\frac{f_{UP}}{f_{CV,P}}\right)\right) + \left(\frac{x_{SSI}}{S_{T,AFL}}\right)}{1 - f_{US}}$$

Ecuación 3.25

3.4.7. Modelos de simulación detallados

La mayoría de los modelos biológicos aplicados en simulaciones se basan en modelos ASM (Henze *et al.*, 2000). En estos modelos el decaimiento de los organismos se basa en el enfoque de la muerte-regeneración como una alternativa a la respiración endógena que se utiliza en las ecuaciones anteriores. Este método usa dos parámetros para cuantificar el decaimiento de los organismos: 1) tasa de decaimiento (b) y 2) una fracción residual endógena (*f*).

3.4.7.1. Factores adicionales que afectan la producción de lodo

Muchos factores pueden afectar la producción de lodo en una planta de tratamiento y diferir de los valores que se obtienen usando las ecuaciones simplificadas. Por ejemplo:

- El coeficiente de producción (Y) anóxico es menor que el del crecimiento aerobio; además, la producción de lodo en sistemas con desnitrificación debe ser menor. Las tasas de decaimiento anóxicas también se supone que deben ser menores, sin embargo, esto podría tener un efecto compensatorio
- En sistemas con adición de carbón para remoción de nitrógeno, los sustratos son compuestos orgánicos simples (por ejemplo, metanol). En aguas residuales municipales los coeficientes de producción para estos casos pueden ser menores que para una mezcla de compuestos orgánicos complejos
- Se debe considerar la generación de lodo químico, en sistemas con adición de pro-

ductos químicos para la precipitación de fósforo

En la remoción biológica del fósforo, se lleva a cabo una estabilización en las zonas anaeróbicas, reduciendo la producción de SSV. Sin embargo, el fósforo almacenado incrementa el SSI

Los cálculos no consideran el crecimiento del lodo nitrificado; sin embargo, hay una pequeña contribución en sistemas donde el afluente tenga un relación NTK/DQO típica

Estos factores deben considerarse en el diseño de los sistemas.

3.5. Ejemplo sobre la generación de lodos. Método empírico

Una planta de tratamiento trata un caudal promedio de 17 600 m^3 d^{-1} de agua residual municipal. Estimar la cantidad de lodo generado en el sedimentador primario considerando una concentración de SST en el afluente del sedimentador primario de 294 mg L^{-1} y suponiendo una remoción de SST del 58 por ciento, la cual está dentro del rango que se menciona en la Tabla 3.12 (WEF, et al., 2012) y (Metcalf & Eddy, 2003). Sustituyendo los datos en la ecuación 3.26 se calcula la cantidad de lodo del sedimentador primario.

$$LP_M = \frac{Q \times SST_{afl} \times E}{1\,000} \qquad \text{Ecuación 3.26}$$

donde:

LP_M =Masa de lodo del sedimentador primario, kg día^{-1}; Q = flujo del afluente al sedimentador primario, m^3 d^{-1}; SST = sólidos suspendidos totales del afluente primario, mg L^{-1}; y E = fracción de la remoción.

$$LP_M = \frac{17\,600 \times 294 \times 0.58}{1\,000} \qquad \text{Ecuación 3.27}$$

Sustituyendo los datos en la Ecuación 3.28 se calcula la cantidad de lodo del sedimentador primario.

$$LP_M = 3\,001.152\ kg\ d^{-1} \qquad \text{Ecuación 3.28}$$

Los datos tomados para la estimación del lodo en el sedimentador primario, son los mismos que se tomaron para desarrollar las simulaciones en el software CapdetWorks para la estimación de los costos para una PTAR con un caudal promedio de 17 600 m^3 d^{-1}. (Capítulo 15) Obteniendo con el software CapdetWorks una producción de lodo de 3 008 kg d^{-1} en el sedimentador primario. Comparando este valor con el obtenido con la formula no existe una diferencia significativa entre ambos valores.

3.6. Ejemplo sobre la estimación de la producción biológica de lodo

Estimar la producción de lodo residual del sistema de lodos activados el cual será espesado y tiene las características que se mencionan en la Tabla 3.16. Con estos valores realizar el cálculo de la producción del lodo, incluyendo la producción media y máxima por día y las características de operación del sistema de lodos activados. Este ejemplo ilustra el uso de los coeficientes de rendimiento (Y) y decaimiento de las bacterias (k_d). En la Ilustración 3.8 se muestra como referencia un diagrama de flujo de una planta para el ejemplo (US, EPA, 1979). Para este ejemplo se asume que el espesador es capaz de manejar la

Ilustración 3.8 Esquema del ejemplo para determinar la cantidad de lodo, (US, EPA, 1979)

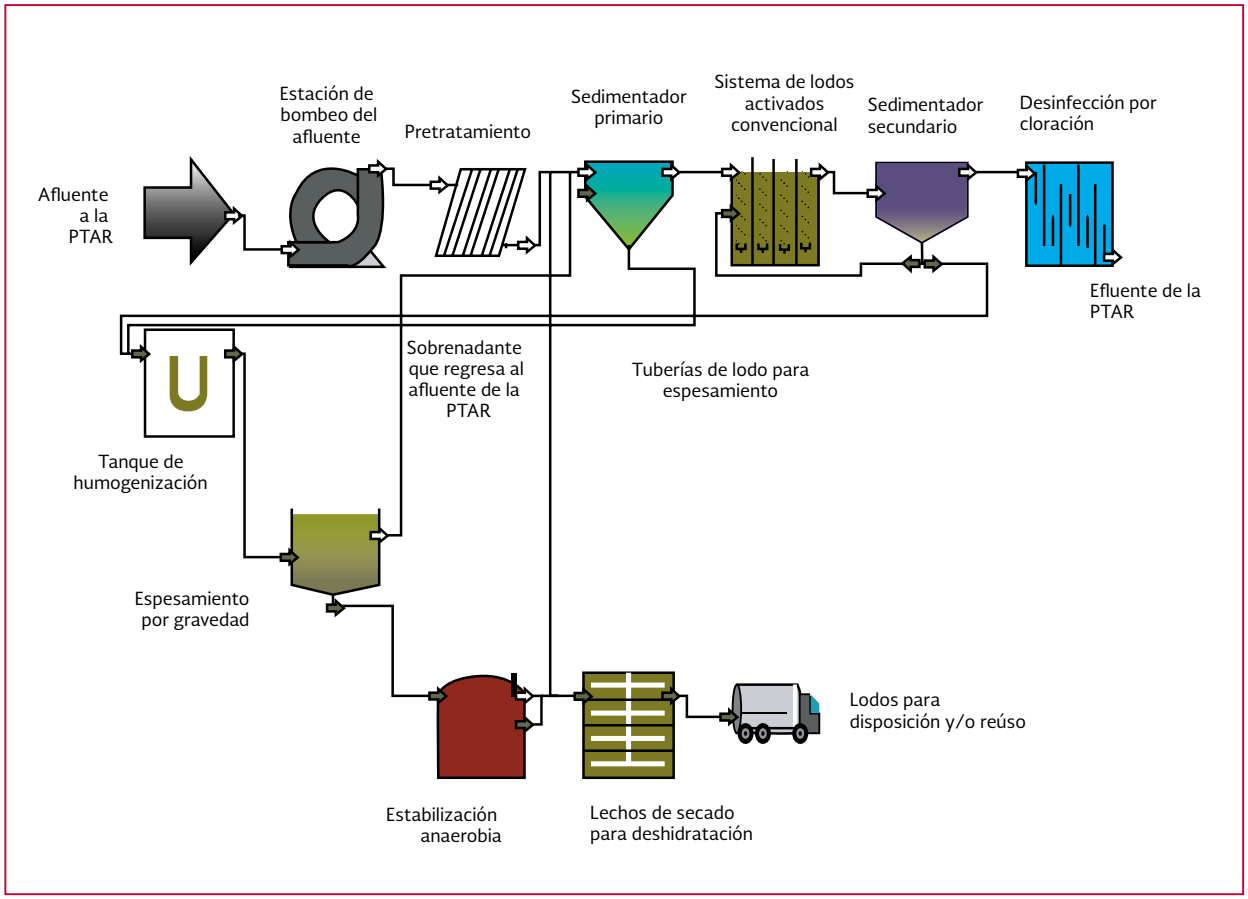


Tabla 3.16 Datos de diseño para el cálculo de la producción de lodo residual del sistema de lodos activados, (US, EPA, 1979) y (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Descripción	Valor
Flujo del afluente, $m^3\ d^{-1}$		Retención de lodo en el espesador, eficiencia, por ciento	
Promedio por día	17 500	Porcentaje Promedio	95
Máximo por día	26 100	Máximo por día	85
DBO en el afluente, $mg\ L^{-1}$		Relación alimento-microorganismo (A/M)[a]	
Promedio por día	155	Promedio	0.3
Máximo por día	155	Máximo	0.5
SS en el afluente, $mg\ L^{-1}$		Temperatura del agua residual	23
Promedio por día	124	Promedio, °C	10
Máximo por día	124	Máximo, °C	
Remoción de DBO en el sedimentador primario, por ciento		OD en el tanque de aeración	
		Promedio, $mg\ L^{-1}$	2.5
Promedio por día	32	Mínimo, $mg\ L^{-1}$	2.0
Máximo por día	32		
Remoción de SS en el sedimentador primario, por ciento		Limitaciones en el efluente, promedio de 30 días	
		DBO, $mg\ L^{-1}$	30
Promedio por día	58	Sólidos suspendidos, $mg\ L^{-1}$	30
Máximo por día	58		

[a]kg de DBO aplicados diariamente/kg de SSV del licor mezclado.

producción máxima de lodo por día. Cuando se conoce la materia orgánica biodegradable (DBO) y las fracciones no volátiles de las corrientes de recirculación deben de tomarse en cuenta para el cálculo de la eliminación de sustrato (S_r) y para el cálculo de los sólidos no volátiles en suspensión (SSF_{afl}).

1. Partiendo de la Ecuación 3.29 se calcula la producción de lodo residual del sistema de lodos activados o purga de lodos DLA. Para esto, primero se calculan las variables que integran la ecuación.

$$DLA = P_X + SSF_{afl} - SST_E$$

Ecuación 3.29

donde:

P_X = Producción biológica de sólidos, kgSSV producidos d^{-1}

SSF_{afl} = SS no volátiles que entran al proceso de lodos activados, kg d^{-1}

SST_E = SS totales en el efluente, kg d^{-1}

2. El primer cálculo será determinar P_X a partir de la Ecuación 3.30.

$$P_X = (Y \times S_r) - (k_d)(M)$$

Ecuación 3.30

donde:

Y = Coeficiente de rendimiento, kg kg^{-1}

S_r = Sustrato removido (por ejemplo, DBO), kg d^{-1}

K_d = Coeficiente de decaimiento, d^{-1}

M = Masa de los microorganismos en el sistema de lodos activados (SSV), kg

a) Calcular M para la carga máxima y promedio por día. Para ello, primero se necesita calcular la carga máxima y promedio por día en términos de DBO ($kg \cdot d^{-1}$) que se alimenta al sistema de lodos activados.

$$Carga\ de\ DBO = Q\ alimentado \times concentración\ de\ DBO \times (1 - \%\ de\ remoción\ de\ DBO)(0.000001)$$

Ecuación 3.31

donde:

Q = Caudal alimentado, $m^3\ d^{-1}$

Concentración de DBO en el afluente, mg m^{-3}

Por ciento de remoción de DBO en el sedimentador primario, fracción

El valor de 0.000001 es un factor de conversión

Partiendo de la Ecuación 3.31 y tomando los datos que se presentan en la Tabla 3.16 se determina la carga promedio por día de DBO:

$$17\,500\,m^3\ d^{-1} \times 155\,000\,mg\ m^{-3} \times (1 - 0.32)(0.000001) = 1\,844.5\,kg\ d^{-1}$$

Ecuación 3.32

Carga máxima por día de DBO:

$$26\,100\,m^3\ d^{-1} \times 155\,000\,mg\ m^{-3} \times (1 - 0.32)(0.000001) = 2\,751\,k$$

Ecuación 3.33

Una vez calculadas las cargas, se determina M que es la masa de los microorganismos, este cálculo será para la carga promedio y máxima de DBO calculadas en el paso anterior y considerando las relaciones A/M de la misma tabla.

M con la carga promedio es:

$$La\ relación \frac{A}{M}_{Promedio} = \frac{DBO\ aplicada\ por\ día}{SSV\ en\ el\ sistema} = 0.3$$

Ecuación 3.34

$$M_{Promedio} = \frac{1\,844.5}{0.3} = 6\,148.33\ kg\ SSV$$

Ecuación 3.35

M con la carga máxima es:

$$La\ relación \frac{A}{M}_{Maxima} = \frac{DBO\ aplicada\ por\ día}{SSV\ en\ el\ sistema} = 0.5$$

Ecuación 3.36

$$M_{\max ima} = \frac{2\,751}{0.3} = 9\,710\ kg\ SSV$$

Ecuación 3.37

b) El segundo paso es seleccionar Y y kd. Para condiciones promedio, se usan los siguientes datos tomados para una PTAR de aguas residuales municipales (USEPA, 1979) Y = 0.67 kg SSV formados por kg de DBO removida y k_d = 0.06 d^{-1}. Estos valores se determinan experimentalmente para cada planta de tratamiento.

Para las condiciones de carga máxima, usar la temperatura mínima de 10 °C, la cual produce el valor máximo de Y. Usando la Ecuación 3.38 se determina la $Y_{máx}$ incrementando Y en un 26 por ciento.

$$Y_{\max} = 0.67 \times 1.26 = 0.84$$

Ecuación 3.38

c) Determinar S_r, en unidades para que coincida con Y.

Para el cálculo de S_r se asume una DBO en el efluente de 10 mg L^{-1}. Para determinar Sr es necesario calcular la carga promedio y máxima diaria para el efluente. Con la Ecuación 3.31 y tomando el valor sugerido de 10 mg L^{-1} se determinan los valores de la carga en el efluente. Es la cantidad de materia orgánica que sale en el efluente por día.

La carga promedio por día de DBO en el efluente sería:

$$17\,500\ m^3\ d^{-1} \times 10\,000\ mg\ m^{-3} \times (0.000001) = 175\ kg\ d^{-1}$$

Ecuación 3.39

Carga máxima por día de DBO en el efluente sería:

$$26\,100\ m^3\ d^{-1} \times 10\,000\ mg\ m^{-3} \times (0.000001) = 261\ kg\ d^{-1}$$

Ecuación 3.40

La remoción de sustrato promedio diario es la resta de la carga de DBO promedio en el afluente menos la carga de DBO promedio en el efluente, por lo tanto:

$$S_{r\ promedio} = 1\,844 - 175 = 1\,669\ kg DBO\ removida\ d^{-1}$$

Ecuación 3.41

La remoción de sustrato máxima es la resta de la carga de DBO máxima en el afluente menos la carga de DBO máxima en el efluente, por lo tanto:

$$S_{r\,\max ima} = 2\,751 - 261 = 2\,490\ kg DBO\ removida\ d^{-1}$$

Ecuación 3.42

3. Con los valores de Y, S_r, k_d y M se determina P_X, que es la producción de lodos biológicos. Partiendo de la Ecuación 3.30.

Producción de lodos biológicos promedio diario:

$$P_{x\ promedio} = \left(0.67 \frac{kg\ SSV\ producidos}{kg\ de\ DBO\ removida}\right)\left(1\,669 \frac{kg\ de\ DBO\ removida}{dia}\right) - (0.06 d^{-1})(6\,184.33\ kg\ SSV) = 747.17\ kg\ SSV\ d^{-1}$$

Ecuación 3.43

Producción de lodos biológicos máxima diario:

$$P_{x\,Maxima} = \left(0.84 \frac{kg\ SSV\ producidos}{kg\ de\ DBO\ removida}\right)\left(1669 \frac{kg\ de\ DBO\ removida}{dia}\right) - (0.06\ d^{-1})(9170\ kg\ SSV) = 1\,541.4\ kg\ SSV\ \ d^{-1}$$

Ecuación 3.44

4. Calcular SSF_{afl} (Sólidos suspendidos no volátiles alimentados al proceso de lodos activados.

$$SSF_{afl} = Q\ alimentado\ m^3\ \ d^{-1} \times concentracion\ de\ SS\ en\ el\ influente\ mg\ \ m^{-3} \times (1 - eficiencia\ de\ remocion\ de\ SS\ en\ el\ sedimentador\ primario) \times (0.25) \times (0.000001) = \text{kg}\ \ \text{d}^{-1}$$

Ecuación 3.45

SSF_{afl} promedio por día:

$$17\,500\ m^3\ d^{-1} \times 124\,000\ mg\ m^{-3} \times (1 - 0.58) \times (0.25) \times (0.000001) = 227.85\ kg\ d^{-1}$$

Ecuación 3.46

SSF_{afl} máximo por día:

$$26\,100\ m^3\ \ d^{-1} \times 124\,000\ mg\ \ m^{-3} \times (1 - 0.58) \times (0.25) \times (0.000001) = 339.82\ kg\ \ d^{-1}$$

Ecuación 3.47

5. Calcular SST_E (Sólidos suspendidos en el efluente).

$$SST_E = Q\ alimentado\ m^3\ \ d^{-1} \times concentración\ de\ DBO\ en\ el\ efluente\ mg\ \ m^{-3} \times (0.000001) = kg\ \ d^{-1}$$

Ecuación 3.48

SST_E promedio por día:

$$17\,500\ m^3\ \ d^{-1} \times 10\,000\ mg\ \ m^{-3} \times (0.000001) = 175\ k\ \ d^{-1}$$

Ecuación 3.49

SST_E máxima por día:

$$26\,100\ m^3\ \ d^{-1} \times 10\,000\ mg\ \ m^{-3} \times (0.000001) = 261\ kg\ \ d^{-1}$$

Ecuación 3.50

6. Finalmente se calcula la producción de lodo residual de desecho o purga de lodos del sistema de lodos activados.

$$DLA = P_X + SSF_{afl} - SST_E$$

Ecuación 3.51

La producción de lodo residual promedio es:

$$DLA = 747.17 + 227.85 - 175 = 800\ kg\ \ d^{-1}$$

Ecuación 3.52

La producción de lodo residual máximo es:

$$DLA = 1\,541.4 + 339.82 - 261 = 1\,620.22\ kg\ \ d^{-1}$$

Ecuación 3.53

7. Se calcula el incremento de la producción de lodo por las cargas pico. Para ellos se toma un incremento del 2 por ciento de la masa promedio de los microorganismos.

$$0.02 \times 6\,148.33\ kg\ SSV = 123\ kg\ \ d^{-1}$$

Ecuación 3.54

Tomando un incremento de 2 por ciento por día. Los 123 kg·d^{-1} calculados por las cargas pico son mucho menores que la diferencia entre la producción máxima y promedio de lodos residuales del sistema de lodos activados. Por lo tanto, si los equipos están diseñados con la capacidad para la producción máxima de lodos, no será necesario considerar una capacidad mayor que tome en cuenta la producción de lodo debido a las cargas pico.

4

Aspectos de diseño

Este apartado presenta los pasos a seguir en un proyecto de diseño para el tratamiento de los lodos generados en un sistema de tratamiento de aguas residuales.

4.1. Fases para un proyecto de diseño

El tamaño y la compejidad del proyecto influyen en la planeación del proyecto, los procesos y los requerimientos de diseño. Los requisitos particulares de cada proyecto modifican el enfoque del diseño. Todo comienza con el plan de diseño donde se define cuidadosamente el proyecto y las actividades.

La mayoría de los proyectos de diseño de tratamiento de lodos se pueden dividir en fases y asignarse porcentajes de avance.

Fase de definición del proyecto (0-5 por ciento). En esta fase se plantea y se documenta el proyecto. El objetivo de esta fase es definir el costo del proyecto de manera efectiva dentro del presupuesto asignado. Se determina el alcance del trabajo. Se establece el diseño y una estrategia de ingeniería para la entrega del trabajo (dentro del marco general de gestión de proyectos). Se redacta el plan para el manejo del diseño. Se determinan los criterios de diseño, tales como la cantidad de lodos y las características de los mismos.

Diseño conceptual o ingeniería básica (5-30 por ciento). Para el desarrollo de esta etapa ya se han revisado las opciones y alternativas de tratamiento y se ha determinado la remoción de contaminantes (calidad de lodo requerida dependiendo del uso o disposición final). Esta etapa incluye el desarrollo de diagramas de flujo preliminares, datos de flujo, selección de criterios de diseño, arreglos generales, diagramas de tubería e instrumentación, listas de equipo, la filosofía de operación y control, materiales y descripción de las características de los materiales. Esta etapa termina con el diseño conceptual final del sistema de tratamiento y cualquier cambio al diseño se debe documentar formalmente.

Fase de desarrollo del diseño o ingeniería de detalle (30-60 por ciento). Se desarrolla el concepto seleccionado (o esquema), se define el costo y se revisa. Esta fase incluye la elaboración planos detallados (ingeniería de detalle), especificaciones, esquemas, memoria de cálculo detallada e información de los proveedores. Al final de esta fase, se termina el diseño detallado de la planta de tratamiento, es decir el definitivo.

Fase de elaboración de los documentos o diseño final (60-100 por ciento). Se preparan todos los planos, específicaciones, hojas de datos y detalles para incorporarse a la etapa de construcción. Durante esta fase, cada disciplina (civil, eléctrica, mecánica, entre otras) debe ser capaz de trabajar relativamente independiente la una de la otra y libre de distracciones del cliente mientras completan sus dibujos a detalle y la documentación relacionada para la construcción.

4.2. Selección de los procesos

La selección del tratamiento del agua y lodos residuales y los sistemas de disposición deben realizarse en forma conjunta para asegurar el uso más eficiente de los recursos, tales como el dinero, los materiales, la energía y la fuerza de trabajo, en el cumplimiento de los requisitos de tratamiento. La lógica indica cuáles deben ser los elementos del proceso y el orden en el que se deben realizar.

La metodología para seleccionar un sistema de tratamiento debe considerar el uso eficiente de los recursos, la protección del ambiente y el manejo o disposición final de todos los desechos. El mecanismo de selección más elemental es el "principio de eliminación sucesiva", es un procedimiento iterativo en el cual las opciones menos efectivas se van retirando de la lista de candidatos, hasta quedar solo los sistemas más adecuados para el sitio particular.

Criterios relevantes para la selección de un sistema de tratamiento de lodos

Los criterios para la selección del sistema se deben definir antes de hacer cualquier selección. En la Ilustración 4.1 se muestra una lista de los posibles criterios que deben considerarse. La lista no es necesariamente completa, y los planificadores pueden encontrar otros criterios que incluir.

La importancia relativa de cada criterio variará entre un sitio y otro. Por ejemplo, la confiabilidad del sistema puede ser más importante en un lugar, mientras que la minimización de costos puede ser de suma importancia en otro. Los criterios considerados relevantes para cada sitio en cuestión se utilizan posteriormente en el procedimiento de selección del sistema.

Identificación y selección de alternativas de tratamiento

Considerando los criterios que fueron seleccionados del punto anterior, se pasa a la identificación de las diferentes tecnologías disponibles para el tratamiento de lodos, considerando que los principales objetivos del tratamiento de lodos son: disminuir el contenido de agua, estabilizar el lodo, reducir el contenido de microorganismos patógenos y darle un uso o una disposición final. En la Ilustración 4.2 se muestra una matriz de las diferentes tecnologías para lograr el tratamiento de lodos.

Con esta matriz base se elaboran las diferentes alternativas de tratamiento y por eliminaciones sucesivas se van seleccionando las más convenientes para cada caso en particular. Diferentes alternativas de tratamiento de lodos se muestran en el capítulo 15. Los criterios para seleccionar estas tecnología se basan principalmente en el objetivo del tratamiento que debe estar enfocado a cumplir con la normatividad vigente y también al uso o disposición final que se le va a dar al lodo. Algunos aspectos que se deben considerar son:

Tecnología

Compatibilidad para la operación. Puede el proceso seleccionado ser operado y mantenido adecuadamente? Aquí se debe considerar el grado de capacitación que requiere el personal de operación y el presupuesto requerido para la operación y mantenimiento. La facilidad de conseguir refacciones y soporte técnico en la localidad donde se realizará el proyecto.

Ilustración 4.1 Criterios potenciales para la selección de procesos de lodos

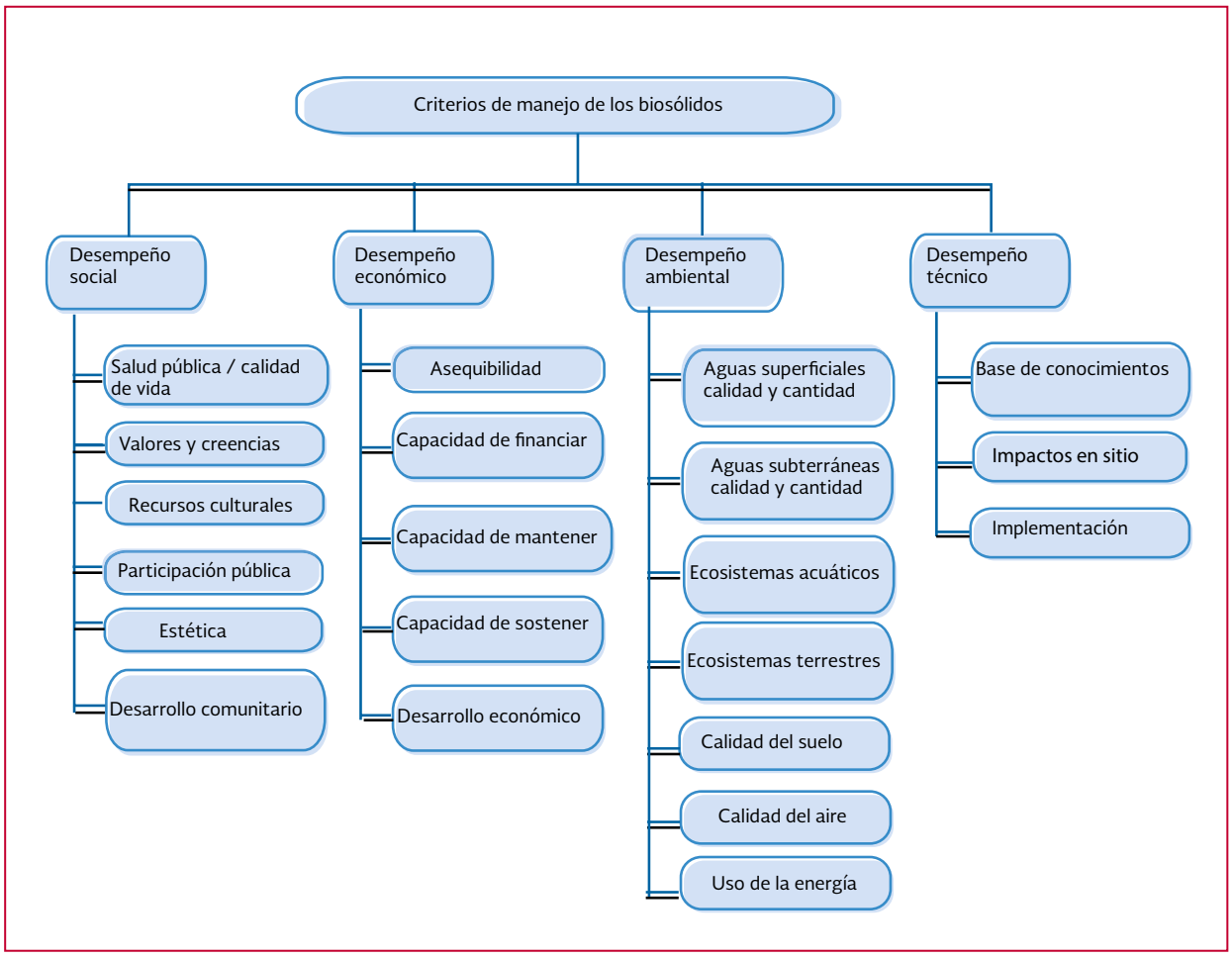
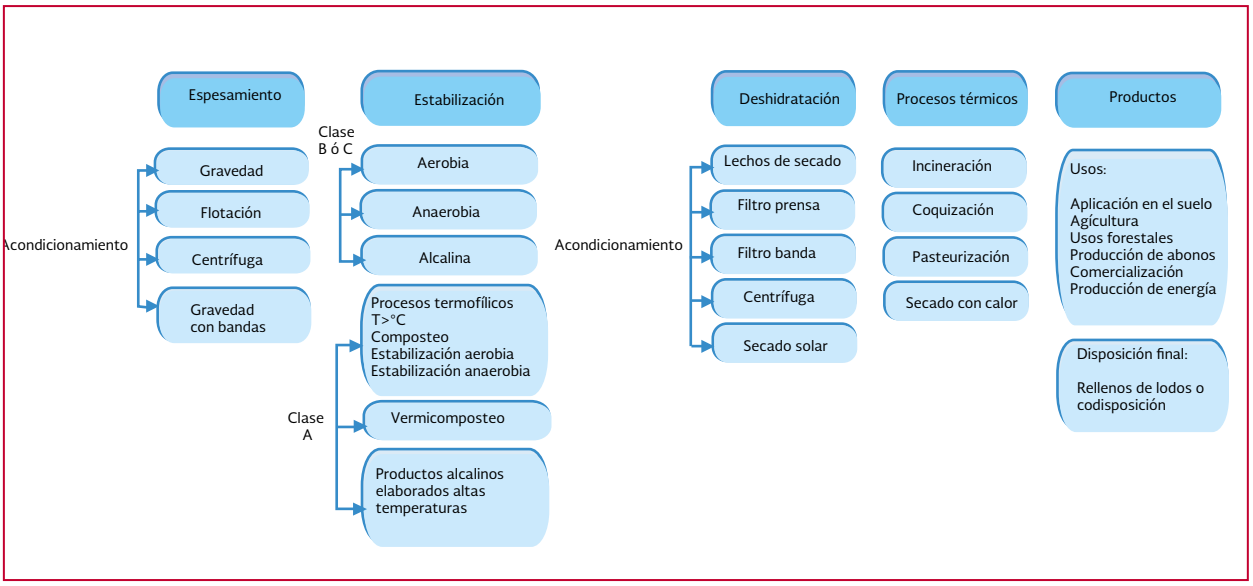


Ilustración 4.2 Tecnología para el tratamiento de lodos residuales



Remoción de contaminantes. ¿Es efectivo el proceso seleccionado para separar los desechos de las corrientes de recirculación? Considerar que esas corrientes de recirculación regresan a la planta para su tratamiento.

Efectividad. ¿Puede la tecnología seleccionada cuando se instale a escala real cumplir con la normatividad vigente?

Uso o disposición final

Sustentabilidad. Analizar si la tecnología seleccionada para el uso o disposición final puede en cualquier momento manejar todo el lodo generado en la planta de tratamiento con la calidad requerida.

Por ejemplo: Si el lodo se va a comercializar, ¿existe mercado suficiente para su venta y el tratamiento puede cumplir con la calidad requerida?

Si se va a aplicar en la agricultura, hay suficiente demanda en la región para este uso y cumple con la normatividad exigida.

Flexibilidad. ¿Existen diferentes alternativas de tratamiento que puedan dar la calidad al lodo para el uso requerido?

Una vez seleccionado el esquema o tren de tratamiento se realiza el balance de masa para estimar las cantidades de lodos y corrientes de reciclo o recirculación que se van a manejar.

4.3. Balance de masa y diagramas de flujo

En esta sección se describen los conceptos de balance de masas que son parte integral del proceso del manejo de lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales. Aunque la mayoría de los cálculos de balance de masa se llevan a cabo hoy en día por el modelado de procesos basado en computadora, se requiere un conocimiento básico de los fundamentos de balance de masas para la aplicación y revisión de los resultados de la modelación de los procesos. En la sección 4.5 se desarrolla un balance de masa con el fin de estimar las cantidades de lodos y corrientes de reciclo que deben manejarse en un esquema de tratamiento.

Los diagramas de flujo se utilizan para desarrollar modelos matemáticos de los procesos de tratamiento de aguas residuales. Los modelos se deben ejecutar bajo varios escenarios futuros de estimación de flujos de aguas residuales para proyectar las cantidades y características de los lodos y biosólidos producidos durante la vida útil de las instalaciones de tratamiento de agua residual.

Esto permite al diseñador establecer factores tales como: los costos de operación y las cantidades de lodos para la disposición final o uso. Los modelos de procesos se deben calibrar para establecer cargas de lodos que cada equipo debe ser capaz de procesar. Para dimensionar adecuadamente el equipo para el manejo de lodos, es necesario conocer los rangos proyectados de producción de lodos con las cargas mínimas y máximas y las horas de operación diaria. Por ejemplo: 8 horas al día, 5 días a la semana; 16 horas al día, 7 días a la semana; o 24 horas al día, 7 días a la semana. Dado estos tres ejemplos, es evidente que las condiciones y las horas de operación de los equipos son tan importantes como los rangos de flujo o las cargas que va a manejar cada equipo.

Especificación de las características y opciones de equipamiento.

Otros factores son importantes en la selección de la capacidad de las unidades y equipos:

- Incertidumbres. Cuando los sistemas están diseñados sin el beneficio de las pruebas a gran escala y a escala piloto, no se conocen con certeza las cantidades y características de los lodos y las eficiencias en el manejo de los sólidos en los diferentes componentes o procesos del sistema. Por lo tanto se debe considerar el grado y la significancia potencial de la incertidumbre al desarrollar el diseño. A menudo es necesario introducir un factor de seguridad en el diseño de modo que se cumpla con el rendimiento o eficiencia esperada, independiente de las condiciones encontradas en la aplicación a gran escala. La magnitud del factor de seguridad la determina el diseñador, basado en su criterio y experiencia
- Confiabilidad de los equipos. Debe especificarse una mayor capacidad o una unidad de repuesto si hay razones para creer que el tiempo en que una unidad o equipo puede salir de operación por cualquier falla, sea mayor de un día o dos. Las unidades de repuesto (en espera) se prefieren debido a que proporcionan la capacidad de respaldo cuando una unidad o equipo sale de servicio. También unidades de equipamiento múltiple permiten mayores rangos de operación bajo condiciones normales y pico
- Sensibilidad de componentes posteriores (corriente abajo). Las pérdidas en la eficiencia del procesamiento de lodos en condiciones de carga pico podría causar una sobrecarga u otros problemas para los procesos posteriores, entonces los procesos anteriores (corriente arriba) se deben diseñar de manera más conservadora. Si pasa lo contrario, si se reduce la eficiencia de la unidad o equipo anterior (aguas arriba) esta puede ser tolerada por las unidades o equipos posteriores, entonces su diseño no debe ser tan conservador

4.4. Otras consideraciones de diseño. Conservación y recuperación de energía, análisis costo-efectivo

La localización, el tamaño de las plantas de tratamiento de aguas residuales y la disposición de lodos o los sitios de disposición o aplicación, influyen fuertemente en la naturaleza y en el costo del tratamiento de los lodos y en el manejo de los sistemas como se indica a continuación.

Si los sitios de aplicación de biosólidos al suelo están cerca de la planta de tratamiento hay disminución en los costos de transporte

Los costos para energía y productos químicos pueden variar considerablemente de una región a otra. Por lo que el costo por tratamiento y manejo de los lodos y biosólidos cambia de una región a otra

Conservación y recuperación de la energía

La conservación y la recuperación de energía se han vuelto cada vez más importante ante la di-

ficultad de la explotación y el incremento de los precios de los combustibles fósiles. Por lo tanto se requiere que el diseñador considere cuando sea posible, los procesos que aprovechan la energía de los biosólidos. Los siguientes puntos podrían considerarse en el diseño de procesos energéticamente eficientes:

- La energía generada en los procesos de alta temperatura debe capturarse por medio de intercambiadores de calor o instalaciones de cogeneración y usarse para otros propósitos dentro de la instalación
- La evaporación del agua en incineradores o secadoras es de alto costo y de alto consumo de energía. Por lo tanto es más barato utilizar reactivos químicos para los procesos de deshidratación de lodos. Se debe considerar el incremento en la masa de lodos por la adición de estos ya que incrementan la cantidad de lodo para disposición final
- La energía requerida para la estabilización de los lodos se disminuye con un buen acondicionamiento o pre-tratamiento del lodo
- El buen desempeño de los reactores anaerobios trae como resultado mayor producción de biogás, el cual puede utilizarse en la producción de calor o energía eléctrica. La energía producida por el biogás de un reactor anaerobio goza de incentivos económicos, subsidios e incentivos fiscales que estimulan la inversión en fuentes de energía renovable
- Se requiere energía para la manufactura y el transporte de productos químicos. Por lo tanto se debe optimizar la adición de reactivos químicos de acuerdo a las condiciones de operación de la planta. También se recomienda buscar y probar nuevos productos que se ofrecen en el mercado con el fin identificar productos químicos alternativos que puedan ser más rentables

Listas de comprobación para el diseño

Las listas de comprobación son una herramienta para iniciar un diseño del tratamiento de lodos y pueden desarrollarse para diferentes procesos. Se incluyen dos ejemplos de listas de comprobación que un diseñador puede desarrollar.

Ejemplo 1. Algunas condiciones de operación típicas que se pueden presentar durante el tratamiento de lodos en la planta de tratamiento de aguas residuales son:

- Bombeo descoordinado del lodo a los tanques de sedimentación
- Las centrífugas para deshidratación de lodos fuera de servicio por mantenimiento
- Problemas por basura, cabello y arena en los tanques y tuberías
- Capacidad insuficiente para almacenar e lodos crudos
- Alimentación compleja y variable a los equipos de deshidratación
- Capacidad insuficiente para el almacenamiento de lodo estabilizado
- Deficiente mezcla del reactor o capacidad de transferencia de calor
- Capacidad insuficente para el almacenamiento de la torta de lodo
- Excesivo uso del polímero en el espesamiento o deshidratación
- Liberación incontrolada del polvo de cal durante las operaciones de encalado de lodos
- Generación de olores antes y después de

la etapa de deshidratación
- Recirculación excesiva de nutrientes al tratamiento
- Problemas de arranque y paro por baja carga
- Concentración variable de sólidos en la torta de lodo para alimentar a los incineradores y secadores
- Liberación de polvo en los intercambiadores de calor, en los procesos de encalado o en el manejo de cenizas del incinerador.
- Fallas estructurales que llevan a abandonar o demoler los tanques
- Mala operación del proceso por falta de mantenimiento

Ejemplo 2. Condiciones típicas que pueden estar relacionadas con problemas de tratamiento de lodo durante el transporte y en los sitios de aprovechamiento y disposición final.

- Problemas en los lugares de disposición (rellenos de lodo) o aplicación en suelo que no permiten sacar el lodo de la planta
- Problemas para la aplicación del lodo al suelo por malas condiciones climáticas
- Generación y liberación de olores de los sitios de almacenamiento de lodo
- Generación de olor durante y después de la aplicación del lodo al suelo
- Necesidad de transportar el lodo dentro de la ciudad para llevarlo a otras instalaciones
- Emisión de cenizas volátiles, compuestos orgánicos volátiles y contaminantes peligrosos en el incinerador
- Producción de olores y polvo en las instalaciones de estabilización alcalina (encalado)
- Falta de mercado para los biosólidos

4.5. Ejemplo de balance de masa

El balance de masa se utiliza para estimar el flujo y las características de las diferentes corrientes que entran y salen de una unidad de tratamiento y permiten el diseño de los procesos de espesamiento, deshidratación y estabilización de lodos.

El balance de masa es un proceso iterativo, la primera iteración estima la concentración y el flujo de las corrientes de reciclo o recirculación. Si en la segunda iteración los resultados difieren en más del 5 por ciento de la primera; se debe hacer una tercera. Lo más fácil es preparar una hoja de cálculo con las fórmulas requeridas para realizar el balance.

En este ejemplo se ilustrará un balance de masa para los lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales municipales con el siguiente tren de tratamiento: Pretratamiento, sedimentador primario, proceso convencional de lodos activados, sedimentador secundario y desinfección con luz ultravioleta. El tratamiento de lodos incluirá: Espesamiento del desecho de lodos activados (purga de lodos activados) en un espesador por gravedad de bandas, estabilización del lodo primario y secundario en un reactor anaerobio de mezcla completa y deshidratación en un filtro de bandas. Durante el tratamiento de lodos se generan tres corrientes de reciclo o recirculación que regresan a la entrada de la planta de tratamiento y aportan flujo, materia orgánica y sólidos que deben considerarse en el diseño. Estas corrientes son: Los sobrenadantes del espesador de bandas, del reactor anaerobio y del deshidratador de bandas. En la Ilustración 4.3 se muestra el diagrama de flujo de la planta. En la Tabla 4.1 se encuentran las características más importantes del agua residual y de los lodos.

Ilustración 4.3 Diagrama de flujo de la planta

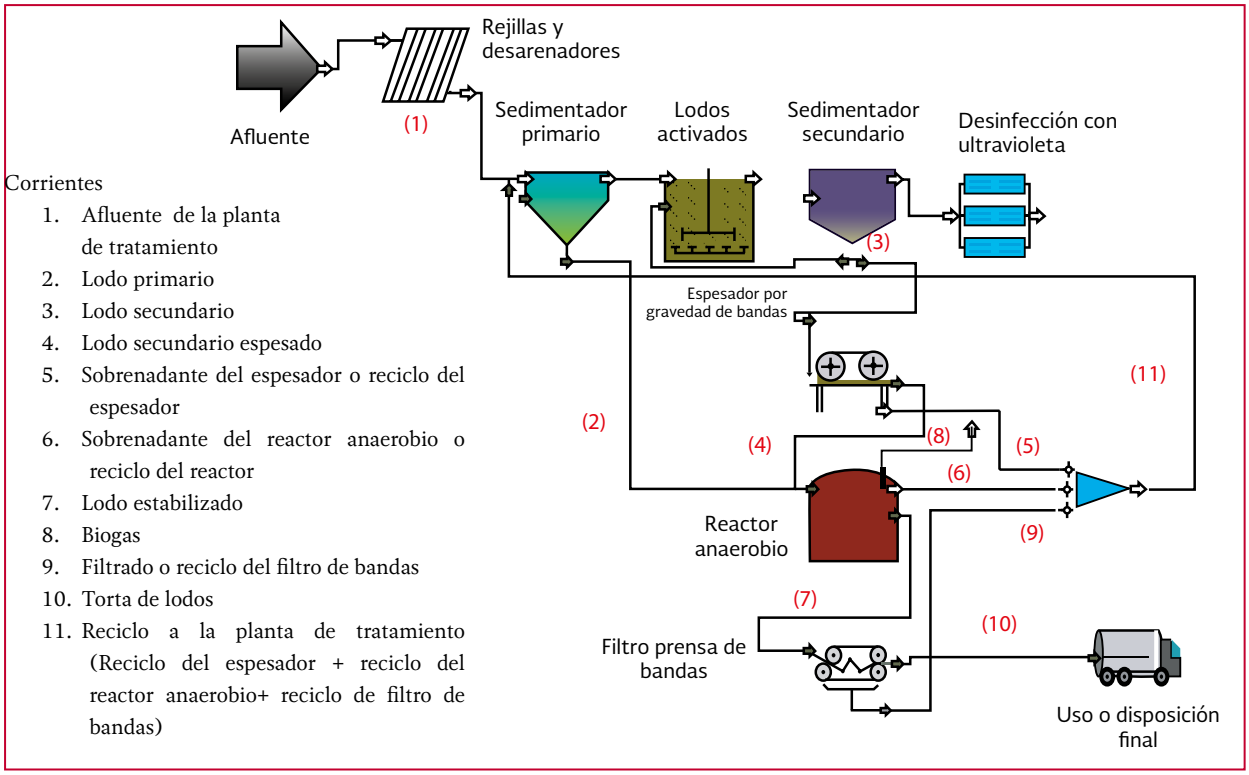


Tabla 4.1 Características del agua residual y lodos residuales (WEF et al., 2010)

Parámetro	Cantidad
Q ($m^3\ d^{-1}$)	90 850
QP ($m^3\ d^{-1}$)	227 125
Afluente	
DBO ($mg\ L^{-1}$)	300
SST ($mg\ L^{-1}$)	335
SST después del desarenador ($mg\ L^{-1}$)	286
Características de los lodos	
Lodo primario	4.8 por ciento ST
Purga de Lodo activado después de espesamiento	5.5 por ciento ST
Lodo estabilizado en reactor anaerobio	5.3 por ciento ST
Gravedad específica	1
Fracción biodegradable del lodo activado	65 por ciento
Características del efluente	
DBO ($mg\ L^{-1}$)	10
SST ($mg\ L^{-1}$)	14
DBO última	1.42 $g\ g^{-1}$
QP= caudal pico, SST= sólidos suspendidos totales	

Paso 1: Se determina la masa de DBO y SST en el afluente.

$$Masa(kg\ d^{-1}) = \frac{Concentración(g\ m^{-3}) \times Q(m^3\ \ d^{-1})}{1\,000\ g\ \ m^{-3}}$$

Ecuación 4.1

Aplicando la Ecuación 4.1 para cada parámetro se obtiene.

Tabla 4.2 Masa del afluente

Parámetro	kg d^{-1}
DBO	27 255
SST	30 435
SST después del desarenado	25 983

Paso 2: Se determina la DBO soluble en el efluente.

Tomando en cuenta las características del lodo se tiene:

a) Porción biodegradable =(SST efluente × 0.65)
b) DBO última =(Porción biodegradable × 1.42)
c) DBO de los SST del efluente = (0.68 × DBO última)
d) DBO soluble del efluente =(DBO efluente – DBO de SST del efluente)

Tabla 4.3 DBO soluble en el efluente

Parámetro	g m^{-3}
DBO de los SST= 14 × 0.65	9.1
DBO última = 9.1 × 1.42	12.9
DBO de los SST = 0.68 × 12.9	8.8
DBO soluble en el efluente = 9.1-8.8	1.2

Paso 3: Primera iteración

Balance en el sedimentador primario.

Para realizar el balance en el sedimentador primario se considera que en éste se remueve el 33 por ciento de la DBO y el 70 por ciento de los SST que trae el agua residual después de pasar por el pretratamiento que incluye cribado y desarenado.

Consideraciones:

a) Se remueven 33 por ciento de DBO y 70 por ciento de SST
b) Calcular la masa de DBO y de SST que se remueven en el sedimentador primario y la masa de DBO y los SST que entrarán al bioreactor

$$Masa(kg\ d^{-1}) = \frac{Concentración(g\ m^{-3}) \times Q(m^3\ d^{-1})}{1\,000\ g\ \ m^{-3}}$$

Ecuación 4.2

c) Calcular la concentración de DBO en el efluente del sedimentador primario
d) Calcular la fracción volátil de los lodos primarios

Tabla 4.4 Sedimentador primario

DBO removida = 27 255 × 0.33 = 8 994 kg d^{-1}
DBO al bioreactor = 27 255-8 994 = 18 261 kg d^{-1}
SST removidos = 25 983 × 0.7 = 18 188 kg d^{-1}
SST al bioreactor = 25 983 – 18 188 = 7 795 kg d^{-1}
DBO del efluente del sedimentador primario

$$c = \frac{m}{Q} = \frac{18\,261\ kg\ \ d^{-1}}{90\,850\,m^3\ \ d^{-1}} \times 100\ kg^{-1} = 200\ \ g\ m^{-3}$$

Tabla 4.5 Fracción volátil de los lodos primarios

Fracción volátil de los SST del afluente	0.67
Fracción volátil de la arena	0.1
Fracción volátil de SST al reactor biológico	0.85
SSV en el afluente = 30 435 × 0.67	20 391 kg d^{-1}
SSV removidos en el desarenador = (30 435 - 25 983) × 0.1=	445 kg d^{-1}
SSV en el afluente al reactor = 7 795 × 0.85 =	6 626 kg d^{-1}
SSV en el lodo primario = 20 391 - 445 - 6 626	13 320
Fracción volátil del lodo primario =	$\frac{13\,320}{18\,188}$ =0.73

Balance en el reactor biológico y sedimentador secundario

a) Estime los parámetros de operación, sólidos suspendidos del licor mezclado (SSLM),$Y_{observado}$. Ver tabla 4.6, parámetros de operación del reactor de lodos activados
b) Calcule la masa de DBO y SST del efluente

Tabla 4.6 Parámetros de operación del reactor de lodos activados

SSLM	3 500 mg L^{-1}
Fracción volátil	0.8
$Y_{observado}$	0.3125
*SSVLM	2 800 mg L^{-1}
*Sólidos suspendidos volátiles del licor mezclado	

Tabla 4.7 Masa de DBO y SST en el efluente

$$DBO = \frac{90\,850\ m^3\ d^{-1} \times 10\ g\ m^{-3}}{1\,000\ g\ kg^{-1}} = 908\ kg\ d^{-1}$$

$$SST = \frac{90\,850\ m^3\ d^{-1} \times 14\ g\ m^{-3}}{1000\ g\ kg^{-1}} = 1\,272\ kg\ d^{-1}$$

a) Estime la cantidad de SST producidos en el proceso biológico
b) $SST_{producidos}$ = [Yobs × (Q × (So - S) × 8.34]. So = DBO del influente al sedimentador primario, S= DBO soluble en el efluente final
c) Estime la cantidad de lodo de desecho, considerando una concentración de sólidos vol del 80 por ciento
d) Estime la masa de lodo de desecho (lodo residual o purga de lodo)
e) Estime el flujo del lodo de desecho. El cálculo se realiza igual al (ejemplo 3.6)

Tabla 4.8 Lodo secundario de desecho o purga de lodo del sedimentador secundario

SST producidos en el proceso biológico	5 400 kg d^{-1}
SSV desechados	6 750 kg d^{-1}
Sólidos fijos (por diferencia)	1 350 kg d^{-1}
Lodo secundario de desecho (DLA)	5 478 kg d^{-1}
Flujo de lodo	1 565 m^3 d^{-1}

Balance en el espesador de bandas por gravedad

a) Se determinan los parámetros de operación del espesador. Al espesador sólo ingresa el lodo secundario

Tabla 4.9 Parámetros de operación del espesador de bandas

por ciento de sólidos en el lodo espesado	4.8
por ciento de sólidos recuperados	92
por ciento gravedad específica	1

b) Se determina el flujo que sale del espesador

$$Flujo\ del\ espesador = \frac{Lodo\ de\ sechado \times 0.92}{1\,000 \times 0.048}$$

$$Flujo\ del\ espesador = \frac{5\,478\ kg\ d^{-1} \times 0.92}{1\,000\ kg\ m^{-3} \times 0.048}$$

$$= 105\ m^3\ d^{-1}$$

c) Se calcula el flujo de reciclo o sobrenadante del espesador

Para calcular el flujo de reciclo se consideran los siguientes pasos:

1. Flujo de reciclo = (Flujo de lodo residual-Flujo de lodo espesado)
2. Calcular la cantidad de SST al reactor anaerobio

$$Masa = Masa\ de\ DLA \times 0.92$$

3. Calcular la masa de SST en el reciclo = (Masa de DLA - Masa del digestor)
4. Calcular la concentración de SST en el reciclo = (Masa de DLA- Masa del digestor)

$$\frac{Masa\ SST \times 1\,000\ g\ kg^{-1}}{Flujo\ de\ reciclo}$$

5. Determinar la concentración de DBO de los SST.

$$DBO = SST \times 0.65 \times 1.42 \times 0.68$$

6. Calcular la masa de DBO en el reciclo.

$$DBO = \frac{Concentracion \times Flujo\ de\ reciclo}{1\,000\ g\ kg^{-1}}$$

Tabla 4.10 Flujo y características del sobrenadante o reciclo del espesador

Flujo de reciclo = 1 561-105 = 1 460 $m^3\ d^{-1}$

Masa de SST al reactor anaerobio = 5 478 × 0.92 =5 040

Masa de SST en el reciclo = 5 478-5 040 = 438 kg d^{-1}

Concentración de SST en el reciclo =

$$\frac{438\ kg\ \ d^{-1} \times 1\,000\ g\ kg^{-1}}{1\,460\ m^3\ d^{-1}} = 300\ g\ m^{-3}$$

DBO de los SST = 300 g·m^{-3} x 0.65 x 1.42 x 0.68 = 188 g·m^{-3}

Masa de DBO en el reciclo =

$$\frac{188\ g\ m^{-3} \times 1\,460\ m^3\ d^{-1}}{1\,000\ g\ kg^{-1}} = 275\ kg\ d^{-1}$$

Balance en el reactor anaerobio

a) Parámetros de operación

Tabla 4.11 Parámetros de operación del reactor anaerobio

Destrucción de SSV	47 %
Producción de gas	0.9 $m^3\ kg^{-1}$ SSV destruídos
DBO en el sobrenadante del reactor	1 000 mg L^{-1}
SST en el sobrenadante del reactor	5 000 mg L^{-1}
Concentración de SST en lodo estabilizado	5 por ciento

b) Determinar el flujo y sólidos que llegan al reactor anaerobio
c) Masa de SST = Masa de lodos primarios + lodos del espesador
d) Calcular masa de SST al reactor (suponer 80 por ciento de SSV para el lodo secundario)
e) Calcular SSV en la mezcla alimentada al reactor y la destrucción de SSV. (Suponer 50 por ciento de destrucción)
f) Calcular el flujo másico de lodos primarios al digestor (4.8 por ciento sólidos)
g) Calcular el flujo másico de lodos espesados al digestor
h) Calcular el flujo másico total
i) Calcular por diferencia los sólidos fijos
j) Calcular la masa de SST en los lodos estabilizados
k) Calcular la producción de gas

Tabla 4.12 Balance de masa en el reactor anaerobio

Masa de SST al reactor = 18 188 + 5 040 = 23 228 kg d^{-1}

Flujo total al reactor = 366 + 105 = 471 $m^3\ d^{-1}$

Masa de SSV alimentada al reactor = 13 320 + 5 040 (0.8) = 17 352 kg d^{-1}

por ciento SSV alimentados al reactor =

$$\frac{17\ 352}{23\ 228} = 74.7\,\%$$

SSV destruidos = 17 352(0.5) = 8 676 kg d^{-1}

Flujo másico de lodos primarios al digestor =

$$\frac{18\ 188}{0.048} = 378\,920\ kg\ d^{-1}$$

Flujo másico de lodo secundario espesado =

$$\frac{5\,040}{0.055} = 91\,632$$

Flujo másico total = 378 920 + 91 632 = 470 532 kg d^{-1}

Sólidos fijos = 23 228-17 352 = 5 876 kg d^{-1}

Masa de SST en el lodo estabilizado =23 228-8 676 =14 552 kg d^{-1}

Producción de biogás 8 156 kg d^{-1} x 0.9 $m^3\ kg^{-1}$= 7 340 $m^3\ d^{-1}$ para una destrucción de SSV del 47 por ciento

Balance de masa alrededor del reactor anaerobio

Tabla 4.13 Balance de masa alrededor del reactor

Masa de entrada	470 552 kg d^{-1}
Biogás	7 340 kg d^{-1}
Masa de salida	463 212 kg d^{-1}

Caudal del sobrenadante o reciclo del digestor anaerobio y lodo estabilizado

Para calcular el flujo de sobrenadante y del lodo estabilizado se siguen los siguientes pasos:

a) Cálculo del sobrenadante o reciclo del digestor anaerobio

$$Masa\ de\ salida = \frac{\left(\frac{S}{Conc.sobrenadante}\right) + (Masa\ total\ de\ lodos\ estabilizados - S)}{Sólidos\ en\ lodo}$$

Ecuación 4.3

S = sobrenadante

b) Calcular la masa de lodo estabilizado masa = (masa de SST en lodo estabilizado-S)

c) Calcular el flujo de sobrenadante

$$Flujo = \frac{S}{(Conc.\ de\ solidos\ sobrenadante\ (\%) \times 1\ 000\ kg\ \ m^{-3})}$$

d) Calcular el flujo de lodo

$$F = \frac{masa\ de\ lodo\ estabilizado}{(\%\ sólidos \times 1\ 000\ kg\ \ m^{-3})}$$

Tabla 4.14 Flujo del sobrenadante del reactor anaerobio y lodo estabilizado anaerobio

Concentración de sólidos en el sobrenadante 0.5 por ciento
SST en lodo estabilizado 5 por ciento
S = Masa de sobrenadante = 957 kg d^{-1}
Flujo de sobrenadante = $\frac{957\ kg\ \ d^{-1}}{0.005 \times 1\ 000\ kg\ \ m^{-3}} = 191\ m^3\ \ d^{-1}$
Lodos estabilizados = 14 552-957 = 13 595 kg d^{-1}
Flujo de lodo estabilizado = $\frac{13\ 595\ kg\ \ d^{-1}}{0.05 \times 1\ 000\ kg\ \ m^{-3}} = 272\ m^3\ \ d^{-1}$

Cálculo de DBO y SST en el flujo del sobrenadante.

e) Se determina la DBO del sobrenadante

$$DBO\ sobrenadante = 1\ 000\ g\ m^{-3}$$

$$DBO = \left(\frac{Flujo\ de\ sobrenadante \times 1\ 000\ g\ \ m^{-3}}{1\ 000\ \ g\ \ kg^{-1}}\right)$$

$$DBO = \frac{191\ m^3\ d^{-1} \times 1\ 000}{1\ 000} = 191\ kg\ \ d^{-1}$$

f) Se determina los SST en el sobrenadante

$$SST = \frac{Flujo\ de\ sobrenadante \times 5\ 000\ g\ \ m^{-3}}{1\ 000\ g\ \ kg^{-1}}$$

$$SST = \frac{191\ m^3\ \ d^{-1} \times 5\ 000\ g\ \ m^{-3}}{1\ 000\ g\ \ kg^{-1}}$$

$$SST = 995\ kg\ \ d^{-1}$$

Tabla 4.15 Masa de DBO y SST en el sobrenadante del digestor anaerobio

DBO = 191 kg d^{-1}
SST = 955 kg d^{-1}

Balance de masa en el filtro de bandas o deshidratador

a) Características establecidas en la deshidratación

Tabla 4.16 Características del deshidratador de bandas

Porcentaje de sólidos en la torta de lodo	22 por ciento
Gravedad específica	1.06
Captura de sólidos	96 por ciento
Concentración de DBO en el filtrado	2 000 kg m^3

b) Características del lodo deshidratado

Lodos = Lodos estabilizados × por ciento captura

Lodos = 13 595 × 0.96 = 13 051 kg d^{-1}

$$Volumen\ de\ lodos = \frac{Solido\ en\ la\ torta}{gravedad\ especifica \times \%\ solidos\ \times 1\ 000}$$

Ecuación 4.4

$$Volumen\ de\ lodos = \frac{13\ 051\ kg\ \ d^{-1}}{1.06 \times 0.22 \times 1\ 000}$$

$$Volumen\ de\ lodos = 56.0\ m^3\ d^{-1}$$

Tabla 4.17 Lodo deshidratado o torta de lodos

V= 56 m^3 d^{-1}
Masa de lodo = 13 051 kg d^{-1}

c) Características del filtrado o reciclo del filtro de bandas
   - Flujo del filtrado = (Lodo estabilizado - Volumen torta de lodo)
   - Flujo filtrado = 272-56 =216 $m^3\ d^{-1}$

Masa de DBO en el filtrado

$$Masa\ de\ DBO = \frac{Conc.DBO\ filtrado \times Flujo}{1\,000}$$

$$Masa\ de\ DBO = \frac{2\,000\,kg\ m^{-3} \times 216\,m^3\ d^{-1}}{1\,000\ g\ kg^{-1}}$$

$$Masa\ de\ DBO = 432\,kg\ d^{-1}$$

Ecuación 4.5

Masa de SST en el filtrado

Masa de SST = Masa de lodo estabilizado × por ciento no capturado

Masa de SST = 13 051 × 0.04 = 564 kg d^{-1}

Tabla 4.18 Características del filtrado o reciclo del filtro de bandas

Flujo = 223 $m^3\ d^{-1}$
Masa de DBO = 446 kg d^{-1}
Masa de SST = 522 kg d^{-1}

Suma de los flujos de reciclo

Flujo total de reciclo =(Sobrenadante espesador + sobrenadante del reactor anaerobio + filtrado del filtro de bandas)

Flujo total de reciclo = (1 460 + 191 +216) = 1 867 $m^3\ d^{-1}$

Masa total de SST en el flujo de reciclo =(438 + 955 + 522) = 1 915 kg d^{-1}

Masa total de DBO en el flujo de reciclo = (275 + 191 + 432) = 898 kg d^{-1}

Tabla 4.19 Flujos de reciclo a la planta de tratamiento

Flujos de reciclo =	1 867 $m^3\ d^{-1}$
Masa de SST =	1 915 kg d^{-1}
Masa de DBO =	898 kg d^{-1}

Paso 4. Segunda iteración.

Se calcula con base en los resultados de la primera iteración, y considerando las nuevas cantidades de DBO y SST de los reciclos .

Cálculo de la nueva concentración de masa de DBO y SST al sedimentador primario.

- Nueva masa de SST al sedimentador primario
- Masa SST = SST afluente + SST reciclo
- Nueva masa de DBO al sedimentador primario
- Masa DBO = DBO afluente + DBO reciclo
- Calcular remoción de DBO (33 por ciento de remoción)
- Calcular remoción de SST (70 por ciento de remoción)

Tabla 4.20 Nuevos flujos másicos al sedimentador primario

SST al sedimentador primario = Afluente + reciclo = 27 919 kg d^{-1}
DBO al sedimentador primario = Afluente + reciclo = 28 153 kg d^{-1}
DBO removida = 9 290 kg d^{-1}
DBO al biorreactor = 18 862 kg d^{-1}
SST removidos = 19 543 kg d^{-1}
SST al biorreactor = 8 376 kg d^{-1}

Proceso secundario (Reactor de lodos activados y sedimentador secundario)

Cálculos:

a) Calcular el volumen del biorreactor considerando la relación A/M y la concentración de SSVLM original
b) Establecer el TRS (tiempo de retención de sólidos)

c) Calcular nuevo flujo = flujo afluente + flujo de reciclo

d) Calcular nueva concentración de DBO al biorreactor

$$DBO = \frac{masa\ DBO\ al\ biorreactor(\ kg\ d^{-1}) \times 100(}{Flujo(m^3\ d^{-1}\ )}$$

Ecuación 4.6

e) Calcular nueva concentración de SSVLM

$$SSVLM = \frac{\left[\frac{TRS \times Q}{V}\right] \times [\ Y \times (\ So - S)]}{[1 + (kd \times TRS)]}$$

Ecuación 4.7

f) Calcule los SSLM considerando que los SSVLM son el 80 por ciento

g) Calcule el nuevo crecimiento celular

$$Nuevas\ Celulas = [Q\ x\ Y_{observado} \times (So - S)]/1\ 000$$

Ecuación 4.8

h) Calcule la masa de SST
Masa de SST = SSLM + nuevas células

i) Calcule la masa de lodos activados desechados al espesador (purga de lodos)
Masa DLA=(Masa de SST - Masa SST efluente)

j) Calcule el flujo de DLA (lodos activados residuales o desechados o purga del sedimentador secundario)

$$Flujo\ DLA = \frac{(masa\ DLA \times 1\ 000)}{SSLM}$$

Ecuación 4.9

Tabla 4.21 Características del proceso secundario (lodos activados y sedimentador secundario)

A/M	0.35
Volumen en el bioreactor	18 559 m^3
TRS	10 días
Y	0.5
Kd	0.06
Flujo	92 717 $m^3\ d^{-1}$
Conc. de DBO	203 $g\ m^{-3}$
Nueva conc. SSVLM	3 044 $g\ m^{-3}$
SSLM	3 805 $g\ m^{-3}$
Masa de nuevas células	5 649
Masa de SST	7 062 $kg\ d^{-1}$
Lodo activado (DLA) a espesamiento	5 790 $kg\ d^{-1}$
Flujo	1 522 $kg\ d^{-1}$

Espesador de gravedad de bandas.

a) Determine el flujo del espesador

$$Flujo\ al\ espesador = \frac{(masa\ de\ DLA \times 0.92)}{1\ 000\ \times 0.048}$$

b) Determinar el flujo de reciclo

- Flujo de reciclo =(Flujo DLA - Flujo de lodo espesado)
- Calcule masa de SST al reactor anaerobio
- Masa de SST al reactor =(Masa de DLA × 0.92)
- Calcule masa de SST en el afluente
- Masa SST en afluente = (Masa de DLA-Masa al reactor anaerobio)
- Calcule la concentración de SST en el reciclo
- Conc SST =(Masa de SST × 1 000 $g\ kg^{-1}$)
- Determine la concentración. de DBO en los SST
- DBO =(SST × 0.65 × 0.42 × 0.68)

- Calcule la masa de DBO en el reciclo del espesador

$$Masa\ de\ DBO\ reciclo = \frac{(Conc.DBO \times Flujo)}{(1\,000\ g\ kg^{-1})}$$

Tabla 4.22 Balance en el espesador de bandas

Flujo del espesador	111 $m^3\ d^{-1}$
Flujo de reciclo	1 411 $m^3\ d^{-1}$
SST al reactor anaerobio	5 327 kg d^{-1}
Reciclo de SST a planta	463 kg d^{-1}
Conc. de SST	328 g m^{-3}
Conc. DBO en los SST	206 g m^{-3}
Masa de DBO	291 kg d^{-1}

Reactor anaerobio

a) Condiciones de operación

Tabla 4.23 Parámetros de operación del reactor anaerobio

TRS	10 días
Destrucción SSV	47 por ciento
Producción de gas	0.9 $m^3\ kg^{-1}$ SSV destruidos
DBO en sobrenadante del reactor	1 000 g m^{-3}
SST en sobrenadante del reactor	5 000 g m^{-3}
Conc. SST en lodo estabilizado	5 por ciento

b) Determine los lodos y el flujo alimentado al reactor anaerobio

c) Determine la masa de SST
Masa de SST =(Masa lodo primario + Masa de lodo secundario que sale del espesador)

d) Calcule masa SSV al digestor, considerando 80 por ciento de volátiles

e) Calcule SSV en la mezcla al reactor y calcule SSV destruidos

f) Calcule masa de lodo primario al reactor (48 por ciento de sólidos)

g) Calcule la masa de lodo secundario espesado al reactor anaerobio

h) Calcule el flujo másico total

i) Calcule por diferencia los sólidos fijos

j) Calcule la masa de SST en el lodo estabilizado

k) Calcule la producción de gas

Tabla 4.24 Operación del reactor anaerobio

Masa de SST, primario + lodo espesado	24 872 kg d^{-1}
Flujo Total	459 $m^3\ d^{-1}$
Masa de SSV alimentados al reactor	17 552 kg d^{-1}
por ciento de la masa de SSV alimentados al reactor	71 por ciento
SSV destruidos	8 249 kg d^{-1}
Flujo másico del sedimentador primario al digestor	407 191 kg d^{-1}
Flujo másico del lodo secundario espesado	96 848 kg d^{-1}
Flujo másico total	504 039 kg d^{-1}
Sólidos fijos	7 320 kg d^{-1}
Masa de SST en los lodos estabilizados	16 096 kg d^{-1}
Gas producido	10 177 kg d^{-1}

Tabla 4.25 Balance de masa alrededor del reactor anaerobio.

Masa que entra	504 039 kg d^{-1}
Menos el gas	10 177 kg d^{-1}
Masa que sale	493 861 kg d^{-1}

Distribución de flujo de sobrenadante y lodos estabilizados.

a) Con la ecuación 4.10 y 4.11 se calcula la masa de sobrenadante

$$Masa\ que\ sale = \frac{\left(\frac{S}{Conc.sobrenante}\right) + (Masa\ total\ en\ el\ lodo\ estabilizado - S)}{Solidos\ en\ lodo}$$

Ecuación 4.10

b) Calcule la masa de lodos estabilizados
Masa de lodos estabilizados =(SST en lodos estabilizados - S)

c) Calcule el flujo de sobrenadante

$$Flujo = \frac{S}{Conc.\ solidos\ en\ sobrenadante\,(\%) \times 1\,000\,kg\ m^{-3}}$$

Ecuación 4.11

d) Calcule el flujo de lodos

$$Flujo = \frac{Masa\ de\ lodo\ estabilizados}{\%\ solidos \times 1\,000\ kg\ m^{-3}}$$

Tabla 4.26 Características del sobrenadante y de los lodos estabilizados

Sobrenadante	0.5 por ciento
Sólidos	5.0 por ciento
Sobrenadante	955 kg d^{-1}
Lodos estabilizados	15 141 kg d^{-1}
Flujo de sobrenadante	191 m^3 d^{-1}
Flujo de lodos estabilizados	303 m^3 d^{-1}

e) Determine la DBO y los SST en flujo del sobrenadante

$$DBO = \frac{(Flujo\ de\ sobrenadante \times 1\,000\,g\ \ m^{-3})}{1\,000 g\ \ kg^{-1}}$$

$$SST = \frac{(Flujo\ de\ sobrenadante \times 5\,000\,g\ \ m^{-3})}{1\,000\,g\ \ kg^{-1}}$$

Tabla 4.27 DBO y SST en el sobrenadante

DBO	**191 kg d^{-1}**
SST	**955 kg d^{-1}**

Lodo deshidratado

a) Características de la deshidratación

Tabla 4.28 Características de la deshidratación

Porcentaje de sólidos en la torta	22 por ciento
Gravedad específica	1.06
Captura de sólidos	96 por ciento
Conc. de DBO en el filtrado	2 000 mg L^{-1}

b) Determine características del filtrado y de la torta de lodos.

c) Lodo recirculado = (Lodos estabilizados x por ciento captura de lodos)

$$Volumen = \frac{Lodo\ recirculado}{(Gravedad\ especifica \times \%\ solidos\ en\ torta \times 1\,000)}$$

Ecuación 4.12

d) Características del lodo deshidratado

Tabla 4.29 Lodo deshidratado

Lodo deshidratado o torta de lodos 14 535 kg d^{-1} Volumen = 62.3 m^3 d^{-1}

e) Características del filtrado

Flujo = (Flujo de lodo estabilizado-Volumen torta de lodos)

$$DBO\ masa\ del\ filtrado = \frac{(Conc.DBO\ filtrado \times Flujo)}{1\,000}$$

Ecuación 4.13

SST masa del filtrado =)lodos estabilizados × por ciento no capturado)

Tabla 4.30 Características del filtrado

Flujo	240 m^3 d^{-1}
Masa de DBO	481 kg d^{-1}
Masa de SST	606 kg d^{-1}

Resumen de flujos de reciclo.

Tabla 4.31 Resumen de flujos y características del reciclo

	1ª Iteración	2ª Iteración	% Diferencia
Flujo de reciclo	1 867	1 842	1 %
SST en el reciclo	1 915	2 024	-4 %
DBO en el reciclo	898	963	-7 %

Los resultados del balance en la primera y segunda iteración muestran que el flujo y la concentración de SST en la corriente de reciclo no difieren en más de 5 por ciento. Se pueden aceptar estas corrientes para el diseño de la planta de tratamiento. La concentración de DBO superó el límite establecido de 5 por ciento, se puede aceptar esta concentración o realizar una tercera iteración con el fin de calcular la concentración de la DBO en el reciclo a la planta de tratamiento para que no supere el 5 por ciento de variación recomendado.

5

Transporte de Lodos

5.1. Introducción

En las plantas de tratamiento de aguas residuales durante su proceso, en las fases primaria, secundaria y terciaria se generan lodos residuales. Su tratamiento se realiza mediante una combinación de procesos físicos, químicos y biológicos. En la fase primaria, se separan sólidos suspendidos, basura arrastrada por el flujo del agua y arena. Contienen sustancias contaminantes y peligrosas para la salud, por ese motivo deben tratarse. Los lodos extraídos de los procesos de tratamiento de las aguas residuales domésticas e industriales tienen un contenido en sólidos que varía entre el 0.25 y el 12 por ciento en peso. Los requerimientos típicos de bombeo consisten en el transporte de lodos de los sedimentadores primarios y secundarios a las instalaciones de espesamiento, acondicionamiento o estabilización; de las instalaciones de espesamiento y estabilización a las unidades de deshidratación; de los procesos biológicos para recirculación o tratamiento adicional; o de los dispositivos de cribado y desarenado a un almacenamiento temporal.

5.2. Objetivo

El ingeniero de diseño debe conocer las fuentes, características y cantidades de lodo, que se tendrán que manejar cuando se diseñen los dispositivos para el transporte, acondicionamiento y espesamiento o deshidratación de lodos, mediante la selección de equipos de bombeo. El objetivo de este capítulo es:

- Conocer el tipo de bombas que se utilizan para el bombeo de lodos
- Conocer los criterios para la selección de bombas de lodos

5.3. Clasificación de bombas

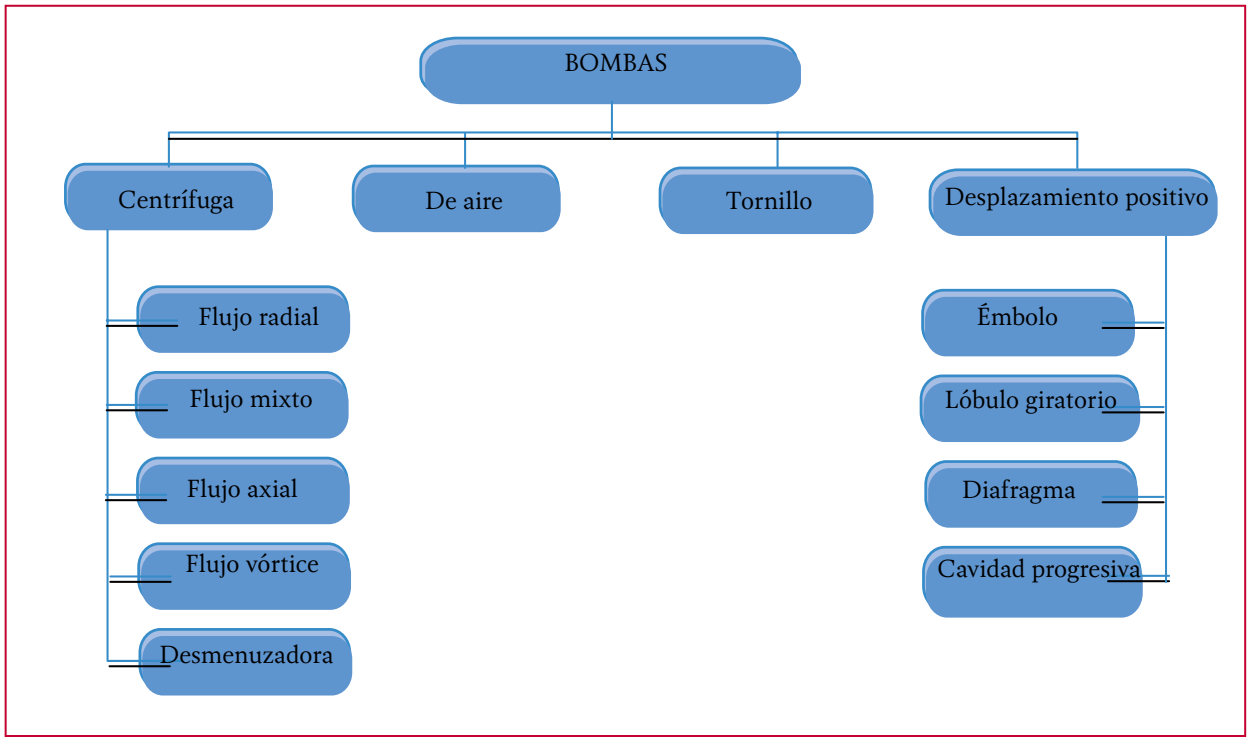
Uno de los problemas que enfrenta el ingeniero en el diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales es la selección de equipos para una amplia gama de aplicaciones de bombeo incluyendo aguas residuales tratadas, aguas residuales domésticas e industriales, lodos estabilizados, lodos espesados, mezcla de grasas, sólidos flotantes y de desecho, retorno de lodos activados, soluciones químicas, en la Ilustración 5.1 se presenta una clasificación general para bombas.

5.4. Descripción

5.4.1. Bombas centrífugas

Con la excepción de diseños especiales como el impulsor cerrado, en la mayoría de los casos el uso de bombas centrífugas se restringue a lodos libres de basuras y relativamente diluidos. Las bombas centrífugas convencionales comúnmente se utilizan para el transporte del lodo,

Ilustración 5.1 Clasificación de bombas para el tratamiento de aguas residuales



debido a su mayor capacidad y excelente eficiencia. Las bombas centrífugas no se recomiendan para el bombeo de lodos primarios, natas o lodos espesados. En la Tabla 5.1 se describen las características de las bombas y en la Tabla 5.2 se presentan la clasificación general de este tipo de bombas.

Tabla 5.1 Características de las bombas centrífugas (WEF, 1994)

Tipo de Bomba	Rango de capacidad L s^{-1}	Rango de carga (m)	Rango de eficiencia óptima %
Radial inatascable	3 - 1300	8 - 60	60 - 85
Radial para agua limpia	3 - 1300	8 - 150	80 - 90
Vórtice	3 - 320	1 - 64	40 - 65
Flujo mixto	63 - 5000	3 - 18	80 - 88
Flujo axial	32 - 6300	0.3 - 12	75 - 85
Desmenuzadora	3.2 - 32	1 - 72	40 - 50

Tabla 5.2 Clasificación de las bombas centrífugas

Característica	Tipo
Por su impulsor	-Impulsor cerrado -Impulsor semicerrado -Impulsor abierto
Por la colocación de eje del impulsor	-Vertical -Horizontal
Por la dirección del flujo de salida	-Radial -Axial -Mixto
Por la entrada de succión	-Succión simple -Doble succión
Por el número de impulsores	-Una etapa -Múltiples etapas
Por su colocación	-Cárcamo seco -Cárcamo húmedo
Si están dentro del agua	-Sumergibles

5.4.2. Bombas de impulsor cerrado

Las bombas de impulsor cerrado se adaptan bien para manejar lodos desde 2 por ciento o menos de sólidos (lodos crudos) hasta 4 por ciento sólidos (lodos estabilizados). En caso de utilizar bombas de impulsor cerrado, se requiere de transmisiones de velocidad variable, así como flechas y baleros muy gruesos. Deberán tener impulsores de hierro fundido resistente a la abrasión (ASTM A532), especialmente si el contenido de sólidos o arena es alto o desconocido. Las bombas de impulsor cerrado son adecuadas para instalaciones de cárcamo seco o húmedo, debido a que existen de tipo vertical (con flecha corta o larga) y horizontal. Las bombas para uso en cárcamo húmedo incluyen transmisiones hidráulicas o motores eléctricos sumergibles. Normalmente están disponibles en tamaños desde 50 mm hasta 200 mm (2" a 8"), con capacidades de 3 a 30 L s^{-1} a cargas hasta de 64 m CDT. Valores típicos de eficiencias para estas bombas van desde 35 por ciento hasta 55 por ciento.

5.4.3. Bombas desmenuzadoras

Existen combinaciones especiales de bombas centrífugas y desmenuzadoras Ilustración 5.2. Estas bombas se pueden utilizar para la recirculación del contenido de los reactores de estabilización de lodos y son buenas para evitar la formación de bolas de trapos. La experiencia indica que este tipo de bomba requiere tanto mantenimiento como los desmenuzadores convencionales.

5.4.4. Bombas de desplazamiento positivo

Dentro de las ventajas de las bombas de desplazamiento positivo para el manejo de lodos se incluyen: un mejor control del proceso, mejor capacidad de operación de la bomba (sobre todo en el ámbito de carga sin dañar la bomba o motor y sin cambio de velocidad), mejor capacidad de bombeo a presión alta y bajo gasto, menor sensibilidad a condiciones no ideales de succión y menor rompimiento de partículas de flóculos frágiles en lodos activados de retorno (LAR) y lodo floculento. En la Tabla 5.3 se muestran las características de las bombas de desplazamiento positivo, además estas bombas también se usan n plantas de tratamiento de aguas residuales por su habilidad de manejar lodos concentrados y pesados, en ocasiones estos lodos contienen gases, aun así estas bombas no requieren de cebado. La eficiencia de estas bombas no es un factor para su selección.

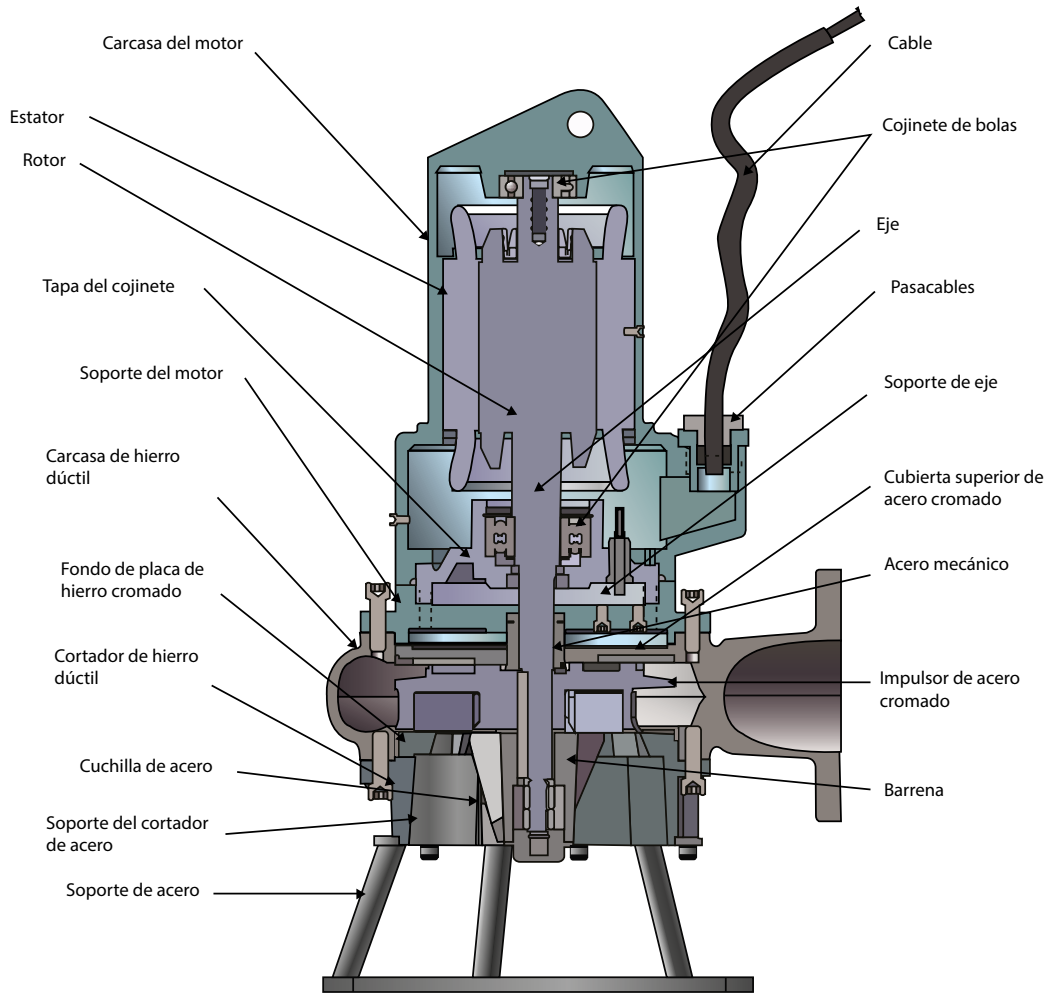
Tabla 5.3 Características de bombas de desplazamiento positivo (WEF,1994)

Tipo de bomba	Rango de capacidad (L s^{-1})	Rango de carga (H)
Émbolo	1 - 30	1 - 73
Diafragma	1 - 10	1 - 115
Cavidad progresiva	1 - 25	1 - 73
Rotatoria	1 - 106	1 - 73

5.4.5. Bombas de émbolo

Están disponibles en configuración simplex, duplex y triplex; tienen una capacidad de 2.5 L s^{-1} a 3.8 L s^{-1} por émbolo; y pueden desarrollar hasta

Ilustración 5.2 Bomba cortadora y desmenuzadora



70 m en la descarga. Las ventajas de las bombas de émbolo incluyen:

- Se pueden bombear concentraciones altas de sólidos, hasta 15 por ciento, si el equipo está diseñado para las mismas
- Se pueden utilizar bajos gastos con aberturas grandes; distribución positiva a menos que algún objeto impida que la válvula check asiente bien; capacidad constante pero ajustable, independientemente de grandes variaciones en la carga de bombeo
- Acción pulsante de las bombas simplex y dúplex, a veces ayuda a concentrar el lodo en las tolvas y a resuspender los sólidos en la tubería cuando se bombea a bajas velocidades
- Costos de operación y mantenimiento relativamente bajos

Operan con mayor confiabilidad en o cerca al paso máximo, de tal manera que se proporciona algún tipo de transmisión variable de banda en "V" o de velocidad variable, para control de la capacidad de bombeo. En la Ilustración 5.3 se muestra la construcción de la bomba.

5.4.6. Bombas de cavidad progresiva (BCP)

Las bombas de cavidad progresiva se utilizan en aplicaciones similares a las de émbolo, las BCP operan en forma más limpia y descargan un flujo más uniforme, pero tienden a tener un costo de mantenimiento más elevado. En la Ilustración 5.4, se presenta la construcción de una bomba de cavidad progresiva en donde se utiliza un rotor de metal en forma de gusano que gira con un movimiento excéntrico dentro de un estator de elastómero flexible. El estator tiene un paso axial de aproximadamente el 50 por ciento de la del rotor. Los diferentes pasos axiales proporcionan líneas de sellado que se mueven por la bomba cuando el rotor gira.

Entre las líneas de soldadura, las cavidades axialmente mueven los lodos desde el extremo de succión hacia el extremo de descarga. Algunos flujos de deslizamiento en las líneas de sellado aumentan a medida que se desgasta el estator y el deslizamiento adicional hace más desgaste. El deslizamiento se reduce al mínimo mediante el uso de suficientes cavidades (construcción de múltiples etapas).

La capacidad de sólidos varía con el tamaño de la bomba. Las bombas dimensionadas para gastos de 3 L s^{-1} o mayores, a velocidades bajas de rotación, típicamente pasan sólidos de aproximadamente 20 mm (0.8 pulgadas), por lo tanto la colocación de molinillos de lodos por delante de las bombas es innecesaria en la mayoría de las aplicaciones.

Las siguientes medidas pueden minimizar los costos de mantenimiento para BCP en el manejo de lodos:

- Optimizar la remoción de arena en procesos anteriores
- Limitar la velocidad de rotación a aproximadamente 250 rpm
- Específicar con mucho cuidado el material del rotor, estator y diseño de las juntas universales
- Proporcionar suficiente espacio para desmantelar la bomba en forma eficiente

5.4.7. Bombas de diafragma operadas con aire

Una bomba de diafragma accionada por aire, Ilustración 5.5. Es un tipo de bomba de émbolo en el que se flexiona una membrana con aire comprimido, la membrana se empuja o se tira al contraer o ampliar una cavidad cerrada. En la mayoría de las operaciones de bombeo de lodos, esta bomba tiene una sola cámara, bomba de diafragma; un regulador de presión de aire, una válvula de solenoide; un medidor, un silenciador y un temporizador.

La aplicación más común de las bombas de diafragma operadas con aire es el bombeo de lodo primario y espesado.

5.4.8. Bombas rotatorias

Bombas rotatorias

El tipo de cavidad progresiva es el más comúnmente utilizado para el manejo de lodos. Las bombas rotatorias con aplicaciones para lodos incluyen bombas de engrane, aleta y lóbulo. Las bombas de lóbulo (Ilustración 5.6) han sido utilizadas con éxito para el transporte de lodos.

Ilustración 5.3 Detalles de la bomba de émbolo

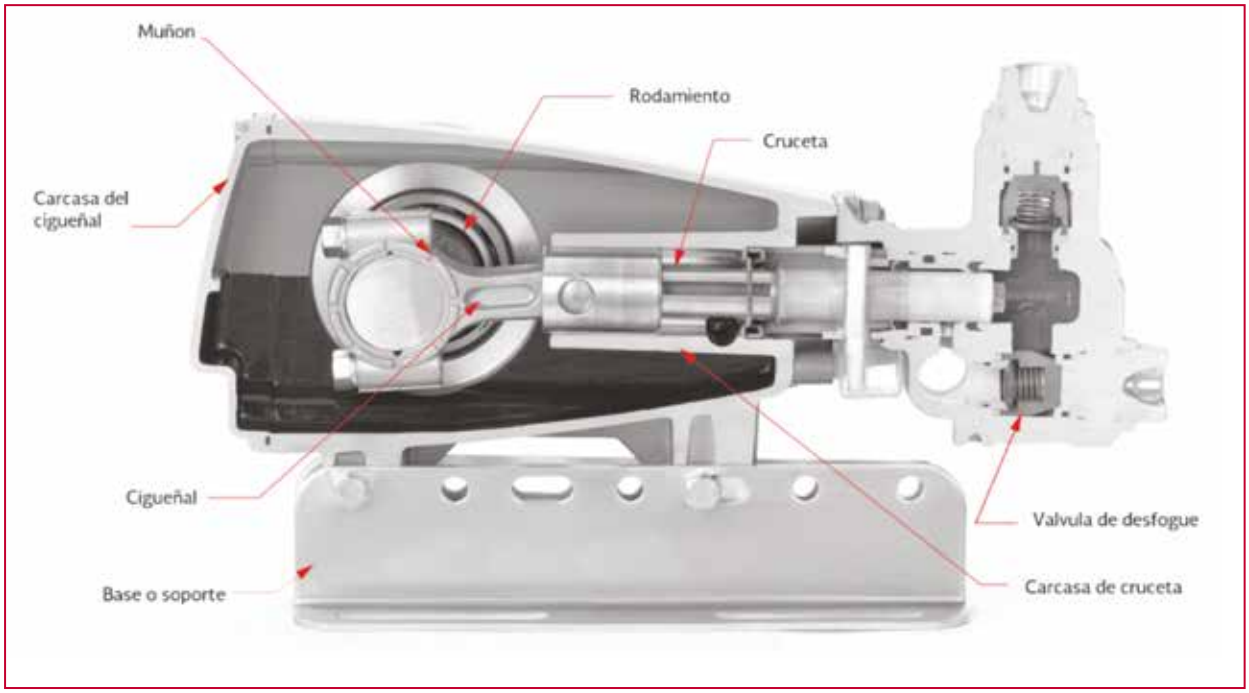
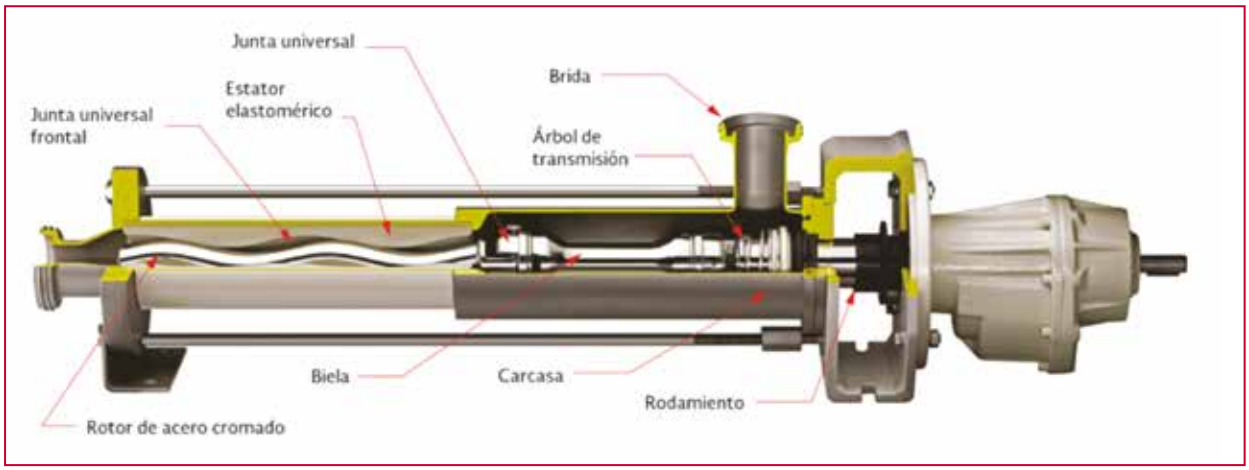


Ilustración 5.4 Bomba de cavidad progresiva



Eyectores neumáticos

Los eyectores neumáticos carecen de elementos rotatorios y motores eléctricos. Tienen un contenedor receptor, válvulas de entrada y salida, suministro de aire y detector del nivel líquido. Los eyectores neumáticos pueden ser utilizados para transportar lodo y natas producidos en plantas de tratamiento de aguas residuales. Están disponibles con capacidades desde 1.9 a 9.5 L s^{-1} y cargas hasta de 30 metros.

Bombas de manguera peristáltica

Las bombas peristálticas (Ilustración 5.7). Han sido utilizadas en forma limitada para el bombeo de lodos, las bombas disponibles en capacidades de 0.6 a 21 L s^{-1} y cargas hasta de 152 m, son autocebantes.

Ilustración 5.5 Bomba de diafragma operada con aire

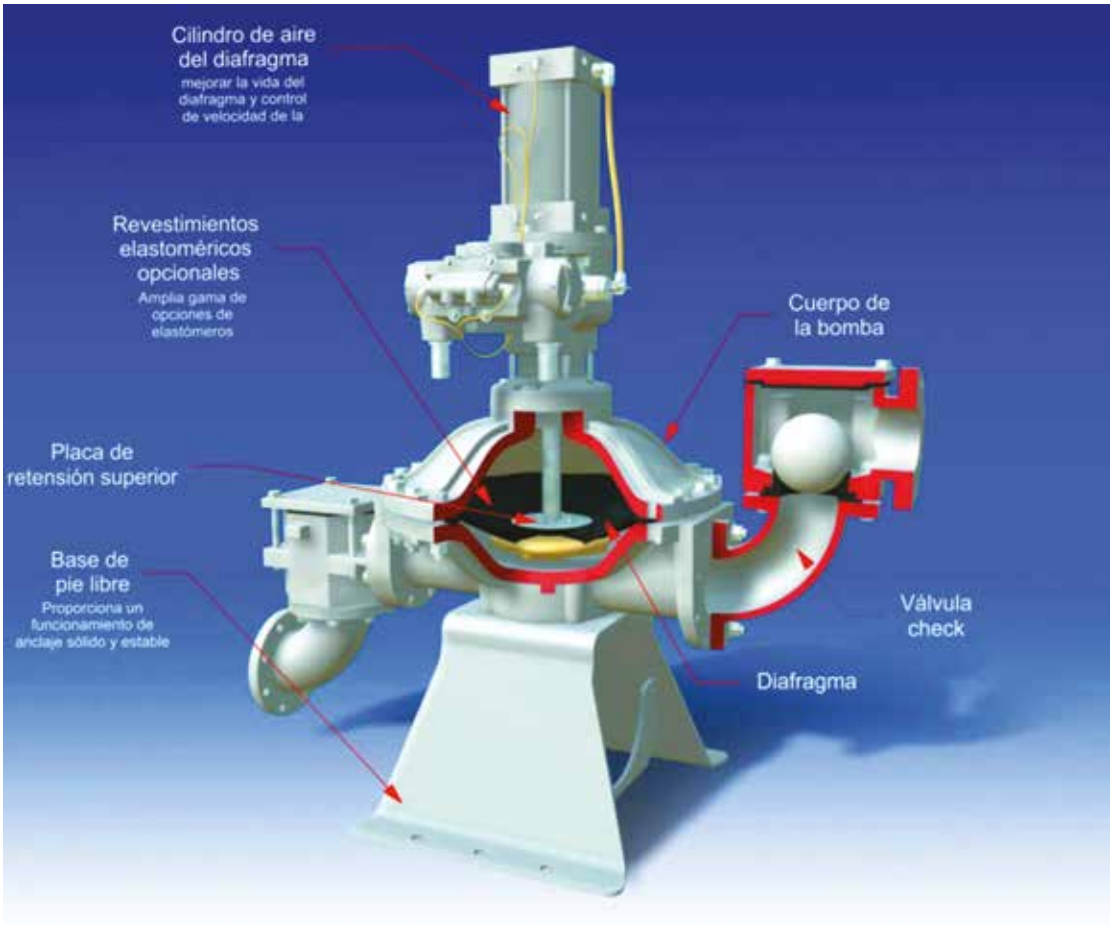


Ilustración 5.6 Bomba de lóbulo giratorio

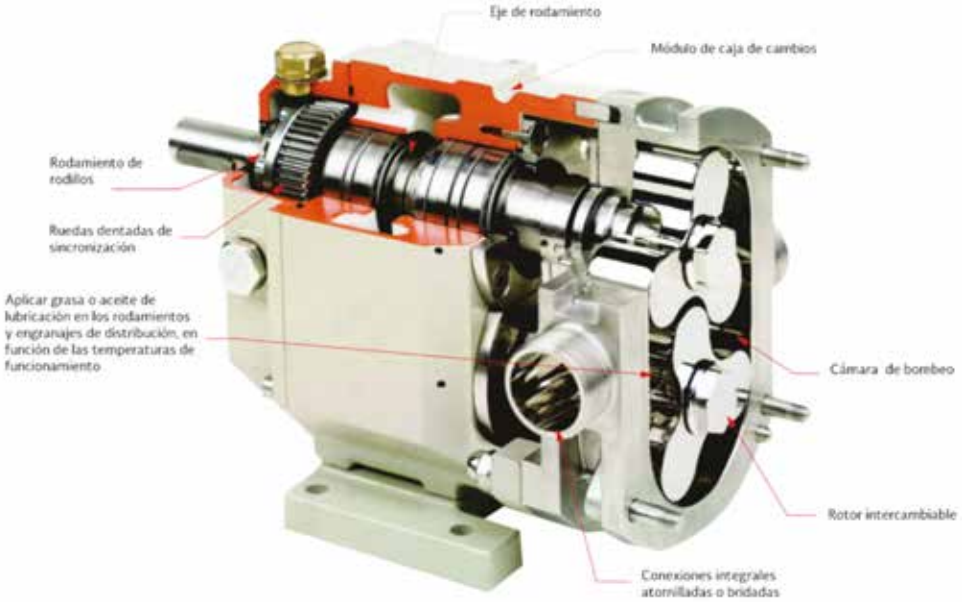


Ilustración 5.7 Bomba de manguera peristáltica

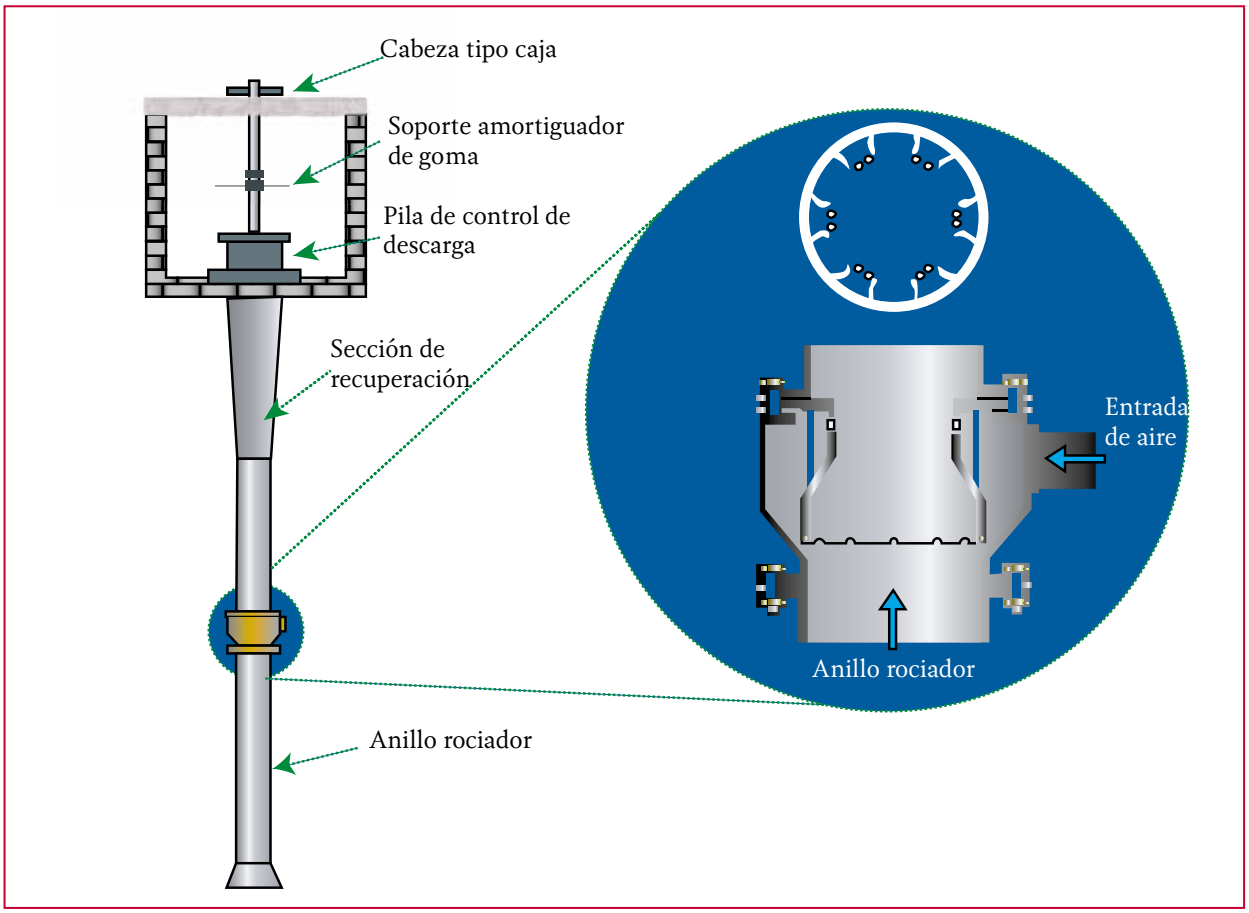
Bombas de Pistón Recíproco

Las bombas de pistón recíproco son útiles y costeables en ciertos casos donde el lodo o torta de lodo se transporta hacia instalaciones de almacenamiento o carga. Estas bombas no se utilizan antes de los procesos de deshidratación.

5.4.9. Bombas con Impulsor de aire

Las bombas con impulsor de aire (Ilustración 5.8). Se utilizan con frecuencia para recirculación de lodos activados en plantas donde no se requiere una tasa de bombeo muy precisa. Su aplicación en plantas de tratamiento de aguas residuales es para alto volumen y baja carga, con elevaciones menores de 1.5 m debido a la necesidad de por lo menos 70 por ciento de sumergencia del aire liberado.

Ilustración 5.8 Bomba con impulsor de aire



Su ventaja principal es la ausencia de partes movibles y la sencillez de construcción y uso. El suministro de aire controla la capacidad de manejar sólidos.

Las bombas de aire con un suministro de aire externo y difusor circular pueden pasar partículas sólidas tan grandes como el diámetro interno del tubo ascendente sin taponamiento. Cuando el aire se suministra por medio de un tubo independiente insertado, la obstrucción creada anula esta última característica.

Para su instalación, se requiere de una fuente de aire (soplador), disponible en plantas de lodos activados con aeración por difusión.

5.4.10. Bombas de tornillo de Arquímedes

Las bombas de tornillo de Arquímedes (Ilustración 5.9). Se utilizan ocasionalmente para la recirculación de lodos activados. Estas bombas pueden tener un diseño abierto, para elevaciones hasta de 9 m, y cerrado para alturas hasta de 12 m o más.

La bomba de tornillo es de desplazamiento positivo, ajusta automáticamente la tasa de bombeo en proporción a la profundidad del líquido en la cámara de entrada, lo que le proporciona una capacidad de gasto variable sin la necesidad de controladores de velocidad. La eficiencia se mantiene relativamente constan-

Ilustración 5.9 Bomba de tornillo de Arquímedes

te (70 por ciento a 75 por ciento) dentro de un ámbito de 30 por ciento a 100 por ciento de la capacidad de diseño. La velocidad típica del espiral es menor a 229 m min^{-1}. No están presurizadas, estas características ofrecen ventajas para el transporte de lodos de recirculación, debido a la menor tendencia de romper los flóculos del lodo activado. La principal desventaja de las bombas de tornillo está en los requerimientos de espacio.

5.5. Aplicaciones típicas

Los sistemas de bombeo de lodos constituyen una consideración crítica en las plantas de tratamiento, particularmente en plantas con gastos medios mayores de 3 785 m^3 d^{-1} (43.8 L s^{-1}). La Tabla 5.4 muestra las bombas para lodos por principio de funcionamiento.

Las siguientes bombas son las de mayor uso en aguas residuales, su capacidad está determinada por el diámetro y ancho del impulsor y por la velocidad de rotación. En la Tabla 5.5 se muestran las aplicaciones típicas por el tipo de bomba para el tratamiento de aguas residuales. En la Tabla 5.6 se muestra una encuesta de las bombas más utilizadas para lodos en plantas de tratamiento de aguas residuales.

5.6. Flujo de lodos

5.6.1. Métodos de cálculo de pérdidas de carga para lodos

Las pérdidas de carga adicionales por el flujo de lodos en lugar de agua, depende de la concentración y naturaleza de los lodos. El parámetro reológico que se afecta en mayor grado por la presencia de sólidos suspendidos es la viscosidad del fluido, mientras que el cambio en densidades es menos significante. Ambos parámetros aumentan con el incremento de los sólidos suspendidos.

Tabla 5.4 Bombas para lodos por principio de funcionamiento

Principio	Tipos comunes	Aplicaciones típicas para lodos
Bombas (rotodinámicas)	Bomba inatascable de flujo mixto Bomba de impulsor cerrado (bomba de vórtice) Bomba desmenuzadora	Lechada de arena, lechada de ceniza Lodo primario sin espesar Lodo activado purgado Lodo sin espesar de procesos de película biológica fija Circulación de reactores anaerobios Drenaje, filtrado Dragado de lagunas de lodos
Bombas de desplazamiento positivo	Bomba de émbolo Bomba de cavidad progresiva Bomba de diafragma operada con aire Bomba de lóbulo giratorio Eyector neumático Bomba peristáltica Pistón recíproco	Purga de lodo Lodo espesado, todo tipo Lodo primario sin espesar Alimentación a máquinas de desaguado Desaguado de torta de lodos Lodo secundario sin espesar
Otras	Bomba de aire Bomba de tornillo de Arquímedes	Lodo activado de retorno

Tabla 5.5 Aplicación de bombas para aguas residuales

Tipo de bombas	Máxima elevación de succión, (m)	Máximo diámetro en general de sólidos manejado en (cm)	Algunas aplicaciones típicas
Centrífuga doble orificio, inatascable	4.6	>7.6	-Aguas residuales -Lodos primarios -Lodos secundarios -Efluente
Centrífuga para Agua limpia	4.6	<2.5	-Agua para la limpieza general -Apagadores de espuma -Pre-y postcloración -Agua de solución para químicos
Centrífuga tipo vórtice	4.6	>7.6	-Recirculación de lodos -Arena
Centrífuga flujo mixto	4.6	>7.6	-Agua cruda -Soluciones concentradas
Centrífuga flujo axial	4.6	<2.5	-Efluente
Impulsión con aire	3.0	>7.6	-Agua cruda -Recirculación
Centrífuga desmenuzadora	3.0	No aplica	-Agua cruda -Soluciones concentradas
Tornillo Arquímedes	0	>15	-Agua cruda -Recirculación de lodos
Desplazamiento positivo: -Pistón -Rotatoria -Diafragma	6.7	Consultar con el fabricante	-Lodos primarios -Lodos espesados -Lodos digeribles -Productos químicos -Soluciones concentradas

Tabla 5.6 Encuesta que muestra las bombas más utilizadas para lodos

Tipo de bomba	Retorno de lodos	Lodos activados	Primario	Lodo estabilizado	Recirculación de lodo estabilizado
Centrífuga	67	62	28	29	42
Pistón		2	30	20	6
De tornillo de Arquímedes	3	2	1	2	
De aire	16	10	5	2	3
De cavidad progresiva	3	13	15	23	8
De diafragma			3		
Otras	1		3	1	
Total	90	89	85	77	59
Nota: El número total es el número de usuarios encuestados					

La correlación lineal de los esfuerzos cortantes, características de fluidos newtonianos como el agua, no aplica a lodos bajo ciertas concentraciones de sólidos. La viscosidad del lodo es un parámetro difícil de medir debido al problema de separación de los sólidos con el agua.

5.6.1.1. Método de Hazen- Williams modificado

Bajo estas condiciones, el análisis hidráulico de tuberías que conducen lodos concentrados no es fácil, el método comúnmente utilizado para estimar pérdidas de carga en tuberías que conducen lodos es el de Hazen- Williams con un valor del coeficiente C modificado o bien por un método gráfico basado en datos de campo. Con las pérdidas de carga y las elevaciones estáticas se pueden seleccionar las bombas que requiera el sistema de bombeo.

Cuando de utiliza la ecuación de Hazen- Williams, el coeficiente C se decrementa ya que los lodos concentrados son más difíciles de conducir que el agua. En la Tabla 5.7 se presenta la correlación de C para agua y C modificado (C_M) para lodos según el contenido de sólidos.

Tabla 5.7 Valores del coeficiente CM para lodos

Sólidos Totales por ciento	C_M
0	100
2	81
4	61
6	45
8.5	32
10	25

Debe de tomarse en cuenta que las suspensiones diluidas, como los lodos activados, no difieren en su comportamiento con el agua, solamente si su concentración excede del 1 por ciento se deben hacer ajustes para el análisis hidráulico.

En algunos casos, el uso de la ecuación de Hazen-Williams para el cálculo de pérdidas de carga para lodos da como resultado tuberías con diámetros excesivos, por esto, algunos ingenieros diseñan con diámetros y gastos combinados de tal manera que se tengan velocidades entre 1 y 2.5 metros por segundo.

5.6.1.2. Método Gráfico

El método gráfico mencionado anteriormente consiste en el uso de la Ilustración 5.10, Ilustración 5.11, Ilustración 5.12 e Ilustración 5.13 presentadas por Mulbarger. Estas gráficas relacionan la pérdida de carga con la velocidad media del flujo, a diferentes concentraciones de sólidos, debido a que fue desarrollada bajo condiciones experimentales, puede ser representativa de lo que ocurra en condiciones de campo, aunque los resultados son muy conservadores.

5.6.1.3. Método de Frost

Un tercer método presentado por Frost, consiste en la relación encontrada entre la pérdida de carga con agua limpia y la pérdida de carga para flujo turbulento de lodos, a la misma velocidad y temperatura, estas relaciones son:

Lodos primarios	$Rh_f = 1.5$	Ecuación 5.1
Lodos activados	$Rh_f = 0.88 + 0.024\ C$ para $C > 5\ kg \cdot m^{-3}$	Ecuación 5.2
Lodos estabilizados anaeróbicamente	$Rh_f = 0.80 + 0.016\ C$ para $C > 15\ kg \cdot m^{-3}$	Ecuación 5.3
Lodos de humus	$Rh_f = 0.84 + 0.020\ C$ para $C > 10\ kg \cdot m^{-3}$	Ecuación 5.4

donde:

Rh_f = Relación de pérdida de carga, (adimensional)

C = Concentración de lodos, (kg m^{-3})

Debe notarse que los métodos de cálculo presentados, solo nos dan resultados aproximados

Ilustración 5.10 Para tuberías de 150 mm (6”) y operación rutinaria

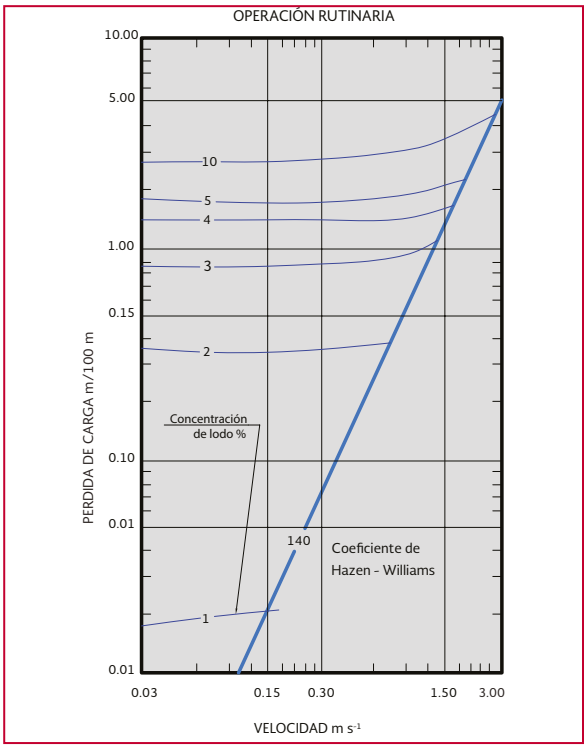


Ilustración 5.11 Para tuberías de 200 mm (8”) y operación rutinaria

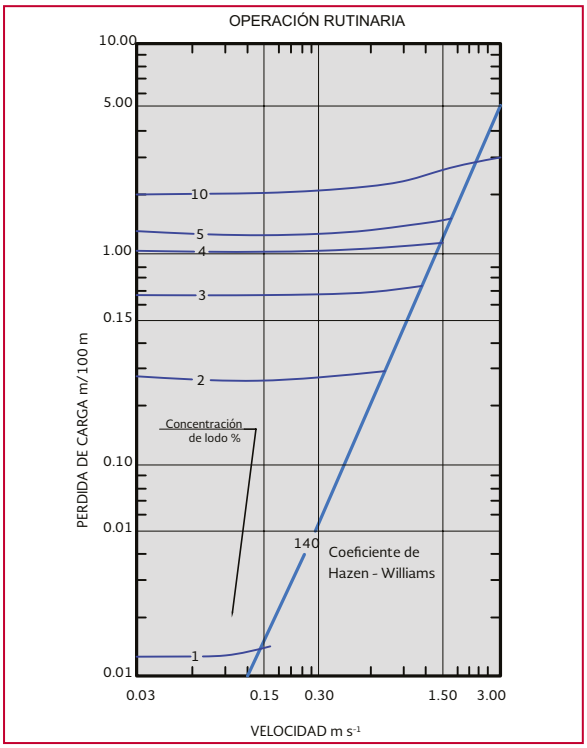


Ilustración 5.12 Para tuberías de 150 mm (6”) y caso más desfavorable

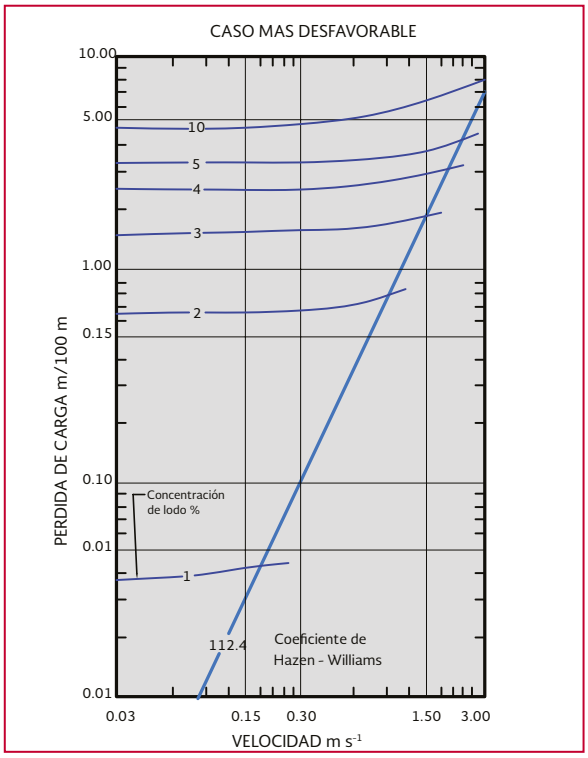
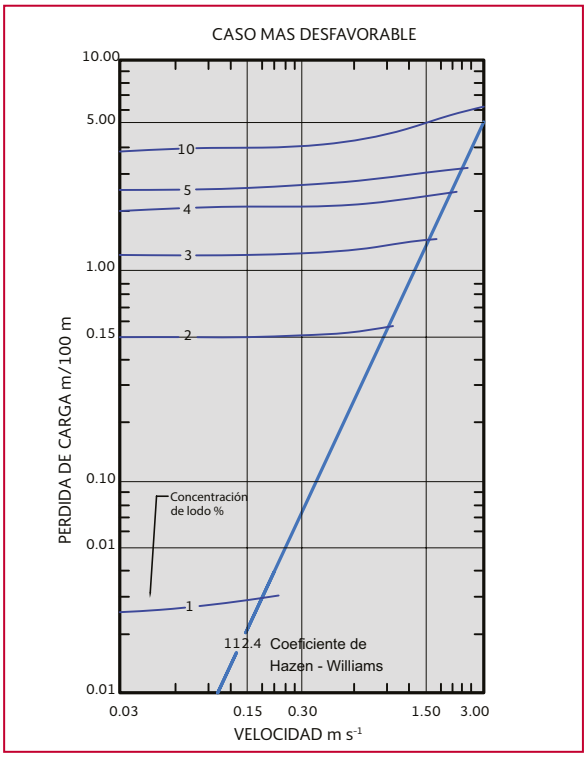


Ilustración 5.13 Para tuberías de 200 mm (8”) y caso más desfavorable



de las pérdidas de carga debidas a flujos de lodos, estos se utilizan con propósitos de diseño en ausencia de los parámetros reológicos determinados experimentalmente. Para una determinación más precisa se requieren metodologías en función de dichos parámetros.

5.7. Ejemplos de selección de bombas

5.7.1. Ejemplo 1- Comparación de métodos de cálculo de pérdidas de carga para lodos

Una tubería nueva de acero de 200 mm (8") de diámetro, conduce lodos primarios con una concentración de sólidos suspendidos del 4 por ciento. Calcular las pérdidas de carga en un tramo de 50 m, sabiendo que el gasto es de 50 litros por segundo.

Se resolverá por los tres métodos presentados:

a) Por el método de Hazen- Williams modificado

Para tubería nueva de acero, C = 140

De acuerdo con la Tabla 5.7, para 4 por ciento de sólidos:

$$C_M = 61 \text{ por ciento de } C$$

$$C_M = 140\ (0.61) = 85.4$$

Aplicando Hazen- Williams

$$S = (Q/0.278 \times C_M \times D^{2.63})^{1.85}$$

$$S = (.050/0.278 \times 85.4\ (0.203)^{2.63})^{1.85} = 0.02617$$

$$h_f = 50 \times 0.02617 = 1.31 \text{ m}$$

b) Por el método gráfico

$$A_8" = 0.785\ D^2 = 0.785\ (0.203)^2 = 0.03243\ m^2$$

$$V = Q/A = 0.050/0.03243 = 1.54\ m\ s^{-1}$$

De la gráfica 1.4, para V = 1.54 m s^{-1}

$$h_f = 2.2\ m\ /\ 100\ m$$

$$h_f = 2.2\ (50\ /\ 100) = 1.1\ m$$

c) Por el método de Frost

Utilizando Hazen–Williams para C = 140

$$S = (0.050/0.278 \times 140 \times (0.203)^{2.63})^{1.85}$$

$$S = 0.010487$$

Pérdida como si el fluido fuese agua:

$$h_f = 50\ (0.010487) = 0.52$$

Pérdida para lodos primarios, aplicando la ecuación 5.1:

$$Rh_f = 1.5$$

$$h_f = 1.5\ (0.52) = 0.78\ m$$

Resumen:

Método	Pérdida de carga
Método de Coeficiente Modificado	$h_f = 1.31\ m$
Método Gráfico	$h_f = 1.10\ m$
Método de Frost	$h_f = 0.78\ m$

Los resultados obtenidos con los 3 métodos son variables, aunque el método de coeficiente modificado (C_M), dio un resultado similar al método gráfico. El método de Frost dio un resultado menos conservador y considera el coeficiente o relación Rh_f de acuerdo al origen del lodo y a su concentración. No hay que perder de vista que los 3 métodos son poco precisos pero para fines prácticos podemos utilizar alguno de ellos.

5.7.2. Ejemplo 2- Bombeo de lodos de recirculación

En una planta de tratamiento de lodos activados convencionales, la recirculación máxima de diseño es de 50 L s, se realiza de acuerdo con la Ilustración 5.14, calcule las pérdidas de carga si

la concentración de sólidos en la recirculación es del 2 por ciento.

Por el método de longitud equivalente se calculan las pérdidas de carga como si fuese agua y posteriormente se aplica el método de Frost para obtener las pérdidas de carga por conducir lodos activados

Datos del proyecto:

Gasto máximo de recirculación Q = 50 L s^{-1}
D = 200 mm (8")
C = 110

Las siguientes piezas especiales y longitudes equivalentes (Tabla 5.8) forman parte del sistema de recirculación de lodos.

Tabla 5.8 Piezas especiales y longitudes equivalentes

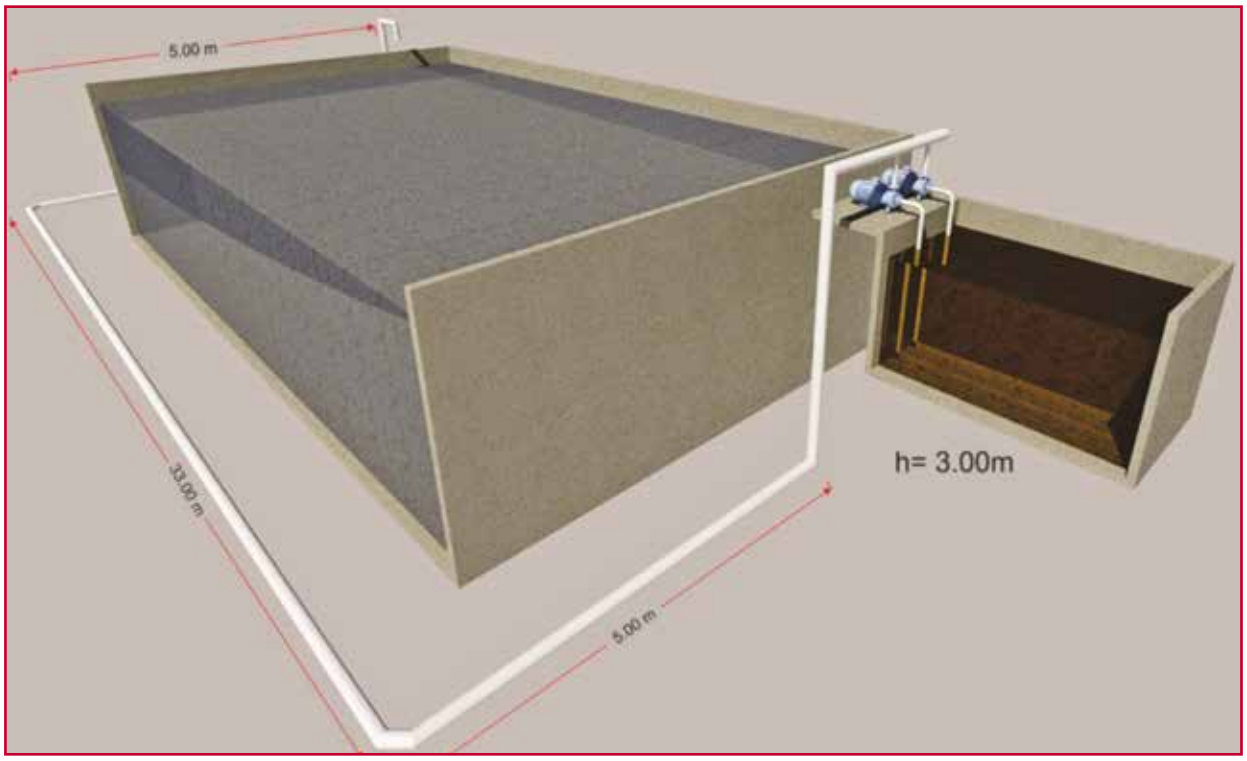
Pieza Especial	Longitud Equivalente
Longitud de tubería	3+5+33+5+3+2 = 51
Válvula de retención	15
Válvula de compuerta	1.5
Codo de 45°	3.2
Codo de 90° (7 piezas)	6.3 × 7 = 44.1
Salida	7
Longitud total equivalente	121.8 m

Aplicando Hazen – Williams.

$$S = (Q/0.278 \times C \times D^{2.63})^{1.85}$$
$$S = (0.050/0.278 \times 110 \times (0.203)^{2.63})^{1.85} = 0.016384$$
$$h_f = 121.8 \times 0.016384 = 1.995\ m$$

Cálculo del factor Rhf para lodos activados, (ecuación 5.2).

Ilustración 5.14 Tanque de aeración



$Si\ C = 2\ \% = 20\ kg\ m^{-3}$

$Rh_f = 0.88 + 0.024\ C \qquad C > 5\ kg\ m^{-3}$

$Rh_f = 0.88 + 0.024\ (20) = 1.36$

Cálculo de la pérdida de carga por conducir lodos activados.

$h_f = 1.995 \times 1.36 = 2.71\ m$

La diferencia de nivel estático entre el cárcamo de bombeo de recirculación y el tanque de aeración es de 3 m, mientras que la profundidad de dicho cárcamo es de 2 m, sabiendo que la carga dinámica total (CDT) es igual a la suma de la carga estática más las pérdidas de carga esperadas en el sistema, se tendrá:

$CDT = h_f + Ce$

$CDT = 2.71 + 5 = 7.71\ m$

Con estos datos se selecciona la bomba, en este caso dos bombas centrífugas horizontales, una en funcionamiento y la otra de reserva (Stand by), para el gasto máximo de recirculación de 50 L s^{-1} y CDT de 7.71 m.

La potencia aplicada al motor para la bomba se puede estimar con:

$$Mhp = (Q \times CDT) / (76 \times N_1 \times N_2)$$

donde:

Mhp	= Potencia del motor en hp
Q	= Gasto en L s^{-1}
CDT	= Carga dinámica total en m
N_1	= Eficiencia de la bomba
N_2	= Eficiencia del motor

Suponiendo eficiencias de la bomba y el motor en 80 por ciento y 90 por ciento respectivamente, se tiene:

$Mhp = (50 \times 7.71) / (76 \times 0.80 \times 0.90)$

$= 7.04\ hp$

Se puede encontrar un motor de 7.5 hp, se busca un fabricante y se selecciona la bomba que cumpla con las condiciones del proyecto, siempre del lado de la seguridad.

Las siguientes ilustraciones, muestran curvas características para bombas centrífugas, que deben ser proporcionadas por el fabricante de la bomba seleccionada.

- La Ilustración 5.15 se refiere al funcionamiento, capacidad (gasto en L s^{-1}) contra carga dinámica total (H en metros)
- La Ilustración 5.16 se refiere a la potencia (hp) que requiere la bomba para las condiciones del proyecto, de acuerdo al gasto bombeado (L s^{-1})
- La Ilustración 5.17 se refiere a la eficiencia máxima de la bomba (N en por ciento) que se alcanza con un gasto determinado (L s^{-1})

Es muy importante que el fabricante proporcione la información detallada de la bomba y de sus curvas características.

5.8. Recomendaciones

Se debe considerar el flujo máximo de lodos esperado en cada unidad de proceso de tratamiento de lodos, así como investigar o conocer las características del lodo conducido, principalmente su contenido de sólidos suspendidos ya que es un factor muy importante en el cálculo de pérdidas de carga.

Ilustración 5.15 Se refiere al funcionamiento, capacidad (gasto en L s^{-1} contra carga dinámica total (H en metros)

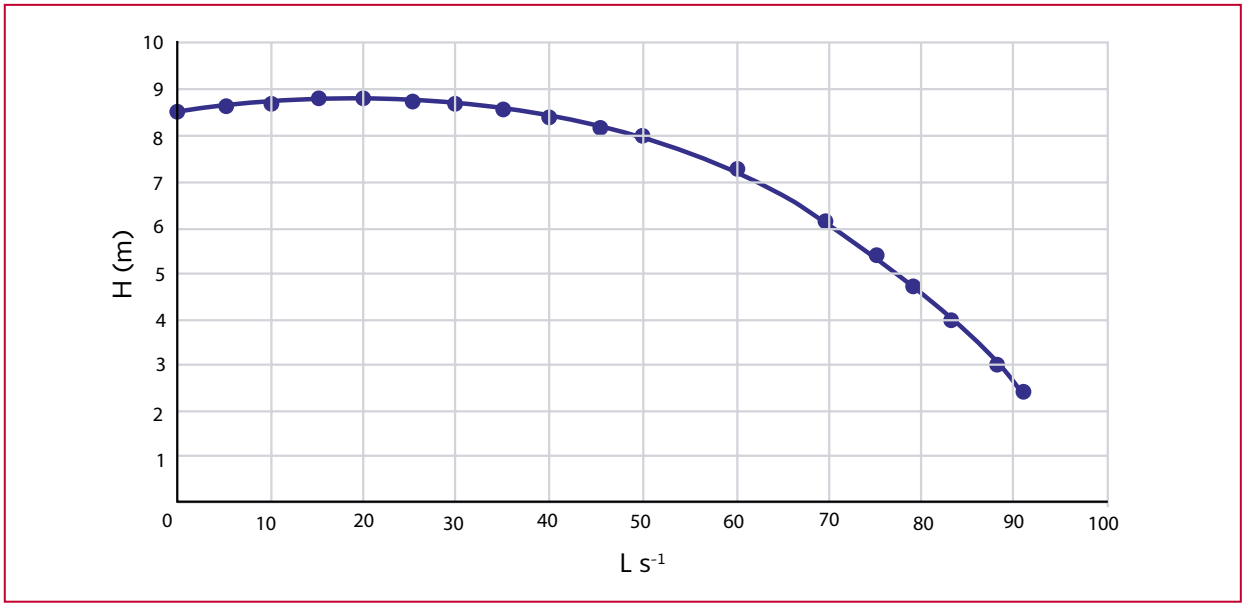
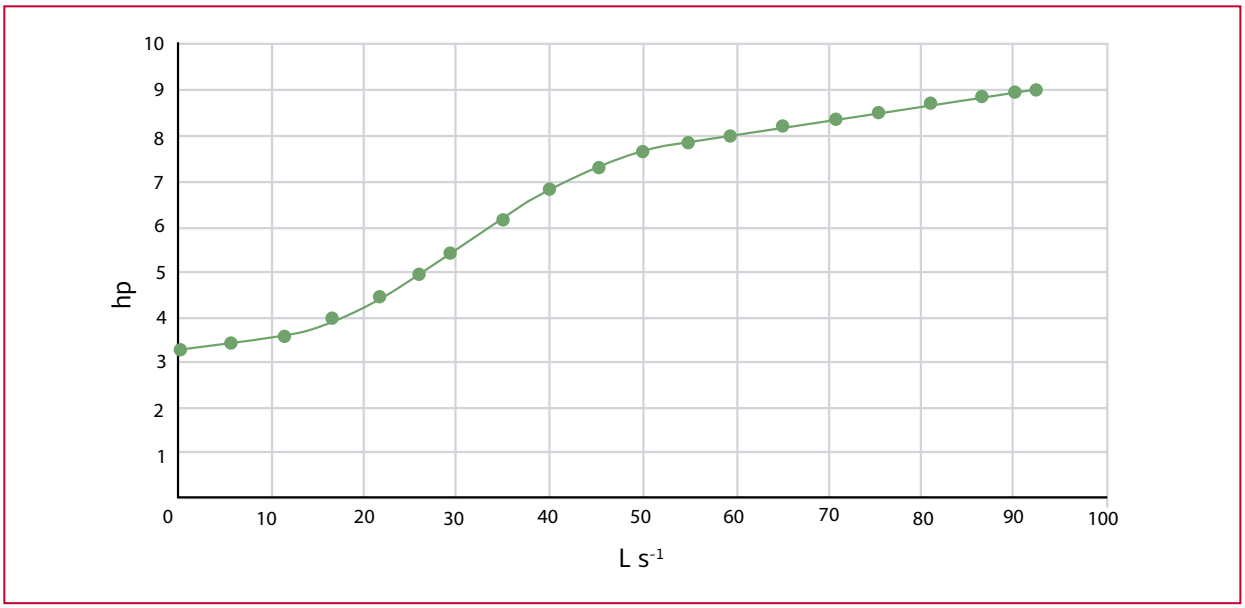
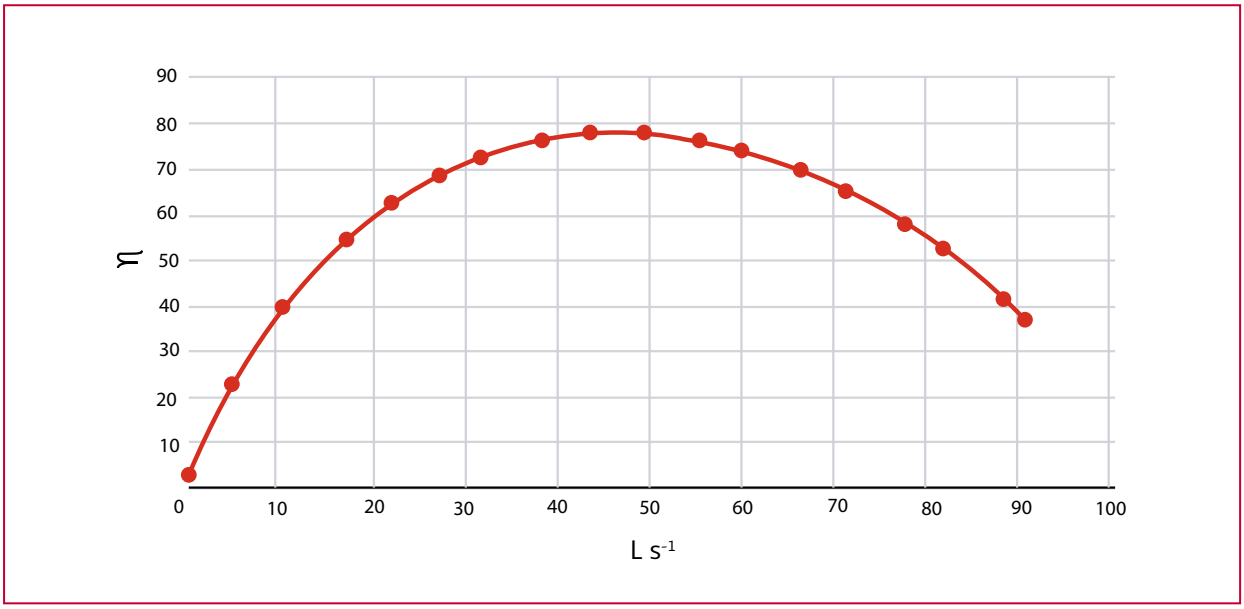


Ilustración 5.16 Se refiere a la potencia (hp) que requiere la bomba para las condiciones del proyecto, de acuerdo al gasto bombeado (L. s^{-1})



La información presentada en este capítulo es una guía para la selección de bombas utilizadas principalmente en el tren de lodos, se recomienda profundizar en el tema consultando bibliografía y ligas de internet ya que el tema de bombeo es toda una especialidad.

Ilustración 5.17 Se refiere a la eficiencia máxima de la bomba (N en %) que se alcanza con un gasto determinado (L s^{-1})



La selección del diámetro de las tuberías de interconexión, implica obtener las pérdidas de carga adecuadas, por la velocidad, longitud y piezas especiales. Aquí es en donde se aplican los métodos de cálculo para el flujo en tuberías, como es el caso de la aplicación de la fórmula de Hazen- Williams en la aplicación de métodos diferentes para el cálculo de flujos de lodos.

5.9. Transportadores de lodos

Las bandas transportadoras mueven sólidos húmedos o secos (por ejemplo: arena, basura y sólidos separados durante el cribado, y tortas de lodo deshidratadas) que no se bombean fácilmente. Las plantas de tratamiento municipales suelen utilizar tornillos o bandas transportadoras.

5.9.1. Transportadores de banda

Las bandas transportadoras (Ilustración 5.18) mueven el material sobre una banda flexible. Estas bandas se apoyan normalmente sobre rodillos espaciados de 0.9 a 1.5 m de distancia en el lado de carga y a unos 3 m de distancia en el retorno de la banda transportadora. Los rodillos ubicados junto a la carga se llaman rodillos de carga, los del lado de retorno se llaman rodillos de retorno. Para aumentar la capacidad de carga, los rodillos de carga forman un ángulo con la banda para hacer una superficie cóncava.

La banda se acciona por uno o más tambores o poleas conectadas a un motor a través de una transmisión por bandas delgadas o cadenas. En los sistemas de transporte simple, la polea de accionamiento está situada en el extremo de descarga (cabeza) de la banda y la polea de cola está en el otro extremo.

La banda debe mantener una tensión mínima para reducir el hundimiento entre rodillos, proporcionando fuerza de contacto para evitar el deslizamiento en la polea de accionamiento. Esta tensión se puede mantener por varios dispositivos, como pueden ser un mecanismo de tensión automático por contrapeso, una polea de resorte o un tornillo para ajustar la posición de

Ilustración 5.18 Banda transportadora

la polea. La opción menos costosa es un tornillo colocado en la polea de cola, que por lo general se utiliza en transportadores de menos de 90 m de largo.

5.9.1.1. Aplicaciones de las bandas transportadoras

Las bandas transportadoras convencionales mueven sólidos a través de un circuito continuo mediante una correa de caucho reforzado. Por lo general transportan material relativamente seco (15 por ciento o más de sólidos). Para que este método sea económico, los sólidos deben estar lo suficiente secos para no fluir libremente o busquen un nivel constante (como lo hacen los líquidos). Los sólidos con un alto ángulo de reposo (es decir, la pendiente de la pila de sólidos medidos desde la horizontal) son adecuados para el transporte a través de bandas transportadoras. Los sólidos primarios y secundarios estabilizados pueden tener un ángulo de reposo de 40º o más, mientras que el concreto húmedo tiene un ángulo de reposo menor de 25 grados. Debido a que el movimiento de la banda hace vibrar el material, los ingenieros de diseño deben tener en cuenta las tendencias del flujo de los sólidos para decidir si una banda transportadora es adecuada. El ángulo que forma una pila de material mientras se mueve se llama ángulo de sobrecarga. El ángulo de sobrecarga de los sólidos prensados puede ser de más de 30°, mientras que el ángulo de concreto normalmente es inferior a 5 grados. Es por eso que los ingenieros deben determinar las características de los materiales antes de decidir cuál banda transportadora usar.

La distancia de transporte y el cambio de elevación también influyen en la elección de la banda transportadora. Los transportadores de banda se

Ilustración 5.19 Aplicación de banda transportadora cerrada en planta de tratamiento de aguas residuales

Ilustración 5.20 Aplicación de una banda transportadora

han utilizado para mover yacimientos mineros, materiales de construcción y escombros a más de 14 km, pero en las plantas de tratamiento típicas, la distancia podrían ser inferiores a 200 m. Si la distancia es inferior a 6 m, pueden ser más adecuados otro tipo de transportadores.

Los transportadores de banda tienen limitaciones dependiendo de la tasa de cambio de elevación y de los cambios de dirección horizontales que requieren múltiples correas. La inclinación máxima del transportador depende de la velocidad de material involucrado y del cinturón necesario. Las velocidades rápidas permiten ángulos superiores siempre y cuando la velocidad sea superior a la velocidad a la que el material fluye por la pendiente. Sin embargo, una mayor velocidad también aumentan los costos de operación y mantenimiento, ya que aumenta la fricción y reduce la vida útil de la correa. Cuando se mueve una torta deshidratada, el ángulo de inclinación máximo de un transportador de bandas se limita aproximadamente entre 15 a 20º sobre la horizontal. La pendiente máxima es mucho menor para los sólidos que son aguados o que tienden a fluir fácilmente.

La ganancia de elevación puede estar limitada por el radio de la curvatura conforme la correa se vaya inclinando hacia la horizontal. El radio debe ser lo suficientemente largo para que el cinturón no se levante de los rodillos de retorno bajo cualquier condición de funcionamiento. Dependiendo del diseño específico, este radio podría ser de 15 a 76 m o más. Los ingenieros deben tener en cuenta las dimensiones físicas de una planta al momento de tomar la decisión de qué tipo de transporte se utilizará.

Las bandas transportadoras tienen un bajo costo por metro lineal de distancia de transporte, pero es posible que requieran de un espacio considerable y un mantenimiento continuo. Las bandas transportadoras también pueden ser una fuente de olores. Además, si se va a instalar el transportador a la intemperie, las condiciones climáticas pueden afectar su funcionamiento.

5.9.1.2. Diseño, y consideraciones de operación de la banda transportadora

Al considerar un transportador de banda para una planta nueva o existente, los ingenieros de diseño deben comenzar por establecer los siguientes criterios:

- Las características del material a transportar (por ejemplo, el ángulo de reposo, el grado de malteado o viscosidad, densidad media y el rango de variación de estas características)
- Los volúmenes del material y tipos de transporte (es decir, si se transporta el mismo material todos los días o existen variaciones temporales en el material y horas de funcionamiento con sólidos) para que puedan determinar la capacidad de transporte
- El material de construcción de la banda (resistencia al ácido, aceite y resistencia a la abrasión)
- La selección de las bandas transportadoras y los requisitos de energía para que puedan determinar el ancho de banda y la velocidad (actividad transportadora); disposición de carga (rampas o cintas transportadoras); radio de la curva, los ángulos de inclinación, y la ganancia total de la elevación (los transportadores múltiples pueden estar justificados si estos factores son limitantes); tipo de

Ilustración 5.21 Operación de una banda transportadora

mecanismos como poleas , el espaciado y la disposición de los arreglos (que influyen en la fricción de la banda y los requisitos de energía), la potencia del motor y la tensión de la correa

La Asociación de Fabricantes de Equipos Transportadores (CEMA) publica un manual que incluye los procedimientos para el establecimiento de tales criterios y dimensionamiento de bandas (WEF, *et al*., 2010). Los ingenieros deben conocer las características del material a transportar. Algunos sólidos de plantas de tratamiento son rígidos, por ejemplo, la banda debe limpiarse para evitar que se derrame en las tandas de retorno y la consecuente pérdida de la fricción de la polea de accionamiento. Otras plantas de tratamiento pueden tener problemas específicos del sitio, tales como fugas de agua, olores, o derrames.

La Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. ofrece las siguientes pautas para problemas exclusivos de los sólidos de una planta de tratamiento (EPA, 1979):

- Los puntos de transferencia de la banda deberán tener alturas de caída mínima y tableros con limpiabrisas para minimizar las salpicaduras y derrames
- La limpieza de la banda es potencialmente problemática. Los contrapesos de caucho ubicados debajo de la polea son ineficaces y requieren mantenimiento continuo. Se sugieren rascadores con múltiples “dedos” y tensores ajustables. Otra opción es limpiar con agua a presión y retirar los sólidos con un raspador de goma (si el agua puede recogerse y eliminarse fácilmente)

- Los ingenieros de diseño deben evitar los accesorios (por ejemplo, amortiguadores o poleas de contrapeso) que tocan el lado sucio de la banda. Los amortiguadores son poleas posicionadas para aumentar el ángulo de contacto entre la banda y la polea de accionamiento, lo que aumenta la fricción y reducen el deslizamiento del accionador. En lugar de amortiguadores, se pueden utilizar tornillos de ajuste manual y si es necesario, bandas múltiples más cortas
- En el diseño de los transportadores, los ingenieros de diseño deben incluir un servicio de limpieza (por ejemplo, sistema de limpieza con mangueras)
- Debido a que una planta de tratamiento de aguas residuales es un ambiente húmedo o mojado y los sólidos generalmente son corrosivos y abrasivos, se deben diseñar o seleccionar las bandas considerando esas características. Las bandas transportadoras deben fabricarse con materiales resistentes a la corrosión (por ejemplo, de aleación de aluminio 6061- T6). Las ruedas guía pueden ser de neopreno o PVC, y los rodillos de neopreno se utilizan para las secciones cóncavas de la banda. Los baleros de los rodillos deben sellarse con engrasadores externos. Las cadenas de transmisión y los motores requieren guardafangos desmontables para protegerlos del derrame. Los materiales de la banda deben soportar la abrasión y las cubiertas deben ser resistentes al aceite

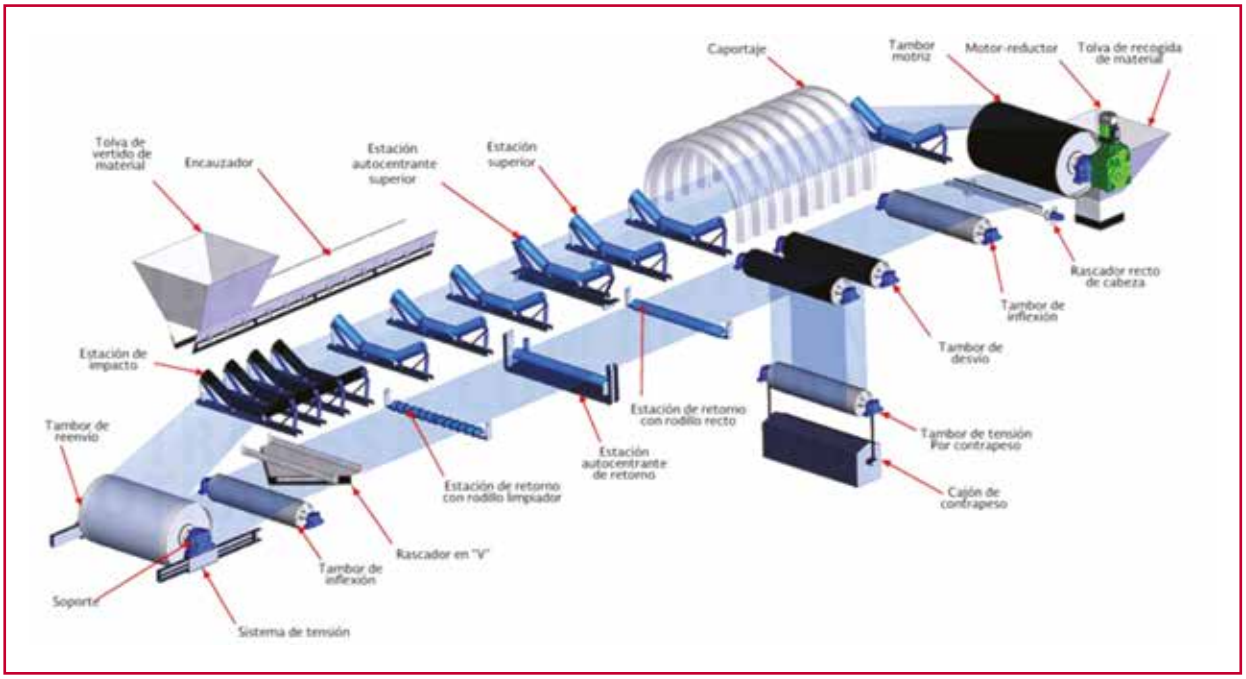
Para prolongar la vida útil de la banda, los diseñadores deben establecer la tensión real de funcionamiento de la cinta de forma conservadora por debajo de su tensión nominal y comprobar la tensión inicial del transportador de carga para evitar sobrecarga de la banda. Los empalmes de la banda se vulcanizan para proporciona una vida más larga a diferencia de las juntas mecánicas. Las velocidades de banda más lentas también suelen alargar la vida de la misma, por lo que se sugiere una velocidad de alrededor de 30 m / min y una velocidad máxima aproximadamente un 50 por ciento mayor.

En el diseño de las secciones del transportador que están fuera de los edificios, los ingenieros deben considerar la protección contra el medio ambiente (lluvia, sol, viento, humedad, etc.). Como mínimo, se instala una cubierta para la lluvia de diámetro medio, sin embargo, una cubierta de tres cuartos con el acceso abierto del lado a favor del viento evita problemas de derrames y al mismo tiempo permite el acceso a las piezas para el mantenimiento. Los olores deben controlarse, los diseñadores pueden encerrar completamente el transportador y proporcionar ventilación. El recinto debe incluir placas con bisagras o fácilmente desmontables para permitir el acceso para el mantenimiento, la limpieza y la observación periódica de la cinta transportadora.

5.9.1.3. Bandas transportadoras especiales

Los fabricantes han desarrollado bandas transportadoras que superan algunas de las limitaciones mencionadas anteriormente. Por ejemplo, los transportadores con listones, cubos, o paredes laterales unidas a la banda pueden mover materiales con pendientes más pronunciadas. Un transportador patentado permite curvas horizontales y verticales. Otro utiliza dos planos convergentes, cinturones para encerrar completamente el material y permitir ascensos inclinados o verticales estables. Los ingenieros de diseño que seleccio-

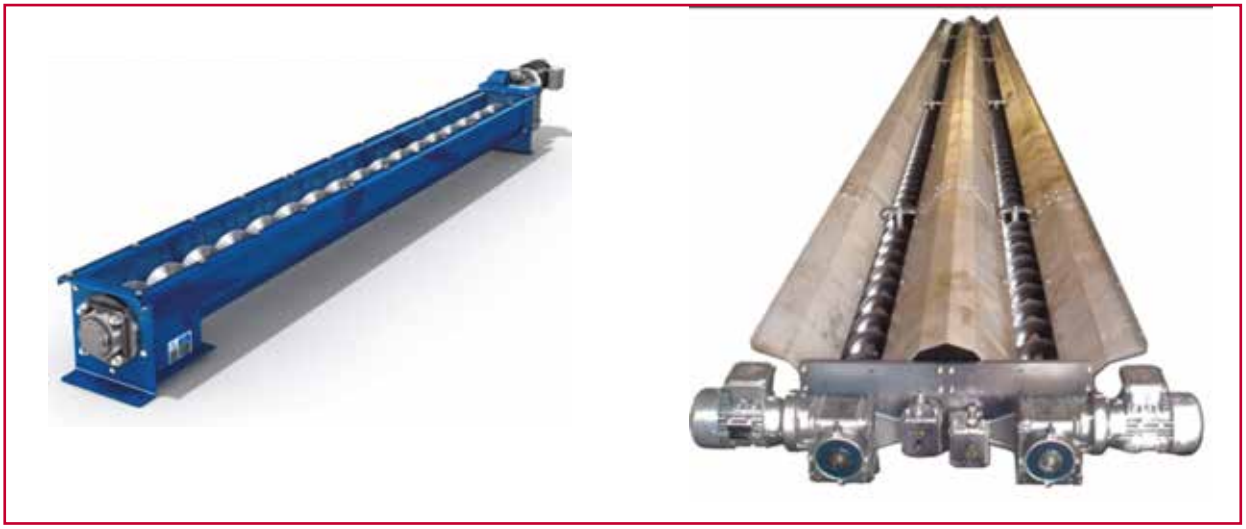
Ilustración 5.22 Partes de una banda transportadora



nen uno de estos transportadores deben discutir la aplicación con varios fabricantes y visitar instalaciones similares para comparar los costos de operación y evitar posibles problemas de diseño.

Por ejemplo, las bandas transportadoras con listones tienen componentes y consideraciones de diseño similares a las de planos, pero la banda es en realidad una serie de bolsillos superpuestos flexibles conectados individualmente por debajo a una cadena de transmisión (véase la Ilustración 5.22). Los sistemas de fijación permiten que el material se transporte en pendientes muy inclinadas sin sistemas de reflujo y permiten manejar tramos verticales y horizontales. Los ingenieros de diseño pueden crear un dispositivo giratorio para maximizar la elevación en un espacio relativamente pequeño.

Ilustración 5.23 a), b) Transportadoras tipo tornillo



Las bandas acanaladas son sustancialmente más caras y más difíciles de limpiar después de la descarga. Los cepillos giratorios y limpiadores en aerosol se usan para evitar el derrame excesivo en el recorrido del retorno de la banda. También, debido a que la unidad es más compleja, el desgaste es mayor y se corroe más rápidamente que las cintas transportadoras convencionales. Además, el cambio de una banda transportadora con poleas es más costoso y requiere mucho mantenimiento, ya que cada bolsillo debe ser retirado y sustituido de forma individual.

5.9.2. Transportadores de Tornillo

Los transportadores de tornillo empujan el material a través de una cuchilla helicoidal montada en un canal en forma de U o encerrado en un tubo. Las cuchillas pueden estar unidas a un eje central, o pueden ser sin eje. En el eje del transportador, un mecanismo de accionamiento hace girar el eje central, que se apoya por los cojinetes de la cabeza y los cojinetes de suspensión intermedios necesarios para reducir la flexión del eje. Se pueden reducir los ejes y cuchillas

Las cuchillas se fabrican en una amplia variedad de diseños y pueden tener secciones transversales completas o parciales (o ambos). Dos cuchillas que se cortan o pliegan pueden mezclar o doblar el material durante el transporte. El paso de la distancia horizontal entre las cuchillas puede variar a lo largo del eje.

5.9.2.1. Aplicaciones de los transportadores de tornillo

Los transportadores de tornillo se pueden utilizar para mover los sólidos en forma horizontal, vertical o a lo largo de un plano inclinado. Cuando se diseñan y utilizan correctamente, son un medio de transporte económico y confiable. Antes de seleccionar un transportador de tornillo, los ingenieros de diseño deben evaluar el material que transportarán. El contenido de agua y fluidez son particularmente importantes para transportadores inclinados y verticales.

Ilustración 5.24 Aplicación del transportador de tornillo

Ilustración 5.25 Tornillo lavador de arena, PTAR Tijuana B.C.

Los transportadores de tornillo estándar funcionan mejor cuando mueven el material horizontalmente sobre una distancia relativamente corta. Algunos transportadores de tornillo son de más de 150 m de largo, la mayoría de los que están en las plantas de tratamiento son de 9 a 12 m de largo. Los transportadores están disponibles en secciones que son alrededor de 3 a 4 m de largo, dependiendo del eje y el tamaño de la cuchilla. Por lo general se necesitan rodamientos de suspensión intermedios para reducir la flexión del eje.

Los transportadores helicoidales inclinados son menos eficientes que los horizontales y tienen diferentes criterios de diseño. La capacidad de un transportador de tornillo disminuye aproximadamente el 2 por ciento y su velocidad debe aumentar de manera significativa para compensar. Las velocidades de los transportadores inclinados y verticales típicamente son de 200 rpm o más, mientras que la velocidad de un transportador horizontal es de 20 a 40 rpm en una aplicación abrasiva. Los transportadores inclinados utilizan diferentes diseños de cuchillas comparados con los horizontales.

Los tornillos sinfin verticales están diseñados para la carga uniforme sobre las cuchillas, para evitar el embalaje o la unión del material. En los transportadores inclinados o unidades verticales las velocidades del eje son mayores y la acción centrífuga del tornillo ayuda al ascenso. Estos sistemas típicamente incluyen alimentadores horizontales

Ilustración 5.26 Mantenimiento de tornillo transportador

especiales. Los ingenieros deben consultar con los fabricantes en el diseño de los tornillos elevadores mayores de 6 m. Aunque algunos fabricantes permiten tornillos verticales de hasta 21 m , otros recomiendan un límite práctico de 7.6 m.

Los transportadores de tornillo para granos o sólidos se mueven generalmente en forma horizontal. Los transportadores inclinados se utilizan a veces para tortas deshidratadas. Los tornillos también se utilizan para la descarga de camiones con tolvas. Las compuertas tipo guillotina pueden ser manuales o automáticas dependiendo de la función del transportador inferior, como múltiples puntos de descarga. Los tornillos pueden controlar la alimentación de sólidos desde la tolvas, desde cualquier transportador de banda o desde la succión de las bombas de la torta.

5.9.2.2. Diseño y consideraciones de operación de un Transportador de tornillo

En el diseño de transportadores de tornillo, los ingenieros primero deben definir las propiedades del material, el volumen y la variabilidad. La capacidad de transporte es una función directa de la velocidad del tornillo, tamaño o diámetro de la cuchilla (suponiendo que el tamaño del eje permanece fijo) y la cantidad de carga. Algunos catálogos de fabricantes incluyen tablas y gráficos que ayudan a los ingenieros de diseño a determinar el tamaño preliminar de transportador en función de un rango de estas variables. Los diseñadores deben consultar con los fabricantes en el desarrollo de un diseño para una aplicación específica.

Algunos criterios de diseño específicos para plantas de tratamiento merecen ciertas consideraciones. Por ejemplo, los diseñadores deben evitar transportadores de tornillo si los desechos contienen palos, objetos grandes o materiales filosos.

Los transportadores de tornillo cerrados pueden reducir o eliminar los problemas de derrames y limpieza, pero son un poco más susceptibles a las interferencias y son de difícil acceso para el mantenimiento. Para sólidos viscosos como tortas deshidratadas, un diseñador debe evitar apoyo o suspensión con cojinetes intermedios, ya que pueden causar obstrucciones con algunos materiales generando paros. Los ejes más grandes y pesados por el espesor del mismo permiten mayores longitudes entre los cojinetes de apoyo; típicamente, ampliar el eje es más eficaz que el aumento del espesor de la pared.

Otros criterios de diseño incluyen materiales de construcción y configuración de la unidad. Por ejemplo, un transportador para materiales abrasivos y corrosivos (por ejemplo, la torta y el polvo deshidratado) debe tener cuchillas de un material fuerte. Las cuchillas de acero galvanizado se han utilizado con éxito para la torta deshidratada. Cuando se exponen a los residuos, las

Ilustración 5.27 Tornillo para transportar sólidos de microcriba

compuertas de salida deben tener piezas de acero inoxidable, ya que cualquier agua libre puede ocasionar problemas a las piezas mecánicas.

El accionamiento del transportador se monta en el extremo de descarga de modo que el eje esté en tensión durante el funcionamiento y no se deforme durante un atasco. El motor se puede conectar directamente o a través de una cadena de la banda o de la unidad. Si la capacidad diaria de la cinta varía de forma significativa, los diseñadores pueden utilizar accionamientos de velocidad variable para que coincida con la capacidad de transporte. Los rodamientos externos pesados deben ser situados fuera de la cinta transportadora. Los ingenieros de diseño normalmente especifican los sellos del eje con una glándula de embalaje de tipo compresión para evitar que el material abrasivo o líquidos corrosivos salgan hacia el exterior de la cinta transportadora o hacia el eje del cojinete.

Si el material tiene un alto ángulo de reposo, la parte de alimentación del transportador merece una consideración especial. Si el tornillo se alimenta desde una tolva, los lados de la tolva deben estar lo suficientemente inclinados y su abertura lo suficientemente grande como para evitar que el material salga a través de ella. Las cifras exactas dependen de la torta, pero como pauta general, la pared de la tolva deben tener no más de 30 a 35 grados respecto de la vertical y el área de abertura inferior de aproximadamente 1 m^2 como máximo y aproximadamente 0.6 m de largo. Para ayudar a eliminar el material de manera uniforme en la parte inferior de la tolva, el diámetro de las cuchillas se debe reducir gradualmente a medida que viaja a través del área de alimentación del tornillo o el área de cuchillas debe aumentarse.

Cuando se utilizan correctamente los transportadores de tornillo tienen menos requisitos de operación y mantenimiento que una banda transportadora. Debido a que pueden estar completamente cerrados, los transportadores de tornillo tienen sustancialmente menos requisitos de limpieza y control de olores. Cualquier abertura intermedia debe tener una cubierta que pueda quitarse fácilmente con bisagras u otro medio que pueda soportar la inspección o reemplazo. Si el control del olor es un problema significativo, el transportador de tornillo puede estar conectado a un sistema de ventilación en un punto justo pasando el extremo de descarga.

El acceso al transportador de tornillo para su inspección, mantenimiento o sustitución puede ser desde arriba o abajo, dependiendo de los requisitos de instalación. Típicamente, la cubierta del transportador de tornillo está unida en las secciones atornilladas que se pueden quitar según sea necesario. Para obtener acceso frecuente a ciertas áreas, tales como perchas intermedias, la tapa puede ser abisagrada en un lado. Están disponibles un gran variedad de arreglos de la cubierta fácilmente desprendibles. El acceso a la parte de abajo se puede proporcionar mediante la eliminación de secciones mínimas o mediante la instalación de bisagras especiales.

Los diseñadores deben suministrar manguera y drenajes de gran tamaño para que el personal pueda limpiar el transportador cuando se deban sustituir partes. Los transportadores inclinados o verticales deben tener el drenaje en un punto bajo para que cualquier líquido de reflujo se pueda drenar manualmente.

6

Acondicionamiento y espesamiento de lodos

6.1. Introducción

Los lodos que se generan en el tratamiento del agua tienen un alto contenido de agua que hace su volumen muy grande y causa dificultades en su manejo. Es por esto que el primer objetivo en el tratamiento de los lodos es reducir su volumen. El agua contenida en el lodo se clasifica en tres tipos de acuerdo a su combinación con las partículas sólidas: agua intermedia o intersticial (alrededor de 70 por ciento del volumen del lodo), agua de adhesión y capilar (alrededor de 22 por ciento) y agua interna y de adsorción (alrededor de 8 por ciento). Al aumentar la intensidad de los enlaces, se incrementa el consumo energía para la separación del agua.

Para remover el agua intersticial es suficiente la gravedad y el proceso que permite removerla se denomina espesamiento. Para remover el agua de adhesión y el agua capilar se aplican fuerzas físicas de presión o vacío en filtros, o campos de gravedad forzados artificialmente en centrífugas. A este proceso se le denomina deshidratación. Para remover el agua interna hay que eliminar previamente las paredes celulares por degradación biológica y posteriormente aplicar evaporación mediante calentamiento ligero, calentamiento intenso o congelamiento. A este proceso se le denomina secado (Mijaylova, 1999). En la Tabla 6.1 se presenta la reducción del volumen del lodo mediante los diferentes tratamientos físicos.

6.2. Objetivos

El objetivo del espesamiento de lodos es reducir su volumen, por ejemplo con el espesamiento si se reduce la concentración de sólidos entre 1 y 2 por ciento se reduce la mitad del volumen de lodo inicial. Otro objetivo del espesamiento es reducir los costos de inversión y operación de los sistemas de tratamiento de lodos (US, EPA, 1979).

Tabla 6.1 Reducción del volumen del lodo mediante tratamientos físicos, (Mijaylova , 1999)

Reducción del volumen del lodo, %	Proceso	Fuerzas físicas aplicadas	Contenido de agua en el lodo espesado,%
Hasta 35% del inicial	Espesamiento	Gravedad, filtración, flotación, aceleración centrífuga	85-95
35-15% del volumen inicial	Deshidratación	Sobrepresión o vacío, filtración, campos de gravedad reforzados artificialmente	60-85
15-5% del volumen inicial	Secado	Para lodo tratado biológicamente: evaporación natural, calentamiento ligero.	40-60 0-60

Dependiendo del proceso seleccionado el espesamiento también puede proporcionar los siguientes beneficios: mezcla de lodo, ecualización de flujo, almacenamiento de lodos, desarenado, extracción de gas y la clarificación del lodo (US, EPA, 1979).

6.3. Bases teóricas

6.3.1. Acondicionamiento químico de lodos, productos, dosis y selección

Los lodos o biosólidos se acondicionan químicamente para mejorar sus características de deshidratación.

6.3.1.1. Selección del proceso de acondicionamiento

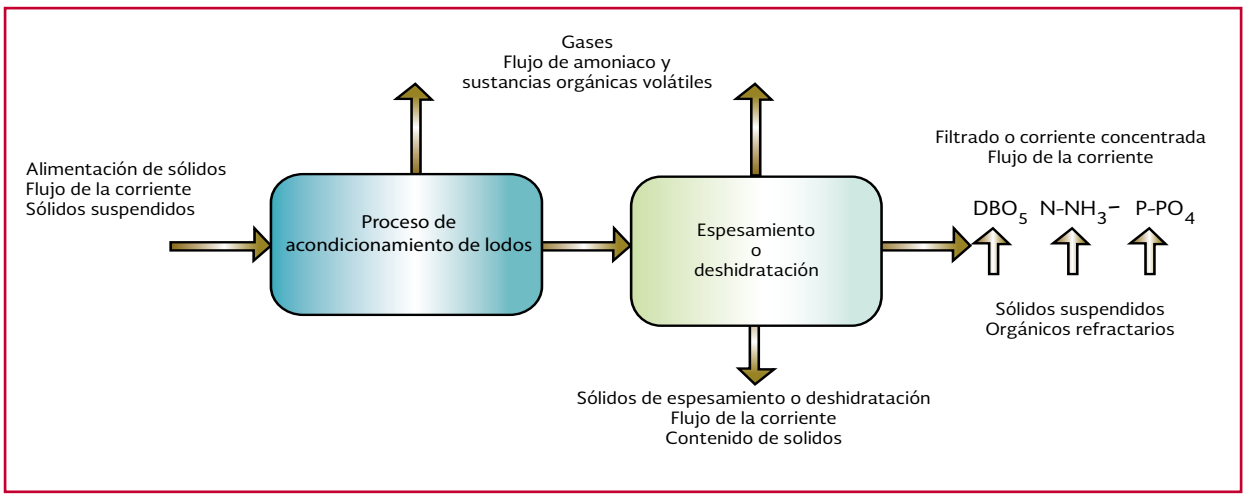
El acondicionamiento tiene un efecto sobre la eficiencia del proceso de espesamiento o deshidratación. Una evaluación del proceso de acondicionamiento por lo tanto, tiene en cuenta los costos de inversión y los costos de operación y mantenimiento de todo el sistema; el impacto de la corriente en otros procesos de la planta, en los efluentes y en la calidad del aire resultante (EPA, 1979). En la Ilustración 6.1 se muestra un diagrama de flujo para la evaluación de un sistema de acondicionamiento. Este tipo de análisis se requiere porque los procesos de acondicionamiento son diferentes y producen diferentes efectos sobre el sistema de tratamiento.

6.3.1.2. Factores que afectan el acondicionamiento

El tipo y dosis del agente químico necesario para el acondicionamiento depende de las características del lodo residual; manejo de los sólidos; de los procesos antes y después del acondicionamiento y del proceso de mezclado después de la adición del agente (WE, *et al.*, 2012).

Las propiedades de los lodos que deben considerarse son: el tipo u origen del lodo, la concentración de los sólidos, la edad de los lodos, el pH y la alcalinidad. El lodo primario, el lodo residual del proceso de lodos activados y los biosólidos estabilizados son buenos indicadores de la dosis de acondicionador requerida. La concentración de sólidos afecta la dosis y la dispersión del agente acondicio-

Ilustración 6.1 Parámetros básicos para la evaluación de un sistema de acondicionamiento de lodos, (EPA, 1979)



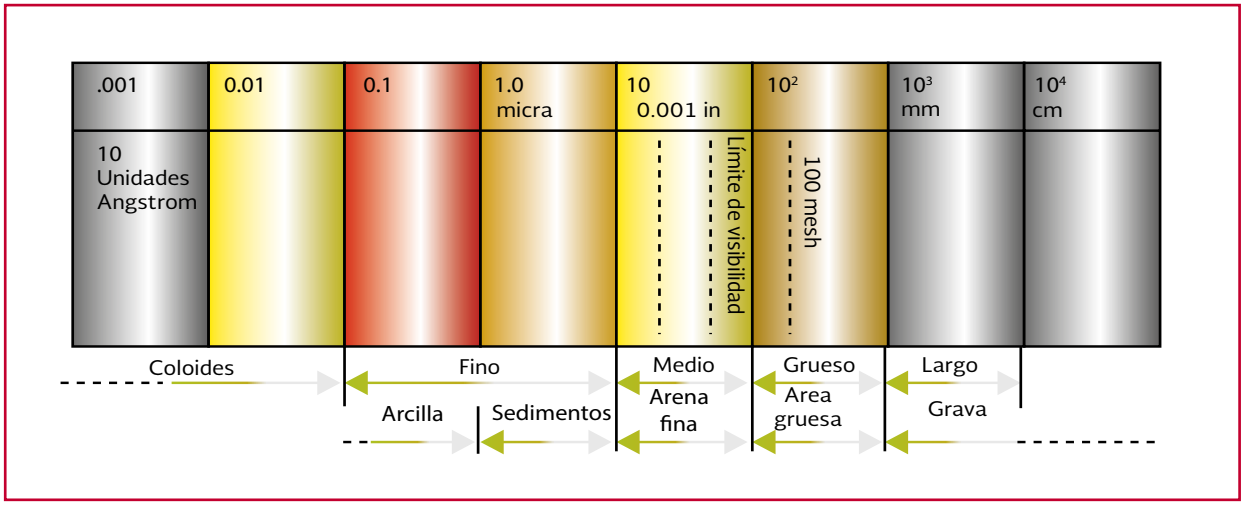
nador. El pH y la alcalinidad afectan el desempeño de los agentes acondicionadores, cuando se utilizan acondicionadores inorgánicos. Por ejemplo, cuando la cal se usa para mantener un pH alto, en la deshidratación, se producen fuertes olores a amoníaco y problemas de incrustación.

El método de deshidratación afecta la selección de los acondicionadores químicos dependiendo del equipo de mezclado seleccionado y de las características de cada método. Por ejemplo, los polímeros se usan comúnmente en las centrífugas y filtros prensas de bandas y con menos frecuencia para los filtros prensa. Es recomendable realizar pruebas a escala piloto en laboratorio para determinar los acondicionadores requeridos, particularmente para los lodos y biosólidos que pueden presentar problemas para la deshidratación (Metcalf & Eddy, 2003).

Otros factores importantes que afectan el acondicionamiento químico son (EPA, 1979):

- **El tamaño y la distribución de las partículas**. A medida que el tamaño medio de las partículas disminuye durante el mezclado, la relación superficie-volumen aumenta de forma exponencial. El aumento de superficie significa mayor hidratación, mayor demanda de productos químicos, y aumento de la resistencia a la deshidratación. En la Ilustración 6.2 se muestran los tamaños relativos de las partículas de los materiales que se encuentran en los lodos. Las aguas residuales municipales crudas contienen cantidades significativas de coloides y partículas finas, que debido a su tamaño (1 a 10 micras), no todas logran sedimentar si no se emplean la coagulación y la floculación. En los procesos biológicos, además de la eliminación de la DBO disuelta, también se eliminan parcialmente estos coloides y partículas finas de las aguas residuales. Debido a esto, los lodos biológicos, especialmente los lodos residuales del sistema de lodos activados son difíciles de espesar o deshidratar y también tienen una gran demanda de productos químicos para el acondicionamiento
- **La carga superficial y el grado de hidratación**: En su mayor parte, las partículas del lodo se repelen, en lugar de atraerse. Esta repulsión o estabilidad se debe a la

Ilustración 6.2 Distribución del tamaño de partícula de materiales comunes, (US, EPA, 1979)



hidratación o a efectos eléctricos. Con la hidratación una capa o capas de agua se unen a la superficie de la partícula, proporcionando un buffer que impide la aproximación de la partícula cercana. Además, los lodos residuales tienen carga negativa y por lo tanto tienden a ser repulsivos. El acondicionamiento se utiliza para superar los efectos de la hidratación y la repulsión electrostática.

- El acondicionamiento es un proceso que consiste de dos etapas: desestabilización y la floculación. En la desestabilización, se alteran las características de la superficie de las partículas de tal forma que se adhieren una a la otra. Este cambio deseable se produce a través del uso de un polímero natural excretado por los organismos del lodo activado; por un polímero orgánico sintético, o por sales de metales inorgánicos. La floculación es el proceso para proporcionar la posibilidad de contacto, por medio de una agitación suave, para que las partículas desestabilizadas pueden unirse
- El polímero orgánico sintético o la sal metálica inorgánica requerida para la desestabilización, se pueden conseguir fácilmente en el mercado pero representan un aumento en el costo de operación. La floculación natural puede realizarse pero es difícil de predecir ya que depende del tipo de sistema de lodos activados o del proceso de biomasa adherida diseñado o que se encuentre funcionando en la planta (EPA, 1979)

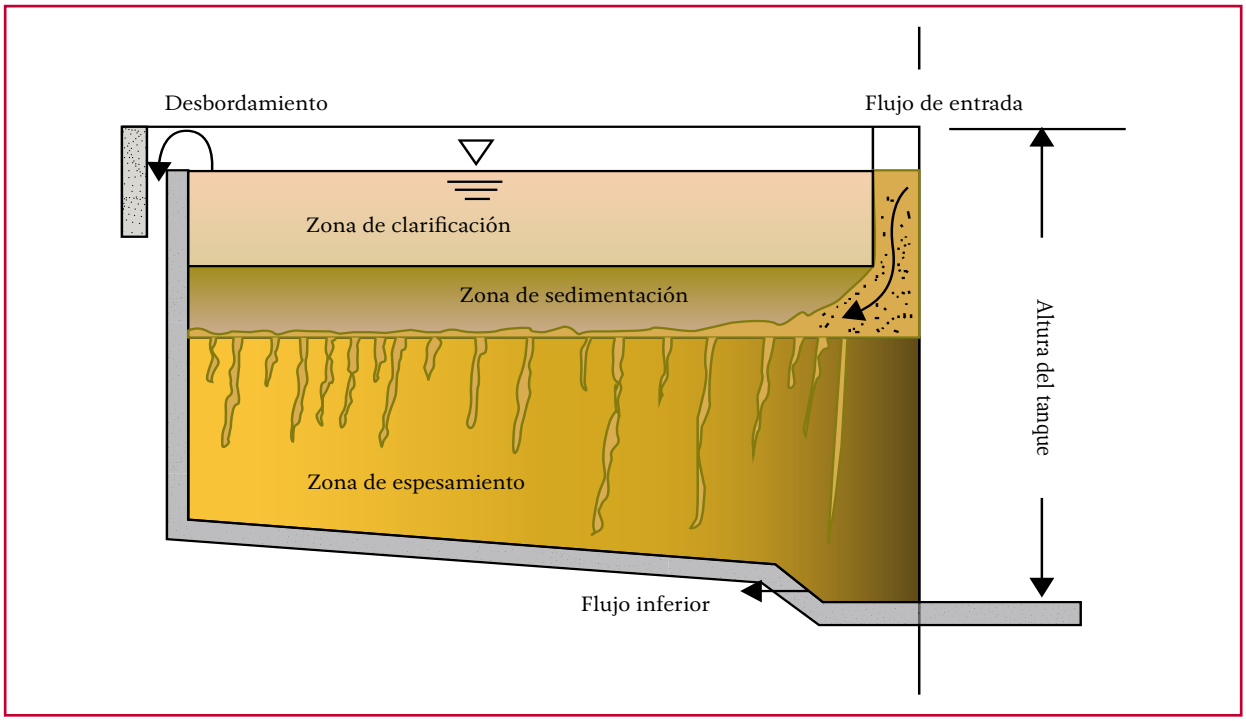
- **La interacción de las partículas**: Los lodos de aguas residuales municipales contienen un gran número de partículas coloidales y aglomerados, que tienen grandes áreas superficiales específicas. Inicialmente estas partículas se comportan de un modo discreto con poca interacción. A medida que la concentración de los lodos se incrementa la interacción aumenta. Como se muestra en la Ilustración 6.3 el comportamiento del floculante forma tres zonas distintas en un espesador por gravedad (EPA, 1979)
  - El acondicionamiento puede aumentar la velocidad en la zona de sedimentación, y la compresión del lodo en la zona de espesamiento, esto también puede mejorar la calidad del sobrenadante. Estas mejoras se obtienen dependiendo de la capacidad del acondicionador de neutralizar o incrementar la carga superficial, que a su vez permite que las partículas se adhieran unas con otras, preservando así la integridad dimensional de la matriz de lodo en la zona de espesamiento (EPA, 1979)

6.3.1.3. Dosis

La dosis requerida para algunos lodos se determina en el laboratorio. Las técnicas utilizadas para la selección de la dosis del reactivo químico son: la prueba del embudo Buchner para determinar la resistencia específica del lodo, la prueba para determinar el tiempo de succión capilar (TSC), la prueba estándar de jarras.

La prueba del embudo Buchner es un método que mide la velocidad de drenado o filtración del lodo y determina las características de deshidratación utilizando diversos agentes o reactivos químicos, (IMTA,1992). Esta prueba se deno-

Ilustración 6.3 Perfil de concentración típica de los lodos de aguas residuales municipales en un espesador por gravedad en continuo, (EPA, 1979)



mina resistencia específica de lodo y aparece en el anexo I).

La prueba de tiempo de succión capilar, se basa en la gravedad y el tiempo requerido para extraer el agua de una pequeña muestra de lodo acondicionado, de una hoja de papel de filtro grueso.

La prueba estándar de jarras, es un método sencillo de usar, consiste en utilizar volúmenes estándar de muestras de lodo (usualmente 1 L) con diferentes concentraciones de acondicionador, seguido de un mezclado rápido, floculación y sedimentación usando un aparato de prueba de jarras, (IMTA,1992) (Metcalf & Eddy, 2003).

En general se observa que el tipo de lodo tiene un gran impacto sobre la cantidad de los químicos requeridos. Los lodos con dificultad para deshidratar que requieren grandes dosis de químicos, no producen una torta seca y tienen una pobre calidad de filtrado o concentrado. A continuación se enlistan diferentes tipos de lodos, los cuales aparecen en un orden de incremento de dosis de reactivos químicos para el acondicionado (Metcalf & Eddy, 2003):

1. Lodo primario sin tratamiento
2. Mezcla de lodo primario y lodo de filtro rociador sin tratamiento
3. Mezcla de lodo primario y lodo del sistema de lodos activados sin tratamiento
4. Lodo primario estabilizado anaerobiamente
5. Mezcla de lodo primario y lodo del sistema de lodos activados estabilizado anaerobiamente
6. Lodos del sistema de lodos activados sin tratamiento
7. Lodo estabilizado aerobiamente

En algunos casos, la dosis varia considerablemente de los valores indicados o recomendados. La dosis de polímeros también varian dependiendo del

peso molecular, la fuerza iónica, y de los niveles de actividad de los polímeros usados. Se consulta a los fabricantes sobre la forma de preparar el polímero y las dosis sugeridas, sin embargo, lo más práctico es determinarlas en forma experimental por cualquiera de las técnicas mencionadas anteriormente. Las dosis de cloruro férrico y cal varian dependiendo del tipo de lodo.

6.3.1.4. Aplicación del acondicionador

Cuando se utilizan dos o más acondicionadores, la mejor forma para determinar la secuencia de aplicación de cada uno de ellos es por ensayo y error. Por ejemplo, si se utiliza cloruro férrico y cal, el cloruro férrico se añade normalmente primero. Además, se ha demostrado que el rompimiento o descompactación de los flóculos después del acondicionamiento se debe a una mala selección o aplicación de los reactivos químicos. Cuando se necesita una combinación de polímero aniónico y catiónico, se añade primero el polímero aniónico.

Con el fin de disminuir la fuerza cortante en la floculación, la mezcla debe proporcionar la energía suficiente para dispersar el acondicionador dentro del lodo. En las aplicaciones de deshidratación, se considera la posibilidad de aplicar el acondicionamiento químico a cada unidad de deshidratación, ya que no siempre es económico tener solo un sistema de acondicionamiento común para varias unidades. Los problemas pueden surgir por variaciones en el flujo o caudal de las diferentes corrientes, sobre todo en el arranque y paro de las diferentes unidades de deshidratación. Se debe optimizar o estudiar la ubicación de la unidad de acondicionamiento respecto al equipo de espesamiento o deshidratación.

6.3.1.5. Mezclado

El acondicionamiento requiere una mezcla completa del lodo con el coagulante. El mezclado no debe romper los flóculos formados y el tiempo de retención debe ser mínimo, de modo que llegue a la unidad de deshidratación tan pronto como sea posible.

El equipo de mezclado varía dependiendo del método de deshidratación. El filtro de bandas requiere de un tanque de mezcla y floculación separados. En un filtro prensa de placas el acondicionador se agrega directamente en la línea de alimentación de lodos y para la centrífuga se utiliza un mezclado en línea. La forma de mezclado se determina durante el diseño para considerar al menos dos ubicaciones para la adición de los acondicionadores químicos (Metcalf & Eddy, 2003).

6.3.1.6. Tipos de reactivos químicos utilizados para el acondicionamiento

El uso de reactivos químicos para el acondicionamiento de lodos y biosólidos reduce costos, incrementa el rendimiento de la operación y se obtiene una gran flexibilidad. El acondicionamiento químico reduce la humedad inicial en el lodo de 90 - 99 por ciento hasta un 65 - 85 por ciento, dependiendo de la naturaleza del mismo. El acondicionamiento químico propicia la coagulación de los sólidos y la liberación del agua absorbida en el lodo. El sistema de acondicionamiento se ubica antes de los sistemas mecánicos de deshidratación tales como centrífugas, filtros prensa de bandas y filtros prensa de placas. Los químicos usados incluyen cloruro férrico, cal, aluminio y polímeros orgánicos (Metcalf & Eddy, 2003).

El acondicionamiento químico incrementa la cantidad de sólidos en lodos y biosólidos. Los polímeros no la incrementan, mientras que las sales de hierro y la cal incrementan los sólidos secos en un 20 a 30 por ciento.

Los acondicionadores líquidos se miden y se aplican fácilmente. Si se utilizan químicos en polvo o grano, se requieren tanques para preparar la solución. En la mayoría de las plantas, estos tanques deben ser lo suficientemente grandes para suministrar el volumen requerido en un día y deben estar por duplicado.

En las plantas grandes, un tanque de almacenamiento debe ser suficiente para un turno. Los tanques se fabrican con un revestimiento resistente a la corrosión. Los materiales de protección más adecuados para recubrir los tanques y tuberías con soluciones ácidas son: El policloruro de vinilo (PVC), el polietileno y el caucho o hule. Las bombas dosificadoras deben ser resistentes a la corrosión. Son generalmente de desplazamiento positivo con velocidad variable o unidades de tiempo variable para el control de la velocidad de flujo.

Acondicionadores químicos inorgánicos

El acondicionador más utilizado en la práctica es el cloruro férrico solo o en combinación con cal (US EPA, 1978), aunque el sulfato ferroso y las sales de aluminio también se utilizan (EPA, 1979). Estos reactivos o sales también se aplican en las plantas de tratamiento para la remoción de fósforo ya que forman un precipitado insoluble y en el tratamiento primario avanzado para mejorar la captura de sólidos, incluyendo algunos sólidos coloides (WEF *et al.*, 2012).

Si se utiliza cloruro férrico y cal, el cloruro férrico se añade primero. Se hidroliza en el agua formando complejos solubles de hierro cargados positivamente que neutralizan los sólidos del lodo de carga negativa, permitiendo que se unan. El cloruro férrico reacciona con la alcalinidad de bicarbonatos del lodo para formar hidróxidos que actúan como floculantes. La Ecuación 6.1. muestra la reacción de cloruro férrico con la alcalinidad de bicarbonato:

$$2FeCl_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 3CaCl_2 + 6CO_2$$

Ecuación 6.1

La cal hidratada se utiliza por lo general en combinación con sales de hierro férrico. Aunque cal tiene poco efecto sobre la deshidratación de los coloides, se utiliza para el control del pH, la reducción del olor y la desinfección. El carbonato de calcio ($CaC0_3$), formado por la reacción de la cal y bicarbonato, proporciona una estructura granular que aumenta la porosidad del lodo y reduce su compresibilidad (EPA, 1979). Dependiendo del tipo de lodos, el rango de dosis del cloruro férrico es de 2 a 10 por ciento (en base a los sólidos secos), y de cal de 5 a 40 por ciento (en base a los sólidos secos). Los lodos residuales del proceso de lodos activados requieren dosis altas de cloruro férrico. En la Tabla 6.2. se enlistan las dosis típicas de cloruro férrico y cal para diferentes lodos.

Los coagulantes inorgánicos menos usados son el sulfato ferroso líquido, el cloruro férrico anhidro, el sulfato de aluminio y el cloruro de amonio. Otros materiales inorgánicos (cenizas volátiles, polvo del horno de cementeras, carbón pulverizado, tierra de diatomeas, arcilla de bentonita y aserrín) se han usado para mejorar la deshidratación, incrementar los sólidos en la torta, y reducir la dosis necesaria de otros agentes acondicionadores (WEF *et al.*, 2012).

Las sales de hierro se agregan en dosis de 20 a 63 kg t^{-1} de sólidos secos en el lodo alimentado, incluso si se utiliza cal. La dosis de cal varía de 75 a 277 kg t^{-1} de sólidos secos en el lodo alimentado.

La elección de la sal férrica es más importante cuando va seguida de cal. El sulfato férrico seguido por la cal se deteriora más rápidamente y produce resultados menos significativos que los obtenidos con el cloruro férrico seguido por la cal. La formación de sulfato de calcio insoluble disminuye o afecta el desempeño de la deshidratación.

6.3.1.7. Cal y sus características

La cal esta comercialmente disponible en dos formas sólidas: piedras de cal viva (CaO) y cal hidratada en polvo ($Ca(OH)_2$). En cualquiera de sus formas, la cal, tiende a precipitar cuando está suspendida, formando incrustaciones de carbonato de calcio en el equipo, en las tuberías de conducción y en los tanques de almacenamiento. (WEF, *et al*., 2012).

Como acondicionador, la cal se usa para elevar el pH, el cual se reduce por la adición de cloruro férrico. Forma precipitados de carbonato de calcio e hidróxido de calcio, los cuales mejoran la deshidratación actuando como agentes de carga, aumentando la porosidad y disminuyendo la resistencia a la compresión. El hidróxido de calcio disuelto está menos disponible a valores altos de potencial de hidrógeno.

La cal viva se almacena bajo condiciones controladas debido a que un contacto prolongado con el

Tabla 6.2 Dosis típicas de cloruro férrico y cal para la deshidratación de lodos de aguas residuales municipales, (WEF, et al.,2012)

Aplicación	Tipo de lodos	Cloruro férrico, $FeCl_3$, g kg^{-1}	Cal, CaO, g kg^{-1}
Filtros al vacío	Lodo primario crudo	20-40	70-90
	Lodo residual crudo del sistema de lodos activados	60-90	0-140
	Mezcla de lodo crudo, primario + filtros rociadores	20-40	80-110
	Mezcla de lodo crudo, primario + lodos activados	22-60	80-140
	Mezcla de lodo crudo, primario + lodos activados + fosa séptica	25-40	110-140
	Mezcla de lodo crudo, primario + lodos activados + cal	15-25	Ninguno
	Lodo primario estabilizado anaerobiamente	30-45	90-120
	Lodo primario + lodo de filtros rociadores, estabilizado anaerobiamente	40-60	110-160
	Lodo primario +lodo del sistema de lodos activados, estabilizado anaerobiamente	30-60	140-190
Filtros prensa de placas	Lodo primario crudo	40-60	100-130
	Lodo del sistema de lodos activados, estabilizado anaerobiamente	60-90	180-230
	Lodo primario +lodo del sistema de lodos activados, estabilizado anaerobiamente	40-90	100-270
	Lodos del sistema de lodos activados + lodo de los filtros rociadores	40-60	270-360
	Lodo del sistema de lodos activados estabilizado anaerobiamente	70	360
	Lodo primario crudo + lodo de filtros rociadores + lodo del sistema de lodos activados	75	180

* Todos los valores mostrados son masa($FeCl_3$ o CaO) por unidad de masa de sólidos secos bombeados a la unidad de deshidratación.

dióxido de carbono en el aire húmedo causa que se desactive y se vuelva menos reactiva. Asimismo, el aire o el agua excesivamente dura (una alcalinidad mayor de 180 mg L^{-1} como carbonato de calcio) en una suspensión hidratada aumenta las incrustaciones de carbonato, y produce taponamiento en las bombas y tuberías de conducción.

6.3.1.8. Acondicionamiento químico con polímeros

La selección correcta del polímero requiere de un trabajo conjunto entre los proveedores de polímeros, los proveedores de equipos y el personal de operación de la planta. Las evaluaciones se hacen en el lugar y con los lodos específicos. El proceso de evaluación es continuo por la introducción de nuevos polímeros en el mercado. (EPA, 1979).

Los polímeros son productos químicos especializados de alto peso molecular y solubles en agua. Se sintetizan a partir de monómeros individuales, o mediante la adición química de monómeros o grupos funcionales, o son polímeros de origen natural.

Los polímeros catiónicos son ampliamente utilizados para el acondicionamiento de lodos, ya que la mayoría llevan una carga negativa. Las características de los lodos y el tipo de dispositivo de espesamiento o deshidratación utilizado determina los polímeros catiónicos que funcionan mejor y son más rentables.

Están disponibles en forma de polvos secos o líquidos. Los líquidos vienen como soluciones acuosas o emulsiones. La vida útil de los polvos secos es de varios años, mientras que la mayoría de los líquidos tienen vida útil de dos a seis meses y deben protegerse de las variaciones de temperatura ambiente durante el almacenamiento. En la Tabla 6.3 se describen los polímeros catiónicos secos más representativos. Esta tabla no muestra la gran variedad de tipos disponibles, pero sí muestra algunas diferencias en sus características y materiales.

En la Tabla 6.4 se describen diversos polímeros catiónicos líquidos, ya sea en forma disuelta o en emulsión. Estos polímeros eliminan la exposición al polvo y requieren mucho más espacio de almacenamiento. La selección de un material en forma líquida, en emulsión o polvo seco, por lo general depende de la comparación del costo- beneficio, facilidad de manejo y requisitos de almacenamiento.

Los Polímeros en solución actúan al adherirse a las superficies de las partículas del lodo produciendo:

- Desorción del agua de la superficie envolvente
- Neutralización de carga
- Aglomeración de pequeñas partículas por enlace interparticular

El resultado es la formación de una matriz o torta de lodo permeable capaz de liberar agua.

Tabla 6.3 Polímeros catiónicos en polvo, (US, EPA, 1979)

Tipo	Densidad catiónica relativa	Peso molecular	Dosis aproximada, $lb \cdot t^{-1}$
Copolímero de poliacrilamida	Baja	Muy alto	0.5-10
Copolímero de poliacrilamida	Media	Alto	2-10
Copolímero de poliacrilamida	Alta	Medio alto	2-10
Homopolímero de poliamina	Completa	Alto	2-10

6.3.1.9. Equipo utilizado para el acondicionamiento químico de lodos

El sistema de acondicionamiento químico de lodos debe contar con instalaciones especiales que incluyen:

- Almacenamiento de reactivos sólidos, líquidos o emulsiones
- Equipo de dosificación de sales o polímeros
- Bombas para la dosificación de reactivos químicos
- Tanques para la preparación y mezclado de las soluciones
- Sistemas de mezclado estático o en línea
- Bombas de transferencia del lodo acondicionado al punto de aplicación
- Tuberías, medidores de flujo, válvulas y accesorios

Los sistemas de acondicionamiento opera en forma manual o automática. Se diseñan para trabajar por lotes, para dosificar la cantidad necesaria para un día, o en forma continua.

Las bombas de dosificación generalmente son de desplazamiento positivo (diafragma, émbolo giratorio o cavidad progresiva), ver capítulo 5. Las transmisiones deberán proporcionar una salida variable. El equipo de mezclado varia dependiendo del químico seleccionado (seco o líquido), la viscosidad y las características del lodo.

Los polímeros generalmente se preparan en forma diluida con concentraciones entre 0.25 y 0.50 por ciento en peso y las sales inorgánicas al 1 por ciento en peso. Se requiere agua limpia para dilución, conectada a la descarga del tanque de mezclado; para diluir aún más la solución de polímero (es decir, hasta 0.05 - 0.01 por ciento en peso, de acuerdo a las indicaciones del fabricante); y para lograr una dispersión completa del polímero en el lodo.

Los materiales de los equipos o tanques se seleccionan de acuerdo al tipo de químico a utilizar. Si es corrosivo se utilizan tanques de fibra de vidrio, polietileno de alta densidad o acero recubierto con plástico o hule.

Sistema de preparación y dosificación de productos sólidos

Un diagrama de un sistema de preparación de polímero seco se muestra en la Ilustración 6.4. Se observa que está compuesto por una tolva para dosificación de polímero, un tanque de mezcla para la preparación de una solución stock, posteriormente el polímero se envía hacia otro tanque de mezcla o a un mezclador estático para una segunda dilución antes de enviarse al punto de aplicación.

Los reactivos sólidos, por ejemplo los polímeros se venden en sacos de 20 a 25 kilos. Si se va a utilizar un polímero en polvo este se debe guardar en un almacén ubicado dentro del mismo

Tabla 6.4 Ejemplo de Polímeros catiónicos líquidos, (US, EPA, 1979)

Tipo	Peso molecular	Porcentaje de sólidos
Poliamina terciaria	Bajo	30
Poliamina cuaternaria	Muy bajo	50
Homopolímero catiónico	De bajo a medio	16-20
Copolímero en emulsión	De bajo a medio	25-35

edificio de espesamiento o deshidratación. Diariamente se coloca el polímero en una tolva para dosificarse en forma continua. La tolva para la dosificación se construye en acero inoxidable, plástico o fibra de vidrio y dispone de un dosificador automático del polímero. Estos sistemas también se pueden adquirir directamente en el mercado. La Ilustración 6.5 presenta una tolva para dosificación de polímero.

Tanque de preparación de solución stock o madre

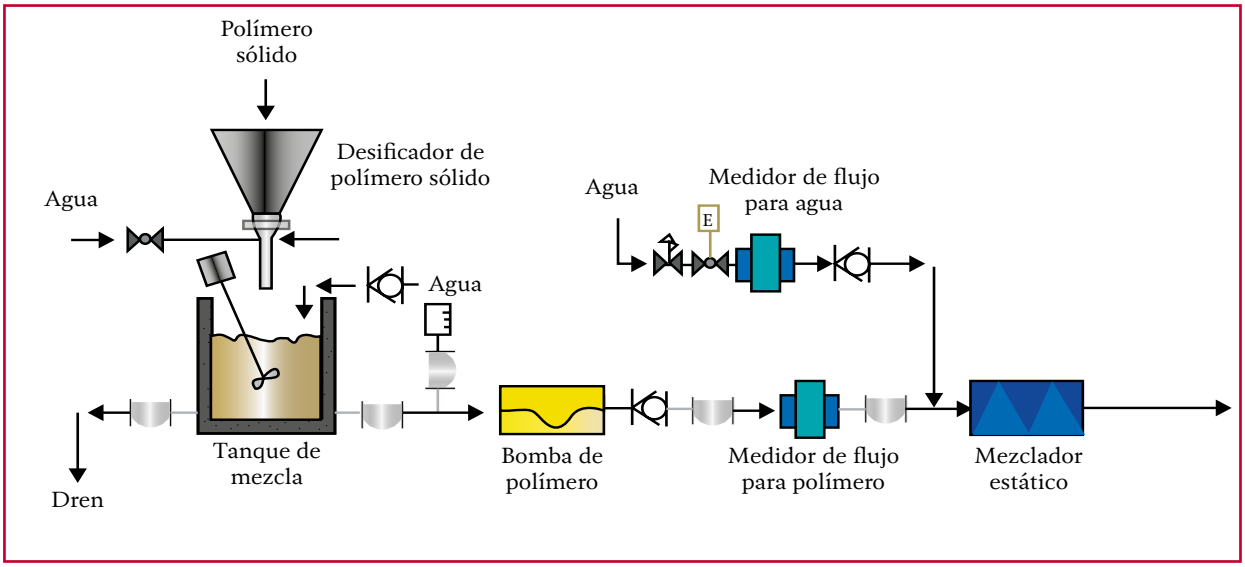
El polímero seco se conduce a un tanque de preparación de solución stock o solución madre. Este tanque trabaja en continuo y prepara una solución generalmente al 0.5 por ciento (5000 mg L^{-1}), o de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. El tanque se alimenta en forma continua con el polímero seco y agua limpia. Tiene un tiempo de retención entre 30 minutos y 2 horas, para garantizar la dilución y maduración de la solución de polímero. Este tanque se fabrica de plástico o de fibra de vidrio y con un sistema de agitación para mantener la solución bien mezclada, un medidor de flujo de agua y un indicador de nivel en el tanque de preparación.

Bomba dosificadora o de transferencia de polímero del tanque de preparación de solución stock al tanque de dilución de polímero o un mezclador estático

El polímero generalmente se dosifica a menores concentraciones, por lo que se requiere otra dilución para llevarse a una concentración menor que la solución stock, por ejemplo de 0.05

Ilustración 6.5 Tolva para dosificación de polímero

Ilustración 6.4 Sistema de dosificación de polímero sólido (WEF ,2012)



por ciento (500 mg L^{-1}). Por lo tanto la solución stock se transfiere a otro tanque o a un mezclador estático para preparar esta solución.

Para el bombeo de la solución stock se debe considerar su viscosidad y utilizar una bomba tipo diafragma o de cavidad progresiva.

Tanque de preparación de la solución de polímero o solución de trabajo

En este tanque se prepara la solución de trabajo que puede ser al 0.05 por ciento (500 mg L^{-1}), y se diseña para un tiempo de retención de 10 minutos. Recibe la solución stock o solución madre y se diluye con agua limpia o agua tratada. Este tanque es de plástico, metal o fibra de vidrio. Está provisto de un sistema de agitación mecánica para mantener la mezcla uniforme. En la Ilustración 6.6, se muestra un sistema de preparación de solución de polímero. Como se observa en la Ilustración 6.7, también se puede utilizar un mezclador estático.

Los tanques de preparación de soluciones con de polímeros se equipan con un agitador para mantener la mezcla uniforme, un medidor de flujo y un indicador de nivel.

Sistema de preparación y dosificación de polímero líquido

Los polímeros líquidos se almacenan en instalaciones bien ventiladas para evitar el escape de vapores y malos olores.

En una instalación típica para una operación discontinua (Ilustración 6.8), por ejemplo un día, del tanque de almacenamiento de polímero líquido se bombea un determinado flujo hacia un mezclador estático donde se mezcla con agua y pasa al tanque de preparación de solución posteriormente se diluye hasta la concentración requerida en el punto de aplicación.

Los polímeros en emulsión, contienen un polímero de alto peso molecular concentrado en un solvente (aceite) y disperso en agua. Tienen la ventaja de tener alta concentración, son faciles de disolver y sin viscosidad. El sistema de almacenamiento y manejo del polímero en emulsión es similar al del polímero líquido. El polímero en emulsión se debe activar (disolver en agua) antes de usarse. La activación se hace en dos etapas. La primera etapa se denomina “inversión” y consiste en una agitación fuerte para dispersar la emulsión en agua. La segunda etapa es un período de reposo o de maduración para que el floculante se active completamente. El período de activación depende del polímero y es de hasta 30 minutos. En la Ilustración 6.9, se observa un sistema de dosificación de polímero en emulsión donde aparecen las bombas dosificadoras, el polímero en emulsión y la tubería de agua de dilución (color azul).

Ilustración 6.6 Tanques para la preparación de soluciones

Ilustración 6.7 Mezclador estático

Después de la preparación de la solución de polímero, éste se bombea hacia el punto donde se mezclará con el lodo residual para espesamiento o la deshidratación. Si el espesamiento o la deshidratación se realizan en un filtro prensa, filtro de bandas, o cualquier otro equipo excepto la centrífuga; el lodo y el polímero se mezclan en un tanque para que se realice la coagulación y floculación. Si el equipo es una centrífuga, el lodo y el polímero se llevan directamente a la entrada de la centrífuga, o se mezclan en línea unos metros antes.

6.3.2. Otros tipos de acondicionamiento

Existen otros métodos de acondicionamiento. El tratamiento térmico y el congelamiento y descongelamiento, son poco utilizados o se encuentran en fase experimental (Metcalf & Eddy, 2003).

6.3.2.1. Tratamiento térmico

El tratamiento térmico se usa para el acondicionamiento y estabilización de lodos, pero no es común en nuevas instalaciones. Involucra el calentamiento del lodo por cortos períodos de tiempo. Coagula los sólidos, rompe la estructura gelatinosa del lodo y disminuye la afinidad del agua y el lodo. Como resultado, el lodo se esteriliza y deshidrata facilmente. El sobrenadante de las unidades del tratamiento térmico es alto en DBO y requiere de un tratamiento especial antes de regresarse al inicio de la planta de tratamiento de aguas residuales.

Las ventajas del tratamiento térmico son: 1) el contenido de sólidos en el lodo deshidratado al-

Ilustración 6.8 Sistema de dosificación de polímero liquido

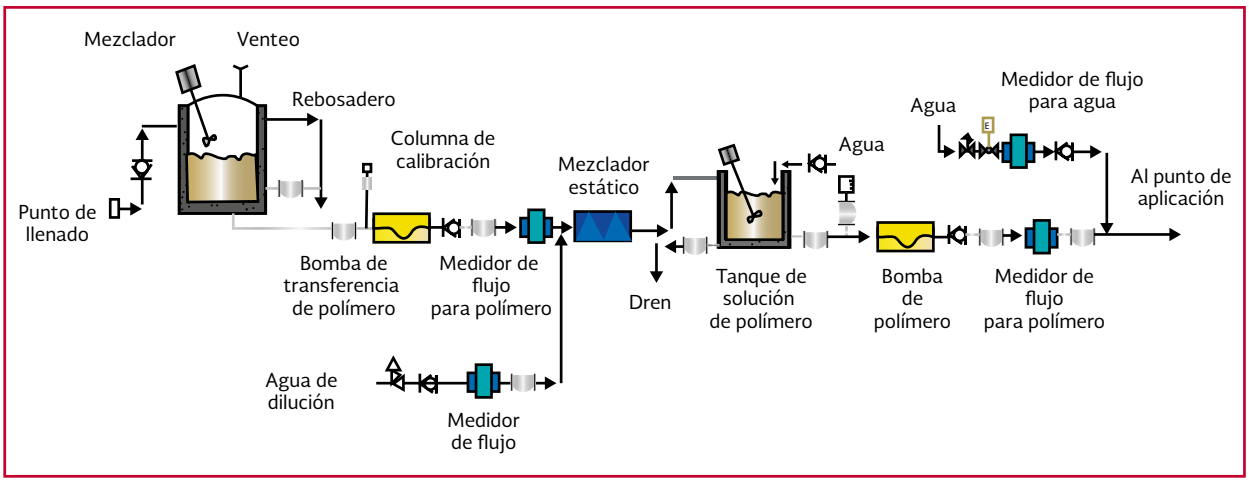


Ilustración 6.9 Sistema de dosificación de polímero en emulsión (Cortesía de PTAR de Valle de Bravo, Estado de México)

canza entre un 30 a 50 por ciento, dependiendo del grado de oxidación, 2) el lodo no requiere acondicionamiento químico, 3) el proceso estabiliza el lodo y destruye la mayoría de los organismos patógenos, 4) la capacidad calorifica es de 28 a 30 kJ $(gSSV)^{-1}$ y 5) el proceso no cambia la composición del lodo.

Las principales desventajas asociadas con el tratamiento térmico son: 1) alto costo de capital debido a su complejidad mecánica y al uso de materiales resistentes a la corrosión, 2) supervisión estricta, operación especializada y requiere un programa de mantenimiento preventivo, 3) produce un corriente secundaria con alta concentración de materia orgánica, nitrógeno amoniacal y color, 4) produce gases olorosos que requieren captación , tratamiento y/o destrucción y 5) la formación de incrustaciones en los intercambiadores de calor, tuberías y reactores requieren lavado con ácido o chorros de agua de alta presión. A causa de estas desventajas, ha disminuido el interés en el tratamiento térmico.

6.3.2.2. Precalentamiento del lodo

El acondicionamiento térmico del lodo a una temperatura de 60°C en pruebas piloto de centrífugas, que utilizan una etapa secado con calor, incrementa un seis por ciento la concentración de sólidos de la torta. La desventaja del proceso es el incremento en la DBO soluble en el concentrado o sobrenadante que al recircularse incrementa la carga en el afluente de la planta de tratamiento. Otro factor que debe considerarse cuando se evalúe esta opción es la fuente y el costo de producción del calor. Si el calor se obtiene de otra fuente que de otro modo se desperdiciara, el precalentamiento del lodo es un método de acondicionamiento efectivo y económico para mejorar el desempeño de la deshidratación (Metcalf & Eddy, 2003).

6.3.2.3. Acondicionamiento por el método de congelar y descongelar

Es un hecho bien conocido que la congelación natural del agua y de las aguas residuales de plantas de tratamiento de climas fríos mejora sus características de deshidratación. La congelación y descongelación cambian la consistencia gelatinosa de los lodos por un material granular que drena fácilmente. Resultados similares se alcanza usando equipos mecánicos de congelamiento y descongelamiento (Metcalf & Eddy, 2003).

Los lodos contienen diferentes tipos de agua: agua libre, agua intersticial, agua superficial y agua enlazada. El agua libre se refiere al agua que rodea o contiene el lodo, pero no se mue-

ve con los sólidos. El agua intersticial se define como el agua que "es atrapada dentro de la estructura de los flóculos y viaja con el flóculo o está enlazada por las fuerzas de capilaridad entre las partículas". El agua superficial se mantiene en la superficie de los flóculos y no puede ser removida por medios mecánicos. Finalmente, el agua enlazada es la que se une a las partículas y sólo puede ser liberada por la destrucción termoquímica de las partículas (Verselind & Matel, 1990).

Cuando el lodo se congela, el agua libre empieza a congelarse. Como el agua libre se une por cristalización, esta busca más agua libre para unirse y crecer mientras empuja las partículas de flóculo al frente del hielo. Una vez que el agua libre se congela, el agua intersticial se extrae por difusión y se añade a la estructura cristalina creciente (Metcalf & Eddy, 2003)

La concentración inicial de sólidos en el lodo, la velocidad de congelamiento y tiempo de congelamiento se consideran variables importantes en la optimización del proceso (Parker, *et al.*,200). La concentración de sólidos en el lodo residual es importante para definir el tamaño del equipo de congelamiento. Realizar un espesamiento antes del congelamiento disminuye el tamaño del equipo y reducie el consumo de energía. La velocidad de congelamiento y el tiempo de congelamiento están muy relacionados. El tiempo de congelamiento es aquel en el cual el lodo se mantiene a temperaturas bajo cero y permite que el lodo que fue congelado pueda deshidratarse completamente.

La temperatura que alcance la parte interna de los flóculos congelados es crítica para poder separar el agua enlazada. Para un tratamiento efectivo, el lodo debe congelarse por lo menos 30 minutos a una temperatura menor de -10 a -20 °C. El tiempo para llegar a la temperatura de congelamiento varía dependiendo del tamaño del bloque del hielo y de la concentración de sólidos. Después de la descongelación y deshidratación, la torta de lodo deshidratado puede tener una concentración de sólidos entre 25 y 40 por ciento con un filtrado que es muy bajo en SST. (Metcalf & Eddy, 2003).

6.3.3. Acondicionamiento para el espesamiento de lodos

6.3.3.1. Espesamiento por gravedad

En el espesamiento por gravedad normalmente no se considera la adición de polímero ya que se incrementan los costos de operación. Sin embargo, la experiencia indica que la adición de polímero a un espesador por gravedad puede tener los beneficios que aparecen a continuación: (EPA, 1979):

- Captura mayor cantidad de sólidos que una unidad que no recibe adición de polímero
- Permite una tasa de carga de sólidos dos a cuatro veces mayor que las unidades que no reciben adición de polímero
- Mantiene la misma concentración de sólidos en el fondo como una unidad que no recibe adición de polímero

Cuando los polímeros se utilizan para el espesamiento por gravedad, se dosifican en la línea de alimentación de lodos. El punto de adición debe proporcionar una buena mezcla y evitar que el flóculo se rompa antes de la descarga de los lodos acondicionados al espesador.

Aunque los polímeros son la primera opción para el acondicionamiento de lodos, también se utilizan las sales de aluminio y hierro con y sin cal. En la Tabla 6.5. se presentan dosis de cloruro férrico y cal utilizadas en el acondicionamiento de lodos para espesadores por gravedad.

Para el espesamiento de lodos primarios se usa aproximadamente 2 a 4.5 g de polímero activo por kg de sólidos secos y permite una carga superficial de sólidos de aproximadamente 22 a 34 kg m^{-2} d^{-1}. En el espesamiento de lodos residuales del sistema de lodos activados se utiliza aproximadamente 4.5 a 6.0 g de polímero por kg de sólido seco se puede incrementar la carga superficial a 12 a 16 kg m^{-2} d^{-1}. La dosis de polímero esta entre 1.5 a 3 g kg^{-1} (en base a sólidos secos) cuando es lodo primario crudo y de 4 a 6 g kg^{-1} cuando el lodo es estabilizado anaerobiamente.

6.3.3.2. Espesamiento por flotación

El acondicionamiento químico no es necesario para el espesamiento de lodos por flotación si es baja la velocidad de carga de sólidos e hidráulica. El acondicionamiento químico de lodos puede mejorar la concentración de sólidos flotantes cuando se requiere una velocidad de carga de sólidos alta o la compactación es débil y el índice volumétrico de lodos (IVL) es alto. Aunque el incremento de sólidos flotantes es relativamente pequeño, los polímeros pueden aumentar la concentración de sólidos flotantes en un 4 por ciento para los lodos residuales generados en el sistema de lodos activados (WEF, 2012).

Se utilizan polímero catiónicos con moderada carga y alto peso molecular. Sin embargo, los polímeros catiónicos de baja carga están comenzando a mostrar un mejor desempeño. Las dosis típicas están dentro del rango de 2 a 5 g kg^{-1} y hasta 7.5 g kg^{-1} de sólidos secos.

Un problema encontrado en el acondicionamiento es el mezclado del lodo con los acondicionadores. Para mitigarlo, se debe usar una solución de polímero más diluida (0.25 a 0.5 por ciento), o el floculante se mezcla a presión, antes del contacto con el lodo.

6.3.3.3. Espesamiento por centrífugas

El espesamiento por centrífugas se realiza utilizando centrífugas de disco o platos, de canasta no perforadas y centrífugas de tornillo. La centrífuga disco o platos no utiliza acondicionamiento de lodos con polímeros, ya que depende únicamente de la fuerza centrífuga (G = 3.000 a 5.000) para lograr la separación sólido-líquido. La centrífuga de canasta puede o no utilizar la adición de polímero. La dosis de polímero está en el rango de 0.5 a 1.5 kg ton^{-1} de polímero seco por tonelada de lodos. La adición de polí-

Tabla 6.5 Dosis típicas de acondicionadores químicos para el espesamiento por gravedad (WEF et al., 2012)

Tipo de sólidos	Naturaleza de los lodos y dosis de los químicos			
	Lodo crudo		Estabilizado anaerobio	
	Cloruro férrico ($FeCl_3$), mg L^{-1}	Cal viva (CaO), mg L^{-1}	Cloruro férrico ($FeCl_3$), mg L^{-1}	Cal viva (CaO), mg L^{-1}
Primario	1-2	6-8	1.5-3.5	6-10
Primario + filtro rociador	2-3	6-8	1.5-3.5	6-10
Primario + lodos del sistema de lodos activados	1.5-2.5	7-9	1.5-4	6-12
Lodos del sistema de lodos activados	4-6	No hay datos	No hay datos	No hay datos

mero incrementa la carga hidráulica y permite una mejor recuperación de sólidos. Esto no cambia la concentración de sólidos espesados (EPA, 1979).

Las centrífugas de tornillo normalmente requieren 10 kg ton^{-1} de polímero seco por tonelada de sólidos alimentados para el espesamiento de lodo, especialmente para los lodos residuales del sistema de lodos activados. Nuevas unidades desarrolladas para el espesamiento de lodo residual del sistema de lodos activados y para obtener un 85 a 95 por ciento de sólidos capturados con dosis de 0 a 3 kg ton^{-1} de polímero seco por tonelada de sólidos de alimentados.

Cuando el acondicionamiento con polímero se utiliza para el espesamiento de lodos por medio de centrífugas, varios puntos deben tomarse en cuenta. El punto óptimo de adición depende de la diferencia en las densidades de la carga del polímero, tiempos de reacción requeridos, y las características del lodo. Los puntos recomendados para la adición del polímero son (EPA, 1979):

- Directamente en la entrada lateral de la bomba de alimentación de lodos
- Inmediatamente después de la bomba de alimentación de lodos
- En la línea de alimentación de lodos antes de su conexión a la centrífuga

Los lodos residuales del sistema de lodos activados producen un flóculo débil que tiende a romperse dentro de la centrífuga. Una dosis arriba de 4 g kg^{-1} de polímero por kg de sólidos alimentados puede formar un flóculo más resistente. El lodo estabilizado aerobiamente y anaerobiamente tiene un flóculo pequeño, y requiere aproximadamente de 4 a 8 g kg^{-1} de polímero (WEF, *et al* , 2012).

6.3.4. Espesadores de lodos, tipos y características

Dependiendo de las fuerzas físicas utilizadas en el proceso de espesamiento se han desarrollado diferentes métodos para realizarlo: espesamiento por gravedad en tanques fijos, espesamiento por gravedad en bandas, espesamiento por flotación con aire disuelto, centrífugas y las menos comunes espesamiento rotatorio y espesamiento por membranas (WEF, *et al*.,2012).

6.3.4.1. Espesamiento por gravedad en tanques fijos

El espesamiento por gravedad en tanques fijos consiste en la separación del agua de los lodos en una fase superior líquida y otra inferior sólida, bajo la influencia de la gravedad.

Los espesadores se utilizan para los siguientes tipos de lodos:

- Para lodo primario o secundario no tratado
- El lodo de la etapa de sedimentación primaria tiene un contenido de agua relativamente bajo (95-97 por ciento), por lo cual puede llevarse directamente a los reactores. Este lodo puede espesarse para disminuir aún más el contenido del agua. Los resultados del espesamiento por gravedad de este lodo son excelentes. Si el lodo primario no presenta buenas características de compresión (algunos lodos de origen industrial), se espesa antes de someterlo a los tratamientos posteriores de acondicionamiento con coagulantes previo al espesamiento puede requerirse (Mijaylova , 1999)

- El espesamiento por flotación obtiene resultados similares, pero el análisis económico favorece los sistemas por gravedad
- Para lodo estabilizado. Lodos de los reactores anaerobios cuando solo existe una etapa de estabilización y lodo de los reactores aerobios. En este caso el espesamiento es una etapa antes de la deshidratación

El lodo de los sedimentadores secundarios (lodo biológico) tiene alto contenido de agua (99.8-99.9 por ciento). Este lodo requiere espesamiento antes de cualquier tipo de tratamiento posterior, ya sea estabilización biológica o que directamente se lleve a deshidratación. El espesamiento por gravedad se utiliza en la práctica a pesar de que la reducción del contenido del agua no es muy alta. El lodo espesado por gravedad alcanza un contenido de agua de 97-98 por ciento. Para este lodo es más efectivo el espesamiento por flotación con aire disuelto, el cual permite reducir el contenido de agua en el lodo tratado a 95-96.5 por ciento (Mijaylova, 1999).

Para mezclas de lodo primario y secundario se utiliza frecuentemente el espesamiento por gravedad. Se obtiene un lodo con un contenido de agua de 94 a 96 por ciento.

Los espesadores estáticos gravitacionales son generalmente tanques circulares cuyo fondo tiene forma de tolva, con una profundidad hasta 5 metros. La profundidad de la capa de lodo se mantiene entre 0.6 y 2.4 metros. Los espesadores cuentan con estructuras sobre las cuales se montan rastras de recolección del lodo y varillas verticales que se desplazan lentamente a través del lodo formando canales que permiten el ascenso del agua. La instalación del sistema de varillas facilita el proceso de espesamiento. Un esquema del espesador se presenta en la Ilustración 6.10 (Mijaylova, 1999).

En la Ilustración 6.11. se muestra un perfil de concentración de lodos de aguas residuales municipales en un espesador por gravedad en fun-

Ilustración 6.10 Espesador estático gravitacional de lodo con sistema de varilla, (Mijaylova, 1999)

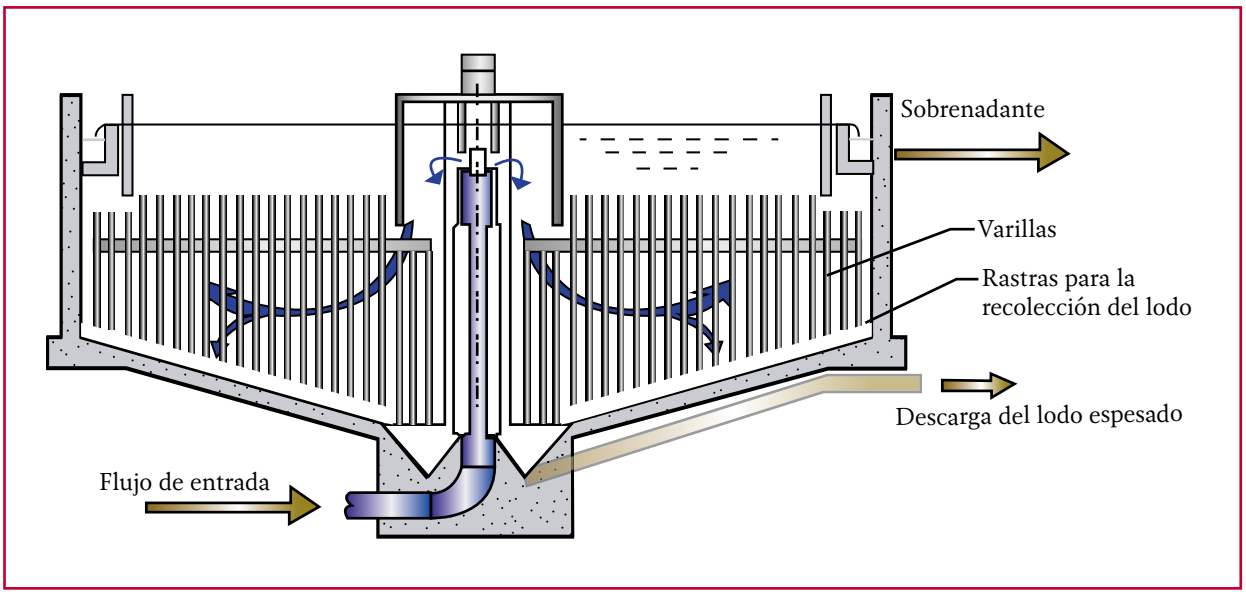
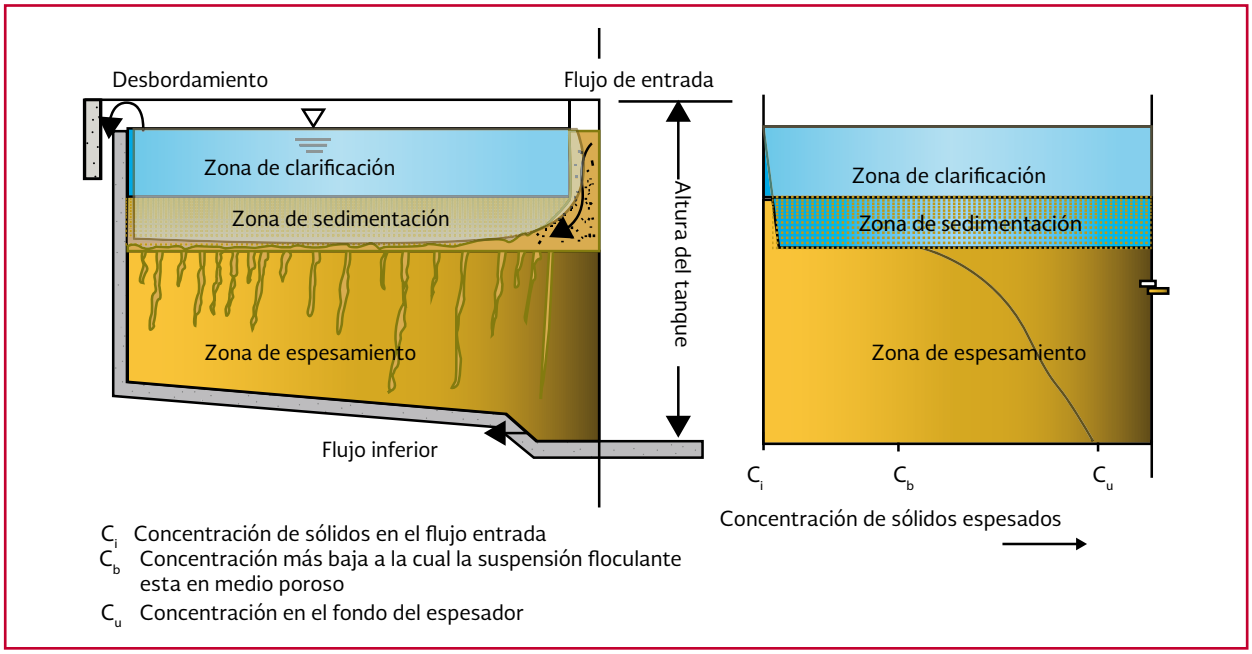


Ilustración 6.11 Perfil de Concentraciones típicas de los lodos de aguas residuales municipales en un espesador de gravedad en operación continua, (EPA, 1979)



cionamiento continuo. El lodo se introduce por bombeo en la parte central del espesador. Se distribuye uniformemente mediante una estructura de infuencia que posee dispositivos para reducir la velocidad y para espaciarlo (EPA, 1979). El sobrenadante es recolectado en la superficie por medio de una canaleta periférica con vertedores. Mamparas sumergidas, instaladas delante del vertedor evitan que el lodo flotante pase a las canaletas. En la superficie se instalan recolectores para este lodo flotante. El lodo se comprime en el espesador y se acumula en la parte inferior. Mediante rastras se recolecta en la tolva central de donde se extrae y envia para su tratamiento posterior. El sobrenadante de los espesadores tiene alta carga orgánica (hasta 1 500 mg L^{-1} de DBO) y sólidos suspendidos (de 300 a 1 000 mg L^{-1}), por lo cual se envía a los sedimentadores primarios de la plantas (EPA, 1979).

El área del espesador se determina con la carga superficial de sólidos. En la Tabla 6.6 se presentan valores de este parámetro recomendados para tratamiento de diferentes tipos de lodos y la concentración de sólidos que puede lograrse con el espesamiento. Para mantener condiciones aerobias en los espesadores, la carga superficial hidráulica debe ser entre 24 y 30 $m^3\ m^{-2}\ d^{-1}$. El tiempo de retención de los sólidos en el espesador (volumen de la capa de lodo comprimido / flujo de lodo espesado) puede variar en el rango de 0.5 a 20 día. Los tiempos de retención bajos se manejan en el periodo de verano (Mijaylova, 1999).

6.3.4.2. Espesamiento por flotación

La flotación es un procedimiento para separar partículas sólidas de una fase líquida. La flotación de los sólidos se crea normalmente por la introducción de aire en el sistema. Las burbujas finas se adhieren o son absorbidas por los sólidos que se levantan a la superficie. Las partículas con mayor densidad que la de los líquidos se pueden separar por flotación (WEF, *et al.*, 2012).

Tabla 6.6 Concentraciones típicas de lodos no espesados y espesados y cargas superficiales de sólidos recomendadas para el diseño de los espesadores, (Metcalf & Eddy, 2003)

Tipo de lodo	Concentración de los sólidos en el lodo, por ciento		Carga superficial de sólidos
	No espesado	Espesado	kg m^{-2} d^{-1}
Lodo primario	2-6	5-10	100-150
Lodo secundario de sistemas con biofiltros	1-4	3-6	40-50
Lodo secundario de biodiscos	1-3.5	2-5	35-50
Lodo secundario del sistemas de lodos activados	0.5-1.5	2-3	20-40
Lodo secundario del sistema de lodos activados usando oxigeno de alta pureza	0.5-1.5	2-3	20-40
Lodo secundario del sistema de lodos activados con aeración extendida	0.2-1.0	2-3	20-40
Lodo primario estabilizado anaerobiamente	8	12	120
Mezcla de lodo primario y lodo secundario de los filtros percoladores	2-6	5-9	60-100
Mezcla de lodo primario y lodo secundario de sistemas con biodiscos	2-6	5-8	50-90
Mezcla de lodo primario y lodo secundario de sistema con lodos activados	0.5-1.5 2.5-4.0	4-6 4-7	25-70 40-80
Mezcla de lodo secundario de sistemas de lodos activados y filtros percoladores	0.5-2.5	2-4	20-40
Lodo terciario con alta cal	3-4.5	12-15	120-300
Lodo terciario con baja cal	3-4.5	10-12	50-150
Lodo terciario con hierro	0.5-1.5	3-4	10-50

Existen tres versiones diferentes del proceso de flotación: flotación con aire disuelto, flotación al vacío y flotación con dispersión de aire. Solamente se utiliza la flotación con aire disuelto para el espesamiento de lodo.

En la flotación por aire disuelto, se generan burbujas pequeñas de gas (50-100 μm) como resultado del contacto de un gas a partir de una solución sobresaturada con ese gas. La sobresaturación se produce cuando el aire se dispersa a través de los lodos en un depósito cerrado, de alta presión. Cuando el lodo se retira del depósito y se expone a la presión atmosférica, el aire disuelto sale de la solución en forma de finas burbujas.

El segundo método, la flotación al vacío, la sobresaturación se produce cuando el lodo se somete a un vacío de aproximadamente 230 mm de mercurio en un tanque cerrado (EPA, 1979).

En un tercer método, flotación con dispersión de aire, burbujas de gas relativamente grandes (500-1000 μm) se generan cuando se introduce gas a través de un impulsor giratorio o a través de medios porosos (EPA, 1979).

A pesar de los tres métodos, el espesamiento por flotación se utiliza más para el espesamiento de lodos secundarios de procesos de tratamiento biológico con biomasa en suspensión, tales como los procesos de los activados o procesos de nitrificación. Otros lodos como el primario, filtros rociadores, lodos estabilizados aerobiamente y lodos con sales metálicas de procesos de tratamiento químico también utilizan este proceso. Una unidad típica utilizada para el espesamiento de lodos activados se presenta en la Ilustración 6.12 y en la Ilustración 6.13 se presenta un esquema de un sistema típico de espesamiento por flotación con aire disuelto (Metcalf & Eddy, 2003) (WEF, *et al.*, 2012).

En el proceso de espesamiento por flotación con aire disuelto, comúnmente conocido como DAF, por sus siglas en inglés, se añade aire a presión, por encima de la presión atmosférica, a la corriente de lodo entrante o a un porcentaje del líquido separado. Cuando la presión se reduce y se crea turbulencia, el aire en exceso, del requerido para la saturación a presión atmosférica, sale de la solución en forma de pequeñas burbujas de 50 a 100 µm de diámetro. Las burbujas se adhieren a las partículas en suspensión o se agrupan en una matriz de sólidos. Dado que la densidad media del agregado de sólidos-aire es menor que la del agua, el aglomerado flota en la superficie. Los sólidos flotantes forman una capa de varios centímetros de profundidad en la superficie del agua. El agua se drena desde la unidad de flotación por medio de vertedores. Los sólidos flotantes se separan continuamente por medio de rastras superficiales y se recogen en una tolva recolectora. Cuando el proceso tiene un buen desempeño los sólidos espesados

Ilustración 6.12 Esquema de un sistema de espesamiento por flotación con aire disuelto, (WEF, et al., 2012)

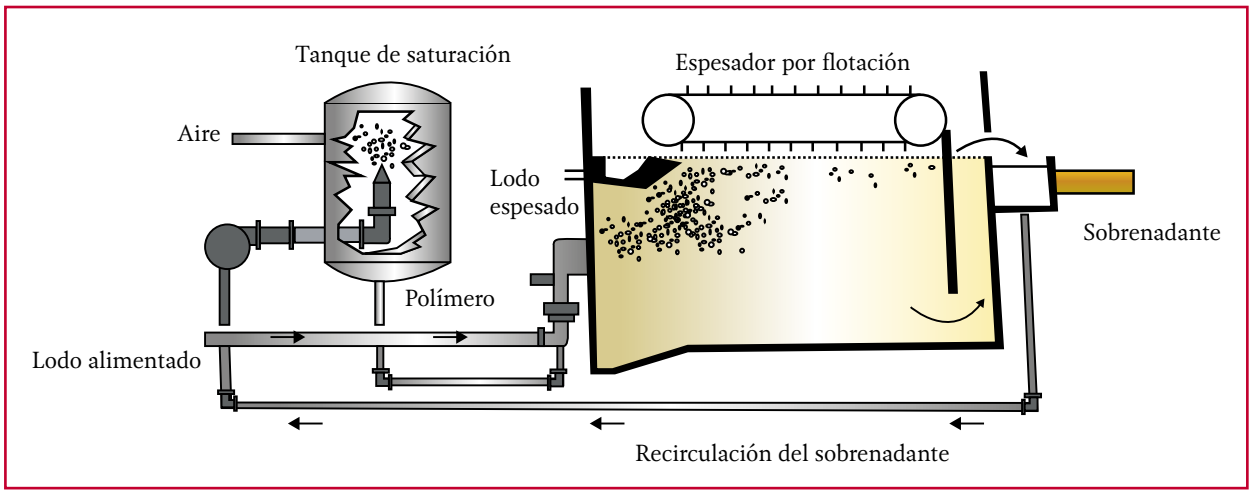
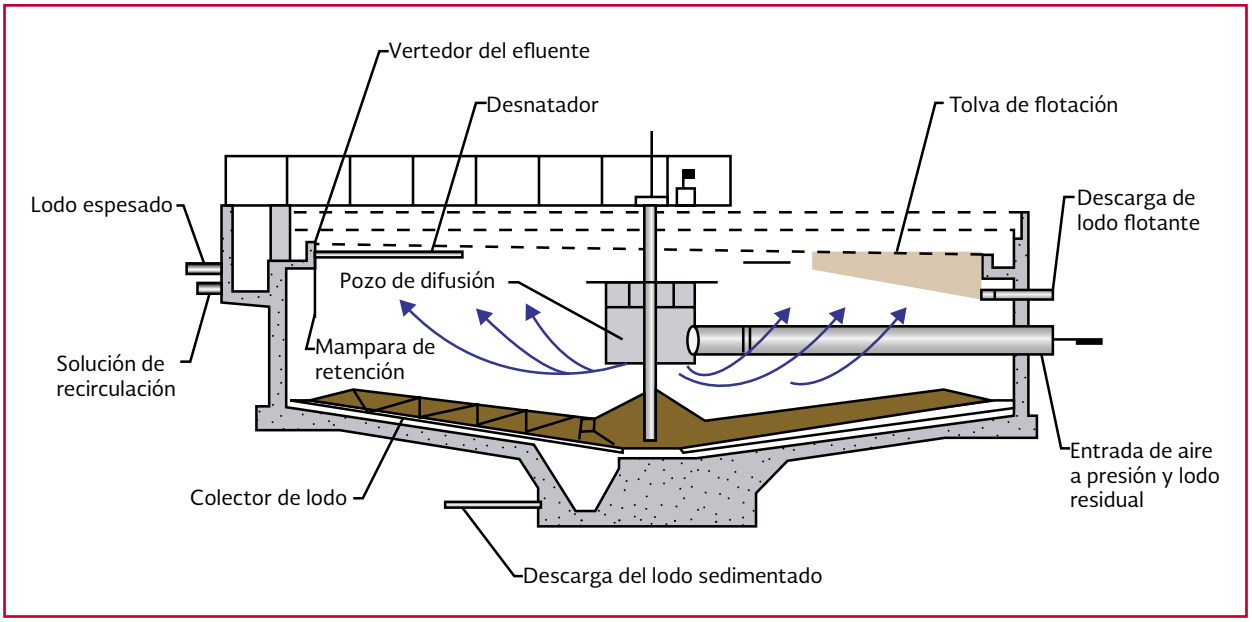


Ilustración 6.13 Unidad típica de espesamiento por flotación con aire disuelto para lodos activados residuales., (Metcalf & Eddy, 2003)



tienen una gravedad específica de 0.6 a 0.7 (EPA, 1979).

La concentración de sólidos que se puede obtener en el lodo activado residual removido por flotación depende principalmente de la relación aire-sólidos, de las características del lodo (en particular el índice de volumen del lodo, IVL), de la tasa de carga de sólidos y de la aplicación de polímero. Aunque las concentraciones de sólidos removidos por flotación están dentro de un rango de 3 y 6 por ciento en peso, la concentración de sólidos es difícil de predecir durante la etapa de diseño si no se cuenta con información en planta piloto (Metcalf & Eddy, 2003) (Mijaylova, 1999).

Tabla 6.7 Datos típicos de operación de los espesadores por flotación con aire disuelto, (WEF, et al., 2012)

Tipo de lodo[a]	Dosis de polímero, g kg^{-1} de sólidos secos	Carga de sólidos, kg m^{-2} d^{-1}	Concentración de los sólidos flotantes, por ciento	Sólidos suspendidos en el sobrenadante, mg L^{-1}	Referencia
Lodo secundario del sistemas de lodos activados	0	117	4.0		(Bare, *et al* ., 1975)
Lodo secundario del sistemas de lodos activados	0	63	6.5		(Bare, *et al* ., 1975)
Lodo secundario del sistemas de lodos activados	0	97	4.6		(EPA, 1979)
Lodo secundario del sistemas de lodos activados	1.0	376	4.0	50	(Bratby & Ambrose, 1995)
	7.5	247	5.3		(Komline, 1976)
Lodo secundario del sistemas de lodos activados	1.5	822	7.3	20	(Komline, 1976)
Lodo secundario del sistema de lodos activados con aireación extendida	1.0	376	4.0	50	(Komline, 1976)
Lodo secundario del sistemas de lodos activados para ser estabilizado	2.2	375	6.6		(Komline, 1976)
Lodo secundario del sistemas de lodos activados + lodo de biodisco	0	30	4.0	200	(Bratby & Ambrose, 1995)
Lodo del sistema de lodos activados con oxigeno	1.2	820	7.3	20	(Bratby & Ambrose, 1995)
Lodo secundario del sistemas de lodos activados con residuos de cervecería	0	68	3.0	750	(Noland & Dickerson, 1978
Lodo secundario del sistemas de lodos activados estabilizado aerobiamente	0	176	4.0		(Komline, 1976)

Tabla 6.7 Datos típicos de operación de los espesadores por flotación con aire disuelto, (WEF, et al., 2012) (continuación)

Tipo de lodo[a]	Dosis de polímero, g kg^{-1} de sólidos secos	Carga de sólidos, kg m^{-2} d^{-1}	Concentración de los sólidos flotantes, por ciento	Sólidos suspendidos en el sobrenadante, mg L^{-1}	Referencia
Lodo secundario del sistemas de lodos activados estabilizado aerobiamente	3.0	705	8.0		(Komline, 1976)
Lodo primario + Lodo secundario del sistemas de lodos activados	0	117	8.6		(EPA, 1979)
Lodo secundario del sistemas de lodos activados + lodo primario	0	88	6.1		(EPA, 1979)
Lodo primario + Lodo secundario del sistemas de lodos activados	1.2	111	6.2	300	(Butler, *et al*., 1977)
Lodo secundario del sistemas de lodos activados + lodo primario	0	223	7.1		(EPA, 1979)
Lodo secundario del sistemas de lodos activados + lodo primario	0	188	5.3		(EPA, 1979)
Lodo primario +lodo de filtros percoladores	0	147	4.8	500	(Komline, 1976)
Lodo primario + Lodo de filtros percoladores con sólidos del proceso de contacto	3.5	294	6.5	200	(Komline, 1976)
Lodo primario + lodo de filtros percoladores	0	147	5.0		(Butler, *et al*., 1977)
Lodo primario + filtros percoladores y sólidos de contacto	4.0	79	6.2	210	Datos de planta de 2008

Tabla 6.8 Carga de sólidos típicos de unidades de espesamiento por flotación con aire disuelto, (Metcalf & Eddy, 2003)

Tipo de lodo	Carga de sólidos, kg m^{-2} d^{-1}	
	Sin adición de productos químicos	Con adición de productos químicos
Licor mezclado del sistema de lodos activados con aire	1.2-3.0	Por arriba de 10
Lodos del sistema de lodos activados	2.4-4.0	Por arriba de 10
Lodos del sistema de lodos activados utilizando oxigeno de alta pureza	3.0-4.0	Por arriba de 10
Lodo de los filtros percoladores	3.0-4.0	Por arriba de 10
Lodo primario + lodo del sistema de lodos activados usando aire	3.0-6.0	Por arriba de 10
Lodo primario + lodo de filtros percoladores	4.0-6.0	Por arriba de 10
Lodo primario	4.0-6.0	Por arriba de 10

La relación aire-sólidos es el factor que más influye en el comportamiento del espesador por flotación y se define como la relación del peso del aire disponible para la flotación y los sólidos que flotarán en la corriente de alimentación. La relación aire-sólidos a la cual se maximiza la concentración de sólidos varía entre 2 y 4 por ciento (Mijaylova, 1999).

El índice volumétrico de lodos (IVL) es también importante ya que se reporta un buen desempeño cuando el IVL es menor a 200 mL g^{-1}, utilizando dosis de polímero típicas, (Tabla 6.7). Cuando el IVL es alto, la concentración del lodo flotante disminuye y se requieren altas dosis de polímero. La información acerca del funcionamiento de este sistema indica que para altas cargas superficiales (mayores de 470 kg m^{-2} d^{-1}) la concentración del lodo flotante disminuye.

La cargas superficiales de los espesadores por flotación varían de 0.5 a 1.4 g m^{-2} s^{-1} para producir un lodo flotante de 3 a 5 por ciento de sólidos totales. Si se adiciona polímero, la carga de sólidos se puede incrementar de un 5 hasta un 100 por ciento, obteniéndose un incremento en la concentración de sólidos de 0.5 a 1 por ciento. Los datos anteriores aplican para un lodo residual del proceso de lodos activados que tenga IVL menor o igual a 125 mL g^{-1} (Mijaylova, 1999).

Cuando las tasas hidráulicas incluyen la alimentación más la recirculación, los espesadores por flotación se diseñan hidráulicamente para operar en un rango de 0.3 a 1.41 L m^{-2} s^{-1}, con carga máxima sugerida de 0.5 L m^{-2} s^{-1}, asumiendo que no se utiliza adición de químicos (Mijaylova, 1999).

En la Tabla 6.7 se presentan algunos datos de operación de sistemas de espesamiento por flotación y en la Tabla 6.8 las tasas de carga superficial de sólidos recomendados para diferentes tipos de lodos acondicionados químicamente.

6.3.4.3. Espesamiento por gravedad en bandas

El espesamiento por gravedad en bandas es un desarrollo relativamente reciente del proceso de espesamiento. El lodo se concentra al liberar agua drenándola por gravedad a través de una banda horizontal. Se requiere que el lodo se acondicione químicamente utilizando polímero. Los espesadores por gravedad de banda

Ilustración 6.14 Equipo para espesamiento por gravedad en banda

son apropiados para el espesamiento de lodos activados y de lodos estabilizados para reducir el volumen antes de su transportación al sitio de disposición final. Ocasionalmente se utilizan para concentrar lodos primarios y algunos lodos químicos que sean particularmente difíciles de espesar (Mijaylova, 1999).

En un espesador de bandas, el polímero se aplica a la entrada del lodo, a través de un inyector o mezclador en línea. La tubería que transporta el lodo y un tanque de floculación provee el tiempo de retención requerido, aproximadamente de 20 a 40 segundos y condiciones de baja turbulencia para promover la floculación adecuada. El lodo floculado se dispersa uniformemente con ayuda de deflectores a lo ancho de la banda, la cual se mueve. En la Ilustración 6.14 se presenta un esquema de un equipo de espesamiento de gravedad por bandas. El agua liberada se drena a lo largo de toda la banda dejando los sólidos sobre la banda. Algunos fabricantes utilizan rastras para formar surcos en el lodo, lo que facilita el drenado del agua. Se utiliza una cuchilla para raspar la banda y eliminar los residuos de lodo y polímero de los poros de la banda. El agua que se drena de los lodos se recircula al proceso de tratamiento de aguas primario o secundario.

La captura de sólidos de lodos activados o de lodos estabilizados utilizando este tipo de espesadores por gravedad va desde 90 a un 98 por ciento, con una adición de polímero de 1.5 a 4.5 kg t^{-1}. En la Ilustración 6.15 se presenta un ejemplo de este tipo de espesadores.

Los principales elementos de los espesadores por gravedad en bandas son (WEF, *et al*., 2012):

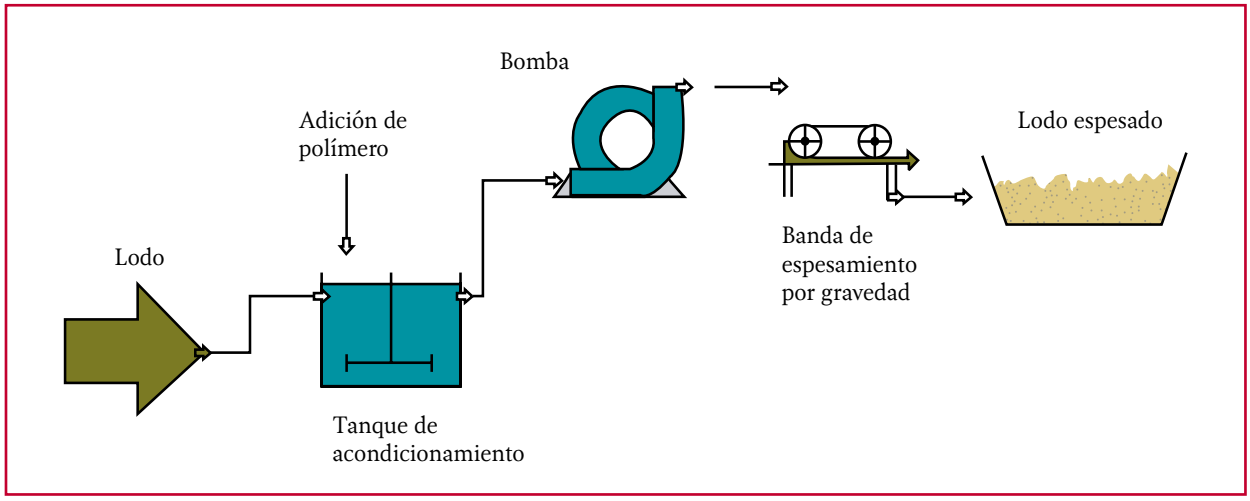
- Sistema para el condicionamiento y distribución del lodo, que consiste en la dilución de polímeros, transporte, mezclado, y coagulación subsecuente, tanque de floculación y distribuidor del lodo floculado sobre la banda
- Banda transportadora para la separación de líquidos-sólidos a través de la fuerza de gravedad, tolva para recolección de los lodos, sistema de recolección del filtrado y sistema de drenaje
- El mecanismo de tensado de la banda y sistema guía de la banda
- Sistema de lavado de la banda compuesto por rociadores y las bombas a presión
- Sistema de control incluyendo el panel de control maestro y varias alarmas

En la Tabla 6.9 se menciona la velocidad de carga hidráulica típica para espesadores por gravedad en bandas.

Tabla 6.9 Carga hidráulica típica de un espesador por gravedad en bandas, (Metcalf & Eddy, 2003)

Tamaño de la banda (ancho efectivo de deshidratación), m	Rango de carga hidráulica, L s^{-1}
1.0	6.7-16
1.5	9.5-24
2.0	12.7-32
3.0	18-47

Ilustración 6.15 Diagrama de flujo de un sistema de espesamiento por gravedad en bandas, (Mijaylova, 1999)



6.3.4.4. Espesamiento por Centrífugas

La centrífugación es una aceleración de la sedimentación a través del uso de la fuerza centrífuga. En un tanque de sedimentación, los sólidos caen al fondo y el líquido se mantiene en la parte superior. En una centrífuga, el tanque giratorio actúa como un tanque de sedimentación muy eficaz (EPA, 1979).

Las centrífugas se usan para espesamiento y deshidratación. El uso de las centrífugas en el proceso de espesamiento es limitado, normalmente se utiliza para lodo residual del sistema de lodos activados. El espesamiento por centrífugación involucra la sedimentación de las partículas del lodo bajo la influencia de la fuerza centrífuga. Las centrífugas más utilizadas para el espesamiento de lodo son las centrífugas de tazón sólido o de tornillo. En la Ilustración 6.16, se presenta un esquema de una centrífuga de tornillo para el espesamiento de lodos.

Los sistemas de espesamiento proporcionan ahorros significativos en el costo de almacenamiento de lodos y biosólidos, transporte y uso final o disposición. El espesamiento de lodos líquidos de 3 a 6 por ciento de sólidos totales reducirá el volumen en un 50 por ciento (US, EPA, 2000). El espesamiento se utiliza a menudo antes de la estabilización anaerobia o estabilización con cal para reducir los costos de capital de los equipos de estabilización, pero generalmente no se realiza antes de la estabilización aerobia convencional, ya que es difícil de suministrar suficiente oxígeno cuando los sólidos totales son mayores al 2 por ciento. El porcentaje de sólidos de la salida se puede variar mediante el cambio de los parámetros de funcionamiento de la centrífuga (Metcalf & Eddy, 2003).

Las centrífugas de tornillo consisten en un cilindro largo y cónico por un extremo montado horizontalmente (WEF, *et al.*, 2012). El lodo se introduce en forma continua al equipo y entra a un tornillo helicoidal el cual gira con una velocidad específica, separando el lodo del agua. El lodo se concentra en la periferia del tornillo y se mueve hacia el extremo cónico donde se descarga y el agua se recoge en el otro extremo del tornillo (Metcalf & Eddy, 2003).

Bajo condiciones normales, el espesamiento se realiza por medio de las centrífugas sin la adi-

Ilustración 6.16 Esquema de una centrífuga, (Metcalf & Eddy, 2003)

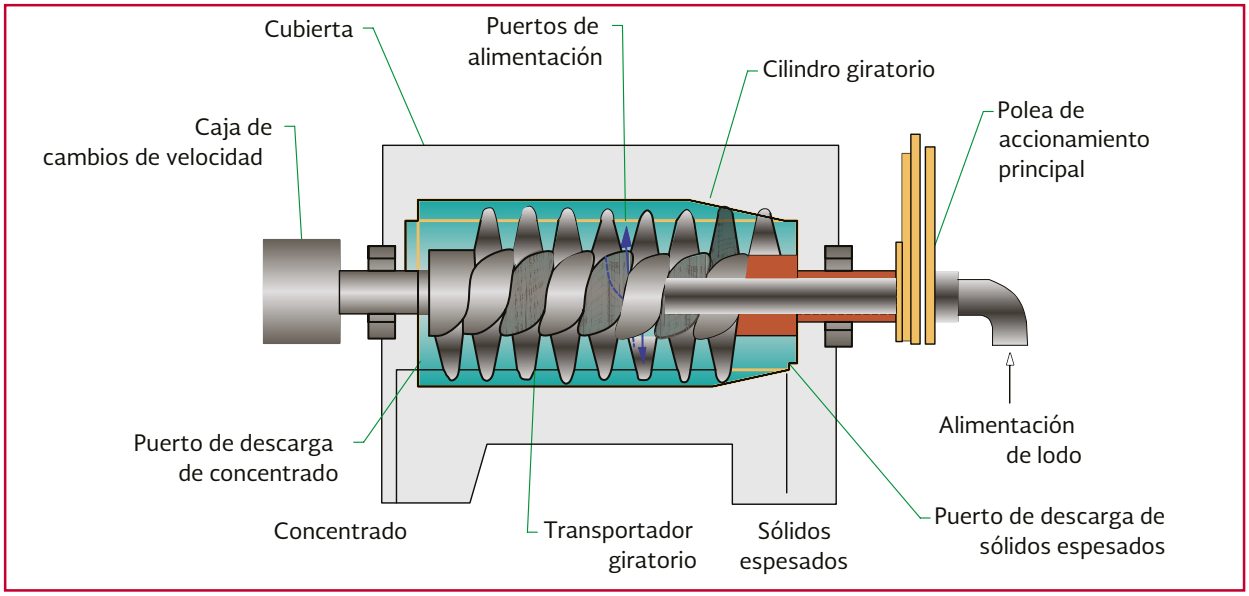
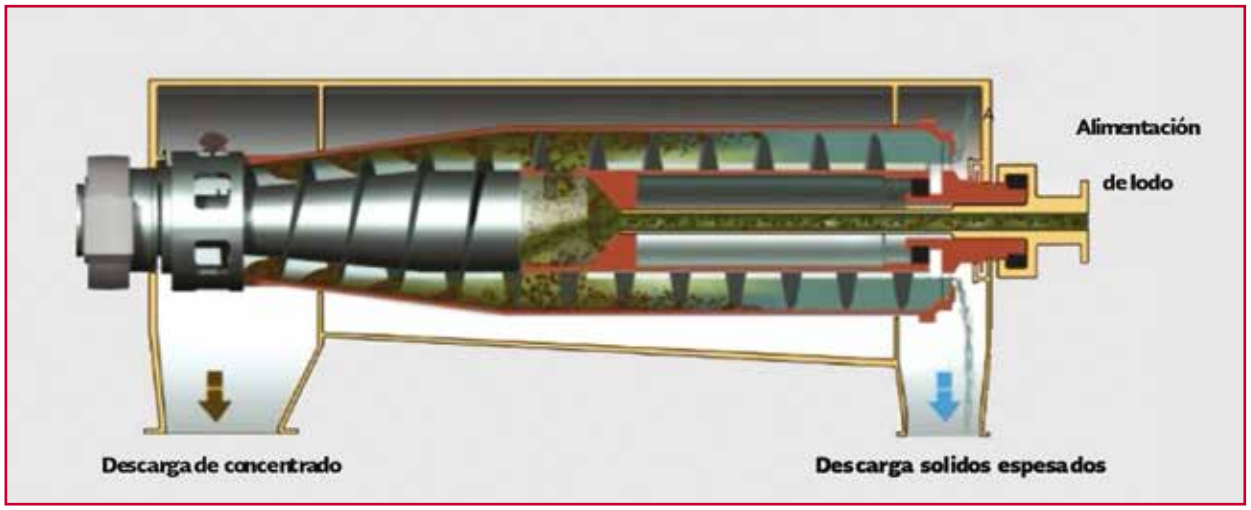


Ilustración 6.17 Esquema de una centrífuga para el espesamiento de lodos, (Flottweg SE, 2013)



ción de polímeros. Sin embargo, los costos de mantenimiento y energía para el espesamiento por centrífugas son altos. Además, el proceso usualmente es atractivo solamente para instalaciones mayores que 0.2 $m^3 s^{-1}$, donde el espacio es limitado y se cuente con personal capacitado, o para lodos que son difíciles de espesar por métodos convencionales. Muchos sistemas están diseñados con sistemas de adición de polímeros si se requiere mejorar el rendimiento del sistema. Las dosis de polímero para el espesamiento de lodo residual del sistema de lodos activados están dentro del rango de 0 a 4 kg de polímero seco por tonelada de lodo (Metcalf & Eddy, 2003).

El desempeño de la centrífuga se mide por la concentración de sólidos obtenida en el lodo espesado y la recuperación o captura de SST. La captura de sólidos se calcula como el porcenta-

je de sólidos secos espesados con respecto a los sólidos alimentados. Ecuación 6.2 (Metcalf & Eddy, 2003).

$$R = \frac{SST_P(SST_F - SST_C)}{SST_F(SST_P - SST_C)} \text{ x } 100$$

Ecuación 6.2

donde:

R = Porcentaje de captura

SST_P = Concentración de sólidos suspendidos totales en los sólidos espesados, porcentaje por peso

SST_F = Concentración de sólidos suspendidos totales en la alimentación, porcentaje por peso

SST_C = Concentración de sólidos suspendidos totales en el concentrado, porcentaje por peso

Las principales variables de operación que se consideran en una centrífuga son: (Metcalf & Eddy, 2003):

- Características del lodo alimentado (la estructura del agua contenida en los flóculos y el índice volumétrico de lodos (IVL))
- La velocidad de rotación
- La carga hidráulica
- Profundidad del tanque
- La velocidad diferencial para el tornillo transportador
- La necesidad de adicionar polímero para mejorar el desempeño del espesamiento

Debido a que la relación entre variables puede ser diferente en cada situación, no están disponibles las recomendaciones específicas de diseño, de hecho, se recomiendan pruebas a escala laboratorio o en planta piloto.

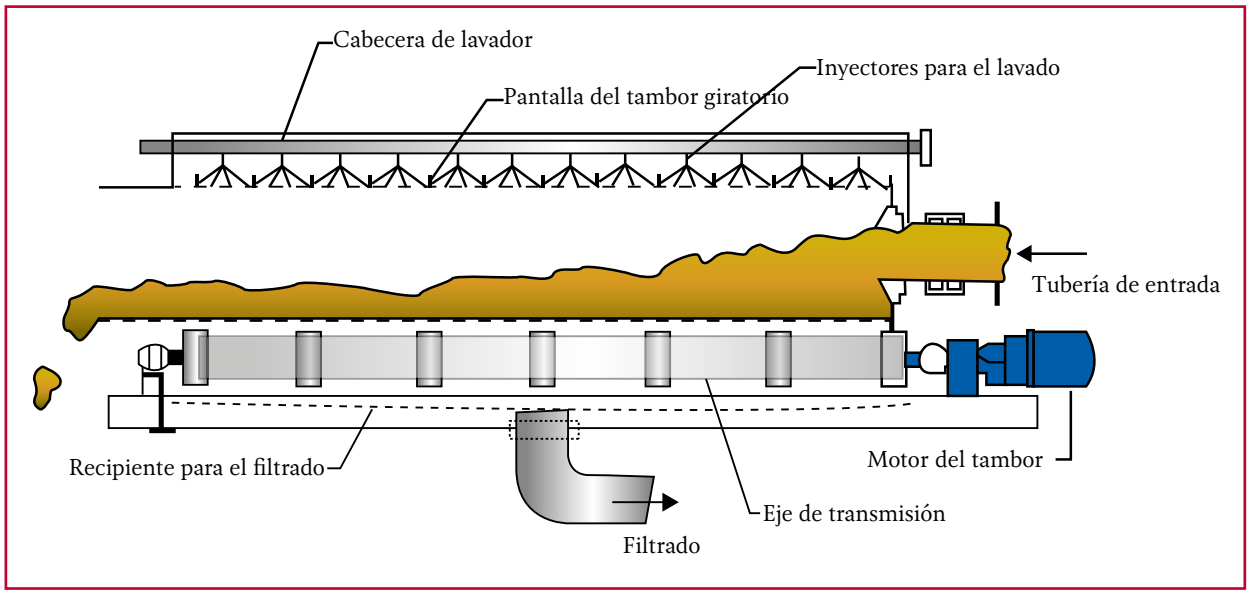
6.3.4.5. Espesamiento por tambores rotatorios

El espesador rotatorio se introduje en el mercado en los años 1980 pero no tuvo mucha aceptación. Estos fueron reintroducidos a principios de los años 2000 con el reconocimiento de que el espesador es un tambor cerrado que proporciona la ventaja de control de olores. El lodo filamentoso puede acondicionarse para formar una estructura de flóculo más fuerte, la velocidad de captura es buena, y las concentraciones de lodos espesados fueron ligeramente superiores comparadas con los espesadores por gravedad en bandas. Los espesadores rotatorios pueden tratar materiales filamentosos con menos cambios operacionales y se debe considerar si se requiere espesar lodo primario o estabilizado. (WEF, *et al.*, 2012).

Los espesadores rotatorios operan de manera similar a los espesadores por gravedad en bandas. Los sólidos coagulados y floculados entran al tambor, y el agua libre se libera a través de la criba, dejando que los sólidos se transporten hacia la tolva de descarga. El agua libre es un líquido claro que se separó del lodo floculado. En la Ilustración 6.18 se muestra un esquema del espesador rotatorio (WEF, *et al.*, 2012).

Los espesadores rotatorios están diseñados para una manipulación más agresiva de los lodos mientras que el agua libre se libera en un área más pequeña. Sin embargo, por la agresiva manipulación, los flóculos pueden romperse, causando que las partículas del lodo escapen con el filtrado, resultando en una captura poco favorable. Los espesadores rotatorios generalmente requieren menos espacio que otros métodos de espesamiento. Los operadores pueden controlar el proceso de espesamiento por medio del ajuste de la velocidad de alimentación, la dosis de polímero y la velocidad del tambor (WEF, *et al.*, 2012).

Ilustración 6.18 Esquema de un espesador rotatorio, (WEF, WERF, US EPA, 2012)

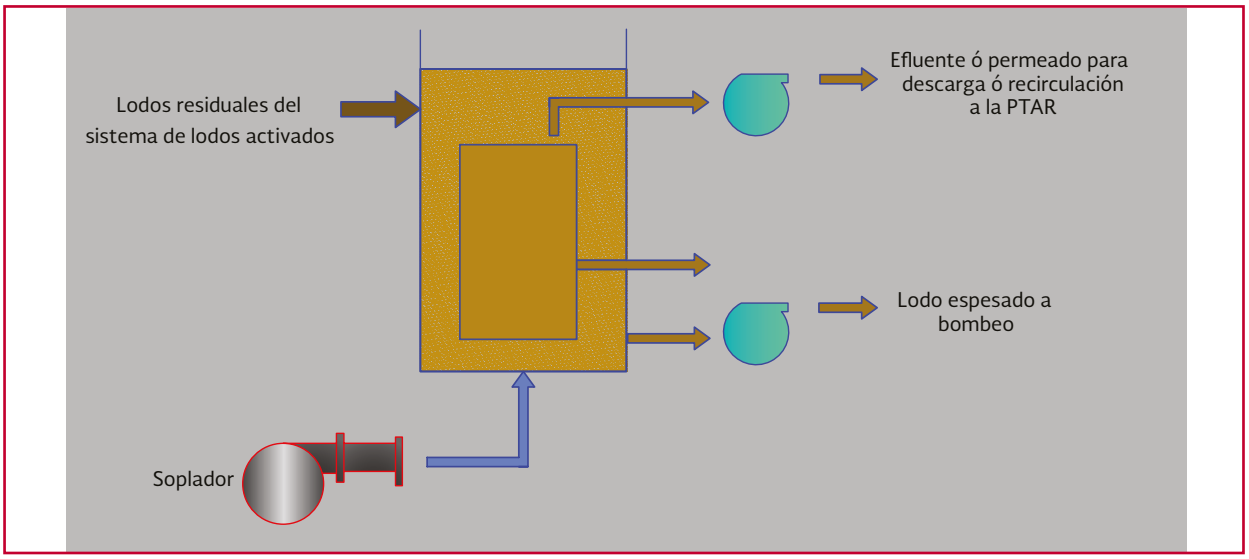


6.3.4.6. Espesamiento por membranas

El interés en esta tecnología ha surgido con el creciente uso de biorreactores con membranas en el tratamiento de aguas residuales en las últimas dos décadas.

Los componentes básicos de un sistema de espesamiento por membranas incluye un tanque exclusivo para la membrana, las membranas, bombas para el filtrado (también conocido como permeado), bombas para los sólidos espesados y sopladores para la aireación de la membrana. La aireación en la membrana se proporciona por difusores de burbuja gruesa para limpiar la superficie de la membrana. El efecto de la limpieza minimiza la acumulación de sólidos sobre la superficie de la membrana. La aireación también provee oxígeno para asegurar que el lodo espesado continúe en fase aerobia. En la Ilustración 6.19 se presenta un esquema de una instalación típica de un espesamiento por membranas operando por lotes.

Ilustración 6.19 Diagrama de flujo simplificado del espesamiento por membrana operando por lotes, (WEF, et al., 2012)



El espesamiento por membrana también puede ser configurado para operar en continuo, formando parte del sistema de estabilización tal como la estabilización aerobia. En la Ilustración 6.20 se presenta un esquema de la instalación de un espesador por membranas en continuo.

6.4. Ventajas y desventajas

6.4.1. Espesamiento por gravedad en tanques fijos

En la Tabla 6.10. se enlistan las ventajas y desventajas del espesamiento de lodos por gravedad.

Tabla 6.10 Ventajas y desventajas del espesamiento por gravedad, (EPA, 1979)

Ventajas	Desventajas
Proporciona mayores capacidades de almacenamiento de lodos.	Requieres grandes extensiones de tierra.
Requiere menos habilidades por parte del operador	Contribuye a la producción de olores.
Menores costos de operación y mantenimiento (especialmente de energía).	El porcentaje de separación de sólidos puede ser variable. Puede producirse un lodo más delgado y menos concentrado.

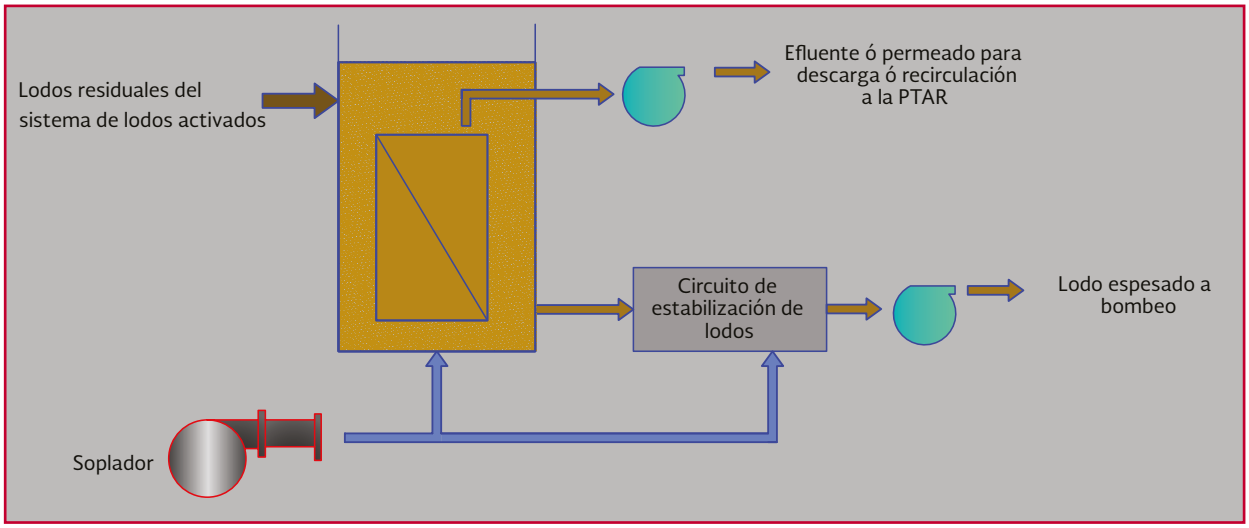
6.4.2. Espesamiento por flotación

En la Tabla 6.11 se enlistan las ventajas y desventajas del espesamiento por flotación con aire disuelto.

Tabla 6.11 Ventajas y desventajas del espesamiento por flotación con aire disuelto, (EPA, 1979)

Ventajas	Desventajas
Proporciona mejor separación solido-líquida que el espesamiento por gravedad.	El costo de operación es mucho más alto en comparación con los espesadores por gravedad
Para muchos lodos se obtiene una concentración de sólidos mayor que la obtenida por el espesamiento por gravedad	La concentración de lodo espesado es menor que en una centrífuga
Requiere menos extensiones de tierra que el espesamiento por gravedad	Requiere más área que una centrífuga
Ofrece una excelente homogeneización del lodo.	Tiene muy poca capacidad de almacenamiento de lodos
Menos problemas de olor que un espesador por gravedad	
Puede remover la arena de los procesos de lodos activados	
Elimina grasas	

Ilustración 6.20 Esquema de una instalación típica de un espesamiento por membranas acoplado a un sistema de estabilización, (WEF, et al., 2012)



6.4.3. Espesamiento por gravedad en bandas

En la Tabla 6.12 se enlistan las ventajas y desventajas del espesamiento por gravedad en bandas.

Tabla 6.12 Ventajas y desventajas del espesamiento por gravedad en bandas, (US, EPA, 1979)

Ventajas	Desventajas
Bajos costos de operación y capital	Problemas de olores
Buena captura de sólidos y una operación confiable	Rendimiento variable con algunos tipos de lodos
Ocupa poco espacio en comparación con otras tecnologías de espesamiento	

6.4.4. Espesamiento por centrífugas

En la Tabla 6.13 se enlistan las ventajas y desventajas del espesamiento en centrífugas.

Tabla 6.13 Ventajas y desventajas del espesamiento en centrífugas, (US, EPA, 1979)

Ventajas	Desventajas
Un alto rendimiento en un área pequeña	Es potencialmente un elemento de alto mantenimiento
Es fácil de instalar	Puede requerir polímeros con el objetivo de operar con éxito
Es silenciosa	Requiere desarenado en la corriente de alimentación
Bajos costos de capital e instalación	Requiere personal calificado para la operación de mantenimiento
Las instalaciones lucen limpias	
Tiene la capacidad para alcanzar constantemente de 4 a 6 por ciento de sólidos en el lodo espesado	

6.4.5. Espesamiento por tambores rotatorios

Tabla 6.14 se enlistan las ventajas y desventajas del espesamiento rotatorio.

Tabla 6.14 Ventajas y desventajas del espesamiento rotatorio, (EPA, 1979)

Ventajas	Desventajas
Contención de olores	Alto costo en comparación con otros sistemas de espesamiento
Pueden tratar lodos filamentosos	Existe el problema de que se rompan los flóculos y escapen partículas de lodo por el filtrado
Alta captura de sólidos	

6.5. Criterios de diseño

6.5.1. Espesadores por gravedad

Los dos principales criterios de diseño para los espesadores por gravedad son la carga hidráulica y la carga másica.

6.5.1.1. Requerimientos de área superficial

El área superficial de un espesador por gravedad es importante por dos razones. Primero, está relacionada con la carga másica. La cantidad de lodos en la entrada del espesador es igual al flujo o caudal por la concentración de sólidos. Los límites superiores que existen de carga másica podrían crear límites superiores de carga hidráulica. Segundo, una carga hidráulica alta causa un exceso de arrastre de sólidos en el efluente del espesador (WEF, *et al.*, 2012).

6.5.1.2. Carga másica

Si los lodos de una planta están disponibles, entonces el área superficial requerida puede determinarse por medio del uso de columnas de sedimentación, desarrollando una curva de flujo. Vs. Sólidos sedimentados, y calculando el flujo crítico (carga másica) para el lodo en particular. Sin embargo, en la mayoría de los

casos, el lodo no está disponible, y el diseñador debe recurrir a otros métodos (WEF, *et al*., 2012).

6.5.1.3. Carga hidráulica

Para lodos primarios las cargas hidráulicas máximas típicas utilizadas son de 1 200 a 1 600 L m^{-2} h^{-1}. Para lodos residuales del proceso de lodos activos o similares, las cargas hidráulicas que se aplican son menores, de 200 a 400 L m^{-2} h^{-1}.

Utilizando las cargas hidráulicas máximas mencionadas anteriormente, las velocidades máximas de flujo para lodos primarios son 1.0 a 1.3 m h^{-1} y lodos residuales del proceso de lodos activados son 0.2 a 0.3 m h^{-1} (WEF, *et al*., 2012).

6.5.1.4. Manejo de los requerimientos de torque

Los lodos que se depositan en el fondo de un espesador circular deben resistir el movimiento de las rastras de sólidos y por lo tanto producen un torque (torsión mecánica). El cálculo de la torsión para una unidad de accionamiento circular, se calcula por la Ecuación 6.3 (WEF, *et al*., 2012):

$$T = WR^2 \qquad \text{Ecuación 6.3}$$

donde:

T = torque, kg m^{-1}

W = carga uniforme (específica del lodo)

R = Radio del tanque, m

Tabla 6.15 Cargas uniformes típicas (WEF, et al., 2012)

Tipo de lodo	**Rastras W, lb ft^{-2} (1 lb ft^{-2} = 1.49 kg m^{-1})**
Lodo primario solo (poca arena)	30
Lodo primario solo (con arena)	40
Lodo primario + cal	40 a 60
Lodo del sistema de lodos activados	
Usando aire	20
Usando oxigeno	20
Filtros rociadores	20
Acondicionamiento térmico	80
Lodo primario + residuos de lodos activados	20 a 30
Lodo primario + lodo de filtros rociadores	20 a 30
Las rastras típicamente tiene una velocidad de 3 a 6 m $min^{-1.}$	

6.5.1.5. Profundidad total del tanque

La profundidad total de un espesador por gravedad considera: el bordo libre del tanque, la zona de sedimentación (zona de clarificación y zona de sedimentación) y la zona de compresión y almacenamiento (zona de espesamiento) (WEF, *et al*., 2012).

6.5.1.6. El bordo libre

El bordo libre del tanque es la distancia vertical entre la superficie del líquido del tanque y la parte superior de la pared del tanque. Esta distancia se calcula en función del diámetro del tanque, del tipo de estructura que se utilizará de medio puente o tipo puente completo para considerar la disposición de las tuberías del afluente, y si tiene desnatadores. Por lo general, esta distancia es de 0.6 a 0.9 m, aunque algunos diseñadores han utilizado hasta 2-3 m (WEF, *et al*., 2012).

6.5.1.7. Zona de sedimentación

Esta zona abarca la zona de clarificación y zona de sedimentación, como se muestra en la Ilustración 6.11 Por lo general es necesario de 1.2 a 1.8 m, siendo mayor la profundidad con lodos normalmente difíciles, como los lodos residuales de los lodos activados o del proceso de nitrificación (WEF, *et al*., 2012).

6.5.1.8. Zona de compresión y almacenamiento

El volumen del tanque debe ser suficiente para que los sólidos permanezcan durante el tiempo requerido para espesar la suspensión a la concentración requerida. Además, es necesario para compensar las fluctuaciones en la tasa de carga de sólidos y tener un almacenamiento adecuado. Otra consideración es el gas que se puede producir debido a las condiciones anaerobias o de desnitrificación. El desarrollo de estas condiciones depende del tipo de lodos, la temperatura del líquido, y del tiempo que los lodos permanezcan en el espesador. La experiencia operativa en plantas indica que el volumen total en esta zona no debe superar un tiempo de retención de lodo mayor de 24 horas máximo.

Las pendientes de fondo del espesador son normalmente más de 17 cm de distancia vertical por metro del radio del tanque. Estas pendientes son más pronunciadas que las pendientes del fondo de los clarificadores convencionales. La pendiente más pronunciada maximiza la profundidad de los sólidos en la tolva de lodos, lo que permite que el lodo espesado pueda eliminarse. La pendiente más pronunciada también reduce los problemas al rastrillar el lodo permitiendo que la gravedad haga la mayor parte del trabajo en el movimiento de los sólidos sedimentados al centro del espesador (WEF, *et al*., 2012).

6.5.2. Espesadores por flotación con aire disuelto

Los espesadores por flotación pueden ser rectangulares o circulares, construidos de concreto o acero y pueden operar con el flujo total o parcialmente presurizado cuando solo la recirculación se presuriza. Los parámetros que influyen en el diseño y operación de este tipo de espesadores son:

6.5.2.1. Relación Aire /sólidos

La relación aire/sólidos (g aire/g sólidos) afecta la velocidad de elevación del lodo y, es tan importante, como la profundidad total de la celda de flotación. La relación necesaria de aire y sólidos, típicamente esta entre 0.02 y 0.04, dependiendo principalmente de las características del lodo (WEF, *et al*., 2012).

6.5.2.2. Carga hidráulica

La carga hidráulica para los espesadores se expresa como el flujo total (afluente + recirculación) a través de la unidad, dividido por el área de la superficie. Las unidades son típicamente $m^3\ m^{-2}\ h^{-1}$. La carga hidráulica máxima siempre debe ser menor que la velocidad mínima de subida del lodo/partículas de aire, para asegurar que todas las partículas puedan llegar a la zona de flotación de lodos antes de que las partículas alcancen a salir por la tubería del efluente del espesador.

Estos equipos son relativamente insensibles a la carga hidráulica, y cargas tan altas como 14 m^3

m^{-2} h^{-1} han sido aplicadas para el espesamiento de lodos residuales del sistema de lodos activados sin efecto perjudicial sobre los sólidos suspendidos en el efluente. Estas velocidades fueron obtenidas usando polímeros. Cuando los polímeros no son utilizados, los valores correspondientes pueden ser bajos, aunque es probable que el criterio para definir el tamaño del equipo DAF seguirá siendo la carga de los sólidos (WEF, *et al.*, 2012).

6.5.2.3. Carga de sólidos

La carga de sólidos para estos equipos debe ser expresada como la carga total de sólidos alimentados al equipo dividido por el área de la superficie. Típicamente las unidades son kg m^{-2} d^{-1}. Generalmente al incrementar la carga de sólidos disminuye la concentración de los sólidos flotantes. La adición de polímeros puede permitir un incremento en la carga de los sólidos obteniendo mayor concentración en la masa de lodo flotado. La carga de sólidos para el diseño depende de las características de los lodos residuales y de la concentración de sólidos que se requiere en el lodo flotado o espesado. Los valores de diseño típicos se basan en la carga pico de sólidos y tienen un rango aproximadamente menor de 100 a 1150 $kg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ (WEF, *et al.*, 2012).

6.5.2.4. Características de la alimentación

El primer paso en el diseño de un espesador DAF es evaluar las características de la corriente de alimentación. El diseñador debe evaluar el tipo de lodo (s) a espesar y las cantidades aproximadas de cada uno bajo diversas cargas y modos de operación de la planta. Si el lodo residual a espesar es de un sistema de lodos activados, el rango esperado de las edades de lodos debe ser determinado, ya que la edad de lodos puede afectar significativamente el rendimiento de espesamiento del equipo DAF. Se necesita información acerca del origen del lodo y la gama de concentraciones de sólidos que se pueden esperar. También, debe haber una evaluación de cualquier característica de la corriente de alimentación que pueda afectar a la solubilidad del aire por ejemplo, la concentración de las sales disueltas, y el rango de temperaturas del líquido (EPA, 1979).

6.5.2.5. Área superficial

Para calcular el área superficial efectiva de un espesador DAF, un diseñador debe conocer la carga neta de sólidos y la de carga hidráulica superficial.

Para el cálculo del espesador por flotación se puede utilizar la Ecuación 6.4, para calcular el área de la superficie o área superficial del tanque de espesamiento.

$$TSA = \frac{SV \times SS \times SSG \times 24}{SLR \times 100 \times HPD} \qquad \text{Ecuación 6.4}$$

donde:

TSA = Área de la superficie, m^2
SV = Volumen diario de lodos, L d^{-1}
SS = Contenido de sólidos suspendidos, %
SSG = Gravedad específica del lodo
24 = horas al día, h d^{-1}
SLR = Carga de sólidos, kg m^{-1} d^{-1}
HPD = horas de operación al día, h d^{-1}

Cálculo de la cantidad de sólidos secos producidos:

$$TDSS = \frac{SV \times SS \times SSG}{100 \times 1\,000} \qquad \text{Ecuación 6.5}$$

donde:
SV = Volumen diario de lodos, L d^{-1}
SS = Contenido de sólidos suspendidos, %
SSG = Gravedad específica del lodo
TDSS = Total de sólidos secos producidos, ton d^{-1}

6.5.2.6. Uso de polímeros

Los polímeros tienen un efecto marcado en el rendimiento de los espesadores DAF, y por lo tanto un diseñador debe tener cuidado para diferenciar entre el rendimiento con y sin el uso de polímero.

Los polímeros mejoran la flotación sustancialmente por el aumento del tamaño de las partículas presentes en los lodos. Las partículas de algunos lodos pueden no ser susceptibles del proceso de flotación debido a su pequeño tamaño no va a permitir la fijación apropiada de las burbujas de aire. Cambiando las propiedades de superficie de las partículas y manteniendo la misma relación aire/sólidos se puede duplicar el diámetro o el tamaño de la partícula y manteniendo la relación aire/sólidos, se puede conseguir que aumente cuatro veces la velocidad ascensional o de elevación de las partículas.

Las propiedades de superficie de los sólidos se separan. Los polímeros pueden neutralizar la carga, causando que las partículas se coagulen para que las burbujas de aire se unan a ellas para una flotación eficaz. Por lo tanto, con el uso de polímeros, se obtienen las siguientes ventajas operativas: reducir el tamaño del espesador; mejorar la captura de sólidos, reduciendo de este modo la cantidad de sólidos recirculados a la planta de tratamiento; mejorar la operación de una instalación existente, sobrecargada, que no use polímeros. Actúan también como un agente tensoactivo, permitiendo así una mejor fijación de las burbujas de aire.

La principal desventaja de los polímeros es el costo (costo polímero, operación y mantenimiento de los equipos de alimentación de polímero) cuando se calcula sobre la vida útil de la planta.

Además, la cantidad real requerida es muy difícil determinar hasta que los estudios de flotación se pueden ejecutar en la instalación real.

6.5.3. Espesadores de bandas por gravedad

6.5.3.1. Carga hidráulica y de sólidos

Los espesadores de bandas por gravedad se dimensionan considerando ambos eventos: la carga pico de sólidos y la carga hidráulica pico debido a que se produce un lavado de la banda, por lo que el sistema debe tener la posibilidad de apagarse y reiniciar. Las recomendaciones para la carga de lodo residual del sistema de lodos activados basado en el ancho de la banda se muestran en la Tabla 6.16. Estas recomendaciones se deben ajustar para considerar el tipo de lodo a espesar y el objetivo de la concentración de lodo espesado.

Típicamente, la capacidad de un espesador por gravedad de bandas se limita hidráulicamente con el lodo residual del sistema de lodos activados y con lodo primario por la carga de sólidos. El lodo primario no se espesa tan efectivamente como el lodo del sistema de lodos activados y normalmente es una mayor cantidad de lodo. Sin embargo, la combinación de lodo primario y lodo del sistema de lodos activados permite trabajar con altas cargas de sólidos sobre la banda. Para

determinar las cargas se deben realizar pruebas específicas o considerar la experiencia de operación de plantas similares (WEF, *et al*., 2012).

Tabla 6.16 Guía sobre la carga pico de sólidos y la carga hidráulica pico de los espesadores de bandas por gravedad (WEF, et al., 2012)

Ancho de banda, metros	Carga hidráulica, L s^{-1}	Carga de sólidos, (kg h^{-1})
0.5	7.9	255
1	15.7	520
1.5	23.6	765
2	31.4	1 040
3	47.2	1 560

6.5.3.2. Sistema de alimentación de sólidos

Los sistemas de alimentación de lodos pueden ser cualquier tipo de transporte adecuado para los lodos, ver capítulo 5. El diseño debe considerar la pérdida de presión al pasar el lodo por el orificio del mezclador operando bajo diferentes intensidades de mezclado y las limitaciones de carga hidráulica de los espesadores de bandas por gravedad. Si el sistema de alimentación de lodos no puede suministrar el caudal requerido al espesador de gravedad de banda o no puede soportar una sobrecarga hidráulica causará un lavado de la banda. Se debe medir el flujo de lodo alimentado para adicionar correctamente el polímero, especialmente en sistemas donde hay un porcentaje mayor al 10 por ciento de variación en el flujo durante un periodo de operación. Finalmente, se debe considerar el muestreo de lodos para realizar los cálculos de adición de polímero y las interconexiones entre controles para apagar el sistema de alimentación de lodos del espesador (WEF, *et al*., 2012).

6.5.3.3. Sistema de espesamiento de lodo

El sistema de espesamiento de lodo consiste de una tolva para la descarga del espesador y bombas de lodos que pueden transportar los sólidos concentrados producidos por el espesador. Típicamente se utilizan bombas de desplazamiento positivo debido a su confiabilidad y su flujo relativamente constante ante la variación de la presión de descarga. Las bombas centrífugas, las cuales son económicas y requieren menos mantenimiento, también pueden usarse con concentraciones bajas dependiendo de su aplicación. Aunque la tolva y la bomba son típicamente externas al espesador, con frecuencia las suministra el fabricante para asegurar la compatibilidad del sistema. La bomba se diseña para la mínima concentración de lodo espesado bajo la condición de carga hidráulica máxima. El tamaño de la tolva lo determina el tipo de control que se usará para regular el flujo de descarga de la bomba. El control de encendido y apagado se basa en el nivel de lodos en la tolva (WEF, *et al*., 2012).

6.5.3.4. Sistema de filtrado

El filtrado pasa a través de la banda y se recoje en un sistema de drenaje. La losa del drenaje debe tener una pendiente hacia el punto central de recolección con una inclinación mínima de 1:8 para asegurar la eficiente transportación del filtrado y que drene sin salpicaduras o salpicaduras considerables. El drenaje se debe diseñar para el flujo hidráulico pico y debe estar entre 200 y 300 mm de diámetro. El filtrado se transporta a la corriente de los clarificadores primarios para sedimentar los sólidos y tratar los nutrientes solubles antes de su descarga. La carga de DBO del filtrado debe ser incluida en algunos criterios de diseño para los procesos primarios y secundarios (WEF, *et al*., 2012).

6.5.3.5. Sistema de alimentación de químicos

Los sistemas de alimentación de polímero consisten en dos tanques uno de mezclado y uno de di-

lución, cada uno con capacidad volumétrica para suministrar polímero para el espesador durante por lo menos un turno de funcionamiento considerando la máxima carga de sólidos e hidráulica horaria. El polímero debe ser diluido entre 0.1 y 0.5 por ciento para asegurar un buen mezclado y coagulación del lodo a espesar. La medición del flujo del agua y del polímero deberá ser incorporada en el diseño del proceso para ser automatizadas. Dos bombas de desplazamiento positivo con control de velocidad variable automático deben transportar el polímero a los orificios Venturi del mezclador. El tamaño de las bombas se selecciona con la velocidad de flujo requerida para las horas de máxima carga. El polímero no se alimenta a concentraciones mayores de 0.5 por ciento para asegurar un buen mezclado (WEF, *et al*., 2012). Ver el capítulo 5 para información de bombas de lodos.

6.5.3.6. Control de olores

En los espesadores de gravedad de bandas se distribuyen los lodos acondicionados sobre la banda, que está abierta a la atmósfera y el lodo espesado se descarga en una tolva. Ambos procesos liberan compuestos produciendo olores. Las salidas de aire deben estar ubicadas directamente encima del espesador y de la tolva para limitar la dispersión de olores. Algunas instalaciones colocan los espesadores en pequeños cuartos para disminuir las salidas de aire y el tamaño de los ventiladores.

6.5.4. Centrífugas

Dos diseños básicos de centrífugas se usan en la separación de sólidos municipales: el diseño en contra corriente y el diseño de cocorriente. Para deshidratación la mayoría de las centrífugas son exclusivamente de contracorriente y para espesamiento pueden ser usadas contracorriente o cocorriente.

6.5.4.1. Características físicas

Cada centrífuga tiene características físicas únicas que pueden afectar el desempeño incluyendo el rendimiento, la eficiencia de captura, la dosis del polímero, la concentración de sólidos en la torta, y los requerimientos de energía. Estas características físicas incluyen (WEF, *et al*., 2012):

- Geometría del recipiente
- Diámetro del recipiente
- Longitud del recipiente
- Diámetro de la descarga
- Angulo del cono
- Geometría de desplazamiento (desplazamiento abierto o cerrado)
- Configuración de desplazamiento
- Materiales de construcción

6.5.4.2. Funcionamiento teórico

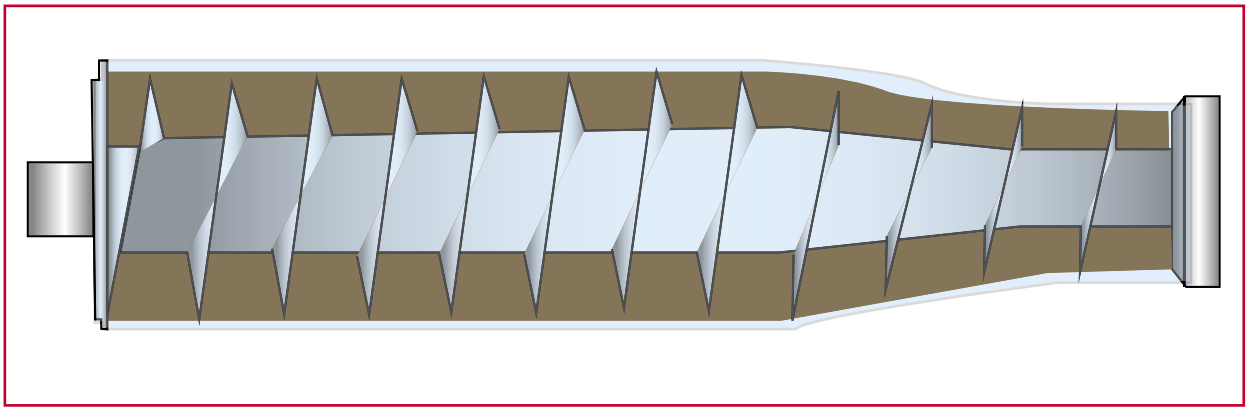
El volumen-g es ampliamente aceptado en la industria en los cálculos para determinar el rendimiento de la centrífuga basado en la geometría y la velocidad del recipiente. Una vez calculado el volumen-g, este puede ser usado para comparar centrífugas de diferentes fabricantes. Este también predece el rendimiento de varios tamaños de centrífugas basado en resultados anteriores.

El volumen-g se calcula con la siguiente Ecuación 6.6

$$Volumen\ g = (Fuerza\ g_{pared\ del\ recipiente}) \times (Vol.util\ del\ recipiente_{cilindro})$$

Ecuación 6.6

Ilustración 6.21 Esquema del transportador de desplazamiento, el cual está montado en el interior del recipiente y gira a una velocidad ligeramente diferente, (WEF, et al., 2012)



6.5.4.3. Volumen útil del recipiente

El volumen útil del recipiente es la sección del volumen cilíndrico del recipiente menos el volumen del espacio de aire asociado con el diámetro de descarga. Este volumen cilíndrico depende de la longitud del cono y del diámetro de descarga, en la Ilustración 6.21 se muestra gráficamente.

El volumen cilíndrico puede incrementarse si la sección cónica disminuye por el incremento del ángulo. Sin embargo, cuanto más pronunciado es el ángulo, más torsión se requiere para desplazar los sólidos hasta la sección cónica. (WEF, *et al.*, 2012).

El volumen cilíndrico también depende de la profundidad del tanque. Cuando la máxima profundidad del tanque se controla por el diámetro de descarga, se conoce como profundidad neutral del tanque (WEF, *et al.*, 2012).

6.5.4.4. Fuerza g

La fuerza g es la fuerza centrípeta de las paredes del recipiente y está asociada con la velocidad y el diámetro del tanque. Para una velocidad dada, a mayor diámetro del tanque entonces más grande es la fuerza g en las paredes del mismo. (WEF, *et al.*, 2012).

6.5.4.5. Específicaciones generales de diseño

Las específicaciones de diseño deben incluir los requisitos para equipos auxiliares que deben considerarse para la operación eficiente de una centrífuga, incluyendo (US, EPA, 2000):

- Sistema para el almacenamiento, mezclado y dosificación de polímero
- Tanque para recibir el líquido centrífugado
- Bomba para envío de líquido centrífugado hacia la planta de tratamiento o descarga
- Sistema para control de olores y ventilación.
- Transportador y/o bomba para transportar el lodo espesado
- Un área cerrada para cargar camiones o contenedores

6.5.5. Espesadores rotatorios

Los criterios de diseño son específicos para cada equipo acorde a los detalles de diseño de cada

fabricante. Debido a que los espesadores rotatorios aún son relativamente nuevos, hay variedad de diseños. El costo efectivo de los espesadores puede lograrse diseñando la unidad con las siguientes características. (WEF, *et al*., 2012):

- Flujo o caudal de 95 a 1500 $L \cdot min^{-1}$, lo cual es más bajo que la carga normal para un espesador por gravedad en bandas pero ideal para plantas pequeñas u operaciones de 24 horas por día
- Una tasa de alimentación de 45 a 900 kiligramos por hora
- La dosis de polímero son de 2.5 a 7.0 g kg^{-1} (activo) consistentes con las de los espesadores de bandas por gravedad
- Las concentraciones de lodo espesado son típicamente de 5 a 7 por ciento, aunque es posible alcanzar concentraciones por arriba del 12 por ciento
- La tasa de captura de sólidos se puede considerar del 98 por ciento. Esta es mejor que en los espesadores por gravedad en bandas debido a los aspersores de limpieza que se encuentran en la pantalla del espesador
- El agua de lavado que se usa es de 10 a 40 litros por minuto. Alguno diseños solo requieren lavados intermitentes
- Estos espesadores se utilizan para el espesamiento de lodo residual del sistema de lodos activados y lodo primario

6.5.6. Espesamiento por membrana

Los principales criterios diseño de los espesadores por membrana se mencionan a continuación (WEF, *et al*., 2012):

- Flujo de la membrana es de 5 a 7 $L\ m^{-2}\ h^{-1}$. Para un lodo residual del sistema de lodos activados diluido inicialmente las membranas pueden operar arriba de 20 $L\ m^{-2}\ h^{-1}$ y decrecer hasta 7 $L\ m^{-2}\ h^{-1}$ cuando la concentración de sólidos se incrementa
- Carga hidráulica: Las membranas tienen limitaciones para mantener flujos altos de operación debido al incremento en la tasa ensuciamiento de la membrana, resultando en un incremento de la presión transmembrana. El diseño de un espesador por membrana depende del volumen máximo de diseño de lodo residual del sistema de lodos activados por unidad de tiempo para un periodo de operación dado
- Concentración de lodos residuales del sistema de lodos activados: Los espesadores por membrana se diseñan junto con, pero no son exclusivos de los biorreactores con membranas. En la práctica los límites del espesamiento por membrana están arriba de 4.5 por ciento de sólidos al recibir de 2 a 4 por ciento de concentración del lodo proveniente de los sistemas de lodos activados. Con lodos estabilizados se puede alcanzar hasta 5.5 por ciento de sólidos totales
- Temperatura del proceso. La temperatura de operación del sistema de lodos activados puede influenciar sobre el diseño del espesamiento por membranas, sobre la operación y la vida útil. Por el contrario, la permeabilidad de la membrana disminuye a medida que disminuye la temperatura de alimentación. Esta disminución no necesariamente indica ensuciamiento de la membrana

6.6. Ejemplos de diseño

6.6.1. Acondicionamiento químico

Estimar la cantidad diaria de cloruro férrico y cal requerida para acondicionar un máximo de 272 kg por hora de lodos, que serán deshidratados en un filtro al vacio y estimar el exceso de lodo producido por la adición de estos reactivos. El lodo será una mezcla con un 40 por ciento de lodo primario y 60 por ciento lodo residual del sistema de lodos activado, con estabilización anaerobia. El filtro de vacío operará siete horas por día, cinco días a la semana (EPA, 1979).

Utilizando los valores más altos que se muestran en la Tabla 6.2 para el filtro al vacio cuando se trata una mezcla de lodo primario y secundario del sistema de lodos activados, se recomienda dosificar entre 22 y 60 g de cloruro férrico por kilogramo de lodos y de 80 a 140 g de cal por kilogramo de lodo.

Solución:

1. En base a la Ecuación 6.7 determinar la cantidad máxima diaria de lodo a ser deshidratado.

$$\textit{La cantidad de lodo a deshidratar} = \frac{\textit{kg de lodo}}{h} \times \textit{tiempo de operación}$$

Ecuación 6.7

donde:

Los kilogramos de lodo por hora, es la carga máxima de lodo que se puede tratar en el equipo durante 1 hora. (kg h^{-1})

El tiempo de operación del equipo, (h d^{-1})

Sustituyendo los datos en la fórmula tenemos:

$$\frac{272\ kg\ de\ lodo}{h} \times \frac{7h}{día} = 1\,905\ kg\ d^{-1}$$

Ecuación 6.8

2. En base a la Ecuación 6.9 se determina la cantidad máxima de cloruro férrico (FeCl3) por día.

$$\textit{Cantidad de acondicionador por día} = \textit{Carga de lodo} \times \textit{la dosis del acondicionador}$$

Ecuación 6.9

donde:

La carga de lodo: Es la carga de lodo por día que se puede tratar en el equipo, kg d^{-1}

La dosis depende del tipo de acondicionador que se utilizará, el tipo de lodo y el equipo a utilizar y generalmente esta indicado en kg de acondicionador por kilogramos de lodo.

Para este ejemplo se determina la cantidad máxima del acondicionador utilizado ($FeCl_3$) por día, se calculará con la carga máxima de lodos que el equipo puede tratar y la dosis del acondicionador es: 60 kg de cloruro férrico por cada 1 000 kg de lodo alimentado, sustituyendo los datos se obtiene:

$$\frac{1\,905\ kg\ de\ lodo}{día} \times \frac{60\ kg\ de\ cloruro\ férrico}{1\,000\ kg\ de\ lodo\ alimentado} = 114.3\ FeCl_3\ kg\ d^{-1}$$

Ecuación 6.10

El cloruro férrico ($FeCl_3$) comercialmente está disponible en una solución al 40 por ciento (0.567 kg de cloruro férrico por litro de solución), por lo que es necesario determinar el volumen de esta solución para acondicionar el lodo, Ecuación 6.11.

$$\frac{114.3\ kg\ FeCl_3}{día} \times \frac{1L}{0.567\ FeCl_3} = 201.6\ L\ d^{-1}$$

Ecuación 6.11

Se obtiene un volumen de 201.6 L d^{-1}. Es decir, que para acondicionar 1 905 kg de lodo por día se necesitan 201.6 L de la solución de cloruro férrico al 40 por ciento.

3. El tercer paso se determina la cantidad máxima de cal viva por día utilizando la Ecuación 6.9.
   Sustituyendo los datos en la Ecuación 6.9 obtenemos:

$$\frac{1\,905\ kg\ de\ lodo}{día} \times \frac{140\ kg\ de\ cal\ viva}{1\,000\ kg\ de\ lodo\ alimentado} = 266.7\ Cal\ kg\ d^{-1}$$

Ecuación 6.12

La dosis de cal viva utilizada, se proporciona en los datos iniciales del ejemplo.
Las rocas de cal viva o piedra caliza están disponibles en una concentración del 90 por ciento de CaO (en 1kg solo 0.9 kg son de cal viva), por lo tanto es necesario determinar los kilogramos exactos para el acondicionamiento del lodo, con la Ecuación 6.13.

$$\frac{266.7\ kg\ CaO}{día} \times \frac{1\ kg\ de\ CaO}{0.9\ kg\ CaO} = 296.3\ kg\ de\ rocas\ CaO\ d^{-1}$$

Ecuación 6.13

Resolviendo la Ecuación 6.13 se obtiene una cantidad 296.3 kg de de CaO, la cual es necesaria para acondicionar 1 905 kg de lodo por día.

4. El cuarto paso se determina la cantidad de lodo producido debido al acondicionamiento químico.
   La cantidad de lodo producido debido al acondicionamiento químico es estimado en 0.45 kg por cada kilogramo de $FeCl_3$ y cal viva adicionada, por lo tanto:

$$Lodo\ producido = (0.45\ kg) \times (114.3\ FeCl_3 kg\ d^{-1} + 296.3\ kg\ de\ piedras\ CaO\ d^{-1}$$

Ecuación 6.14

Además, los sólidos totales secos diarios que se manejarán diariamiente son:

$$1\,905\ kg\ d^{-1} + 114.3\ kgFeCl_3 + 296.3\ kg\ de\ CaO = 2\,315.6\ kg$$

Ecuación 6.15

2 315.6 kg de sólidos secos, que son equivalentes a 11 578 kg de lodo húmedo con 20 por ciento de sólidos.

6.6.2. Acondicionamiento químico con polímero

Determinar la dosis de polímero requerido para el acondicionamiento de lodo que se deshidratará en un filtro prensa de bandas con las siguientes condiciones de diseño y operación:

- Se tienen dos filtros prensa de bandas con un ancho de banda de 2 m (Uno en espera)
- La operación es 5 días a la semana, 7 horas por día
- Producción semanal máxima (pico) de lodos es de 110 $m^3\ d^{-1}$ (0.001 $m^3\ s^{-1}$)
- Sólidos totales a la entrada del filtro de bandas 3.5 por ciento
- Gravedad específica del lodo es 1.03
- Se adiciona una solución de polímero al 0.2 por ciento con un flujo de 25 L min^{-1} antes de entrar al filtro de bandas

Paso 1. Calcular el flujo pico (máximo) del lodo

- Se calcula la cantidad de sólidos húmedos, considerando la gravedad específica del lodo.
- Lodos húmedos = 110 $m^3\ d^{-1}$ × 7 d $semana^{-1}$ × 1 000 kg m^{-3} × 1.03
- Lodos húmedos = 793 100 kg $semana^{-1}$

Se calcula la cantidad de lodos secos considerando que contienen 3.5 por ciento se sólidos totales.

Lodos secos = 793 100 kg semana^{-1} × 0.035
Lodos secos= 27 759 kg semana^{-1})/(5 d semana^{-1})
Lodos secos = 5 552 kg d^{-1} / 7 h d^{-1}
Lodos secos = 793 kg h^{-1}

Paso 2. Se determina la carga de lodos y la velocidad de carga hidráulica y se verifica que esté dentro de los parámetros de operación recomendados. Ver tabla 6.9

Carga de lodos = (793 kg h^{-1})/ 2m = 397 kg h^{-1} m^{-1}.
Carga hidráulica= 110 m^{-3} d^{-1} x (1 d/1440 min) x 1 000 L^{-1} m^{-3}
Carga hidráulica= 76 L min^{-1} × (7d/5d) × (24h/7d)/ 2 m
183 L^{-1} min^{-1} m^{-1} (Está dentro el rango recomendado)

Paso 3. Calcular la dosis de polímero

Dosis = 25 L min^{-1} × 60 min h^{-1}
Dosis = 1 500 L h^{-1}
Dosis = (1 500 L h^{-1} × 0.002 kg L^{-1}) × (2m × 397 kg h^{-1} m^{-1}) × (1 ton 1 000 kg^{-1})
Dosis = 2.4 kg ton^{-1}

Se debe dosificar 2.4 kilogramos de polímero por tonelada de lodo seco.

6.6.3. Espesamiento por gravedad

Diseñar un espesador por gravedad para una planta de tratamiento de aguas residuales que desea tratar una mezcla de lodo primario y lodo residual del sistema de lodos activados con las siguientes características (Metcalf & Eddy, 2003):

Tabla 6.17 Características del lodo para el dimensionamiento del espesador por gravedad, (Metcalf & Eddy, 2003)

Tipo de lodo	Gravedad específica	Sólidos, %	Flujo, $m^3\ d^{-1}$
Condiciones promedio de diseño			
Lodo primario	1.03	3.3	400
Lodos activados de desecho (DLA)	1.005	0.2	2250
Condiciones pico de diseño			
Lodo primario	1.03	3.4	420
Lodos activados de desecho (DLA)	1.005	0.23	2500

Solución:

1. E1 primer paso calcula la carga de sólidos en el afluente para las condiciones pico de diseño.
   La carga de sólidos para el lodo primario se determina con la Ecuación 6.16 y en kilogramos de sólidos secos:

$$CS = (Q)(\rho)(\textit{fracción de SSV en el lodo})\ (1\ 000\ kg\ m^{-3})$$

Ecuación 6.16

donde:
CS = Carga de sólidos, kg d^{-1}
Q = Flujo de lodo, $m^3\ d^{-1}$
ρ = Gravedad específica del lodo (este va-

lor depende del tipo de lodo)

Fracciones de SSV presentes en el lodo = (por ciento de sólidos/100)

1 000 kg m^{-3} = Densidad del lodo (este depende del tipo de lodo)

Sustituyendo los valores en la ecuación se tiene que la carga de sólidos del lodo primario para las condiciones pico de diseño es:

$$Carga\ de\ sólidos\,(420\,m^3\,d^{-1})\,(1.03)\,(0.034)\,(1000\,kg\ m^{-3})=14\ 708\,kg\ d^{-1}$$

Ecuación 6.17

Para determinar la carga de sólidos del lodo residual del sistema de lodos activados para las condiciones pico de diseño se utiliza la misma Ecuación 6.16. Sustituyendo los valores se tiene:

$$(2\ 500\,m^3\,d^{-1})\,(1.005)\,(0.0023)\,(1\,000\,kq\ m^{-3})=5\ 779\,kq\ d^{-1}$$

Ecuación 6.18

Sumando la carga del lodo primario más la carga del lodo secundario se obtiene:

$$14\ 708+5\ 779=20\ 487\,kg\,d^{-1}$$

Ecuación 6.19

Sumando el flujo del lodo primario más el flujo del lodo secundario se obtiene:

$$2\ 500+420=2\ 920\ m^3\,d^{-1}$$

Ecuación 6.20

2. El segundo paso calcula la concentración de sólidos de la mezcla de lodos, asumiendo la gravedad específica de la mezcla de lodo de 1.02. Esta se calcula con la Ecuación 6.21.

$$\%\,solidos=\frac{(CS\ de\ la\ mezcla\ de\ lodo)}{(Flujo\ total\ del\ lodo)\,(1.02\ m)\,(1\,000\,kg\,m^{-3})}\times 100\%$$

Ecuación 6.21

donde:

CS de la mezcla de lodo = Carga de sólidos del lodo primario + carga de sólidos del lodo secundario, kg d^{-1}

Flujo total = Flujo de lodo primario + flujo del lodo secundario, m^3 d^{-1}

1.02 = la gravedad específica de la mezcla de lodo

1 000 kg m^{-3} = la densidad del lodo

Al sustituir los valores, tenemos la Ecuación 6.22, obteniendo una concentración de sólidos del 0.69 por ciento.

$$\%\,sólidos=\frac{(20\ 487kg\ d^{-1})}{(2\,920\ m^3\ d^{-1})\,(1.02)\,(1\,000\,kg\ m^{-3})}\times 100\,\%=0.69\,\%$$

Ecuación 6.22

3. El tercer paso es calcular el área de la superficie requerida basada en la carga superficial de sólidos.

De la Tabla 6.6 se selecciona la carga superficial de sólidos, la cual depende del tipo de lodo y de la concentración de sólidos en el lodo (por ciento). Para el ejemplo; se trata de una mezcla de lodo primario y lodo secundario proveniente del sistema de lodos activados y la concentración de sólidos calculada para esta mezcla es de 0.69. Por lo tanto la carga superficial de sólidos esta en un rango de 25-70 kg m^2 d^{-1} y se selecciona una tasa de carga para el espesador de 50 kg m^2 d^{-1}, la cual esta dentro del rango indicado.

Una vez seleccionada la carga superficial de sólidos (CSS), en base a la Ecuación 6.23 se calcula el área.

$$Área=\frac{(CS\ de\ la\ mezcla\ de\ lodo)}{(CSS)}=m^2$$

Ecuación 6.23

$$Área=\frac{(20\ 487\,kg\,d^{-1})}{(50\ kg\ m^{-2}\ d^{-1})}=409.7\,m^2$$

Ecuación 6.24

Remplazando los valores en la Ecuación 6.23 se tiene un área de 409.7 metros cuadrados.

4. El cuarto paso calcula la carga hidráulica en base a la Ecuación 6.25.

$$Carga\ hidráulica = \frac{Flujo\ total}{Área\ \ superficial} = \frac{(2\ 920\ m^3\ d^{-1}\ )}{409.7\ m^2} = 7.13 m^3\ \ m^{-2}\ \ d^{-1}$$

Ecuación 6.25

5. El último paso determina el diámetro del espesador, considerando dos espesadores.

$$Diámetro = \sqrt{\frac{4x Área}{No.\ de\ equipos\ x\ \pi}} = \sqrt{\frac{(4x409.7 m^2}{2x3.1416}} = 16.15\ m$$

Ecuación 6.26

Comentario: La carga hidráulica de 7.13 $m^3\ m^{-2}\ d^{-1}$ calculada para el flujo de la mezcla de lodo bajo las condiciones pico de diseño se encuentra en el límite bajo del rango recomendado (6 a 12 $m^3\ m^{-2}\ d^{-1}$). Para evitar septicidad y olores, se debe proporcionar agua de dilución. El tamaño del espesador de 16.15 m está dentro del tamaño máximo recomendado que es de 20 metros. En el diseño real, se redondea el diámetro del espesador, en este caso a 16 metros.

Las características del espesador se resumen en la Tabla 6.18

Tabla 6.18 Características para el diseño del espesador

Parámetro	Característica
Área superficial de espesamiento	409.7 m^2
Carga hidráulica	7.13 $m^3\ m^{-2}\ d^{-1}$
Diámetro del espesador	16 m
Número de espesadores requeridos	2
Flujo o caudal de lodos al espesador	2930 $m^3\ d^{-1}$
Carga de sólidos al espesador	20 487 kg d^{-1}
por ciento de sólidos en el lodo alimentado al espesador	0.69 por ciento

7

Estabilización anaerobia

7.1. Introducción

La estabilización anaerobia de lodos es un proceso bien establecido que se utiliza ampliamente en los lodos residuales generados en el tratamiento de aguas residuales. En algunas casos, la estabilización anaerobia es adecuada para tratar los lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) pequeñas. Sin embargo, generalmente la estabilización anaerobia se debe considerar para la estabilización de lodos generados en la sedimentación primaria y para caudales promedios diarios de aproximadamente 11 000-19 000 m^3 d^{-1} o mayores.

En instalaciones más pequeñas especialmente en instalaciones sin sedimentación primaria, la estabilización aerobia es la más utilizada, ya que tiende a ser menos compleja que la estabilización anaerobia desde un punto de vista operativo y requiere de menor costo de capital.

La estabilización anaerobia es parte de un sistema de tratamiento de lodos para reducir la masa de sólidos de las aguas residuales, estabilizando los lodos remanentes, produciendo biogás y beneficiándose de su uso, y manteniendo la integridad del medio ambiente y del suministro de agua. La estabilización anaerobia es afectada por procesos previos. Por lo tanto los estabilizadores anaerobios deben diseñarse considerando el sistema de tratamiento de lodos y sus objetivos.

7.1.1. Consideraciones económicas

Los costos de inversión y de operación, que contribuyen al costo del ciclo de vida de un reactor anaerobio deben ser considerados para selección del sistema de estabilización del lodo. El costo de la electricidad y gas natural y la sustentabilidad del sistema pueden afectar significativamente la selección de un sistema de estabilización sobre otro. En resumen es importante considerar si un proceso de estabilización consumirá energía o a la inversa, se producirá una fuente de energía útil como el biogás. Si se quiere obtener un producto comercial (es decir, que el lodo estabilizado se utilice como fertilizante o algún otro uso), entonces es importante considerar sus costos de producción y los beneficios potenciales. estabilización.

7.1.2. Consideraciones ambientales

Las consideraciones ambientales incluyen la calidad del lodo estabilizado, el efecto de las operaciones de la planta en su entorno, la cantidad de los biosólidos a través del proceso de estabilización y la reducción de patógenos. La estabilización anaerobia provee de un método para convertir el lodo a biosólidos a través del proceso de estabilización y de reducción de pa-

tógenos. Los parámetros importantes de calidad de los lodos estabilizados incluyen: el contenido de patógenos, atracción de vectores, el olor y la concentración de metales, todos estos factores afectan el uso benéfico del lodo.

Al seleccionar la tecnología para la estabilización del lodo se debe considerar la cantidad de energía requerida y sus efectos al ambiente. En el caso de la estabilización anaerobia, el biogás puede ser útil para compensar la cantidad de energía requerida por la planta y también permite disminuir o reducir el lodo que se manejará al final del proceso. Otra consideración importante es la legislación que se debe cumplir y el uso o disposición final del lodo estabilizado o biosólido.

7.1.3. Consideraciones de operación

La operación se considera durante el diseño del proceso, incluyendo la complejidad del sistema, la facilidad en la operación y el tipo de tecnología. Debe tenerse en cuenta el efecto de la estabilización anaerobia en la corriente de líquido. Por ejemplo, la estabilización anaerobia aumentará el contenido de amoníaco en corrientes de recirculación y los consumos de energía para procesar el amoníaco recirculado. La estabilización anaerobia se evalua cuidadosamente como parte del proceso general de tratamiento en un PTAR para optimizar el diseño y lograr la mejor solución global.

7.1.4. Consideraciones sociales

La estética y los olores son dos puntos importantes que se deben considerar. Dependiendo de la ubicación y la visibilidad de la planta, los factores como la construcción y/o el funcionamiento de los equipos y los ruidos y olores generados son muy importantes para la comunidad que vive alrededor de la planta.

7.2. Objetivos

Describir las bases teóricas de la estabilización anaerobia de lodos y los principales criterios de diseño de estos reactores. Asi como presentar un ejemplo del diseño de este proceso de estabilización.

7.3. Bases teóricas

En la estabilización anaerobia de lodos los compuestos orgánicos presentes en la materia se convierten a metano, bióxido de carbono y masa microbiana.

El proceso anaerobio involucra un complejo sistema de reacciones bioquímicas y la intervención de un gran número de microrganismos en la degradación de la materia orgánica.

La estabilización anaerobia se aplica en la degradación de residuos orgánicos rurales (animales y agrícolas), lodos residuales de plantas de tratamiento y en el tratamiento de aguas residuales industriales y domésticas.

La estabilización anaerobia se considera adecuada para la estabilización de lodos, cuando su contenido de sólidos volátiles es ≥ al 50 por ciento y en ausencia de compuestos inhibitorios en el proceso.

Las ventajas que presenta la estabilización anaerobia son:

- Produce biogás, el cual puede ser empleado en el calentamiento y mezclado

del reactor. Otro uso es en la producción de electricidad o como gas combustible
- Se reduce la cantidad de sólidos totales para disposición final. Los sólidos totales son destruidos del 30 a 40 por ciento y del 40 al 60 por ciento los sólidos volátiles
- En la estabilización anaerobia se puede generar un lodo estabilizado, que está libre de fuertes olores
- Durante el proceso se destruye en alguna medida el número de organismos patógenos

Las desventajas presentes en la estabilización anaerobia son las siguientes:

- Se requiere que los operadores tengan un entrenamiento especializado
- Se requiere de equipo de calentamiento y mezclado para un buen funcionamiento
- Se requiere de volúmenes grandes del reactor debido al lento crecimiento de las bacterias metanogénicas para sistemas de alta tasa con tiempos de retención de sólidos de 15 a 20 días (WEF, *et al*., 2012). Lo que genera altos costos de construcción del reactor
- El mantenimiento es complicado debido a que los procesos son cerrados
- Existe la posibilidad de explosión por la mezcla de metano y oxígeno debido a fugas o a un mal mantenimiento. Las líneas de condensación del gas causan mayores problemas de mantenimiento

7.3.1. Bioquímica y microbiología del proceso

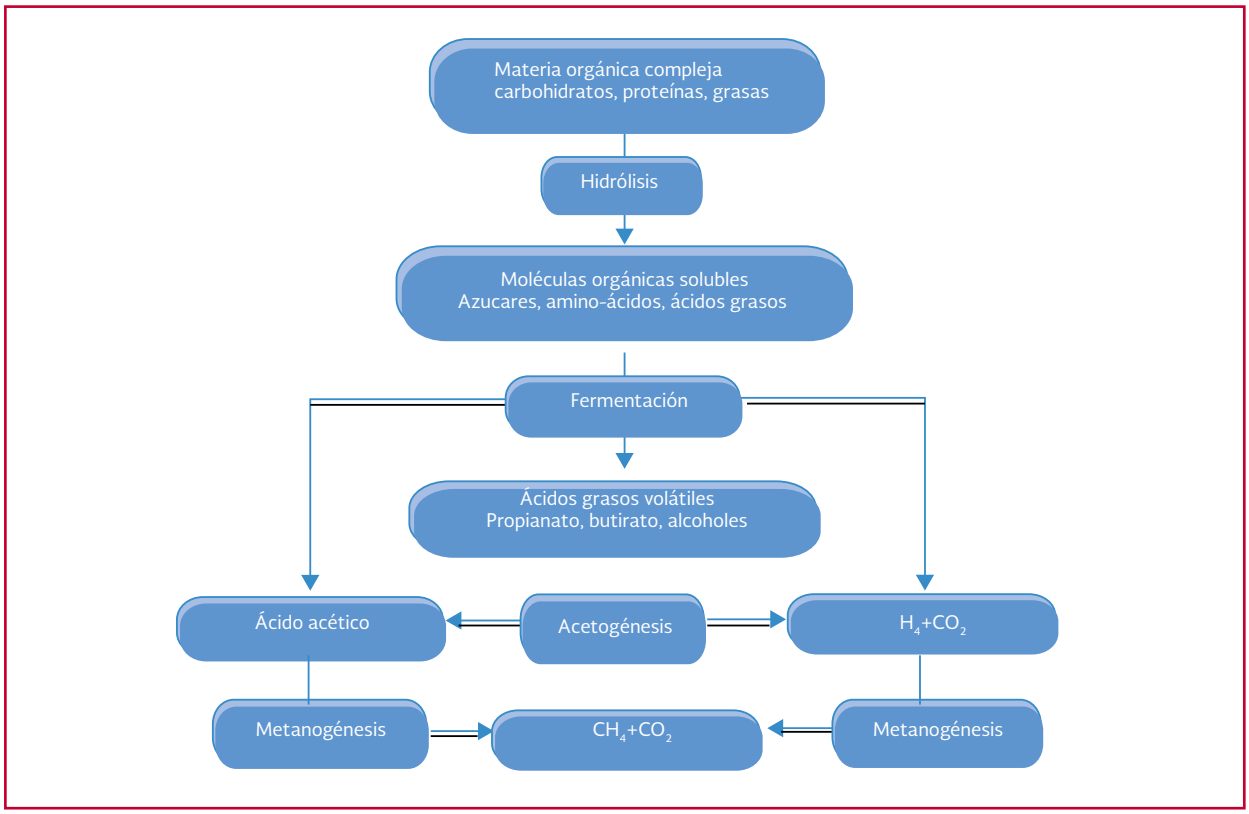
La materia orgánica en ausencia de oxígeno molecular, nitratos y sulfatos se convierte a metano y bióxido de carbono por la combinación de la actividad de cinco diferentes grupos de microorganismos. En el proceso intervienen microorganismos facultativos y anaerobios estrictos. Generalmente las bacterias son incapaces de alimentarse de material orgánico particulado, por lo que los biopolímeros (proteínas, carbohidratos y lípidos) son inicialmente hidrolizados por enzimas extracelulares a compuestos más simples (azúcares, aminoácidos y ácidos grasos). Estos a su vez son utilizados como sustrato por organismos fermentadores (azúcares y aminoácidos) y por oxidadores anaerobios (ácidos grasos superiores).

Los productos de estas reacciones son acetato, hidrógeno, biomasa y productos intermedios como el propionato y butirato. Por su parte, estos últimos son degradados hasta acetato e hidrógeno por un grupo de bacterias conocidas como OHPA (bacterias acetogénicas productoras obligadas de hidrógeno, por sus siglas en inglés) las cuales deben existir en relación sintrófica con las metanogénicas que utilizan hidrógeno. Ver Ilustración 7.1.

La estabilización anaerobia se considera como un ecosistema donde varios grupos de microorganismos trabajan conjuntamente en la conversión de la materia orgánica hasta los productos finales, semejante a metano, dióxido de carbono sulfuro de hidrógeno, agua y amonio, además de la formación de células bacterianas nuevas (Chernicharo & Augusto, 2007).

La degradación de la materia orgánica por vía anaerobia se realiza en tres etapas: hidrólisis, fermentación (conocida como acidogénesis) y metanogénesis. En la hidrólisis (primer etapa), la materia particulada (proteínas, polisacáridos, ácidos nucleicos y lípidos) se convierte a compuestos solubles que se hidrolizan a simples mo-

Ilustración 7.1 Proceso simplificado de estabilización anaerobia, EPA, 2012



nómeros (monosacáridos, aminoácidos, purinas, pirimidinas y ácidos grasos).

En la fermentación (segunda etapa) o acidogénesis, los compuestos solubles (sirven de aceptores y donadores de electrones) se degradan a acetato, hidrógeno, dióxido de carbono, propionato y butirato; éstos dos últimos fermentan para producir hidrógeno, dióxido de carbono y acetato.

El tercer paso corresponde a la metanogénesis, en la que intervienen un grupo de microorganismos conocidos como metanogénicos, los cuales a su vez se subdividen en dos grupos; uno denominado metanogénicos acetoclasticos los que llevan a cabo la conversión del acetato en metano y dióxido de carbono. El segundo grupo de bacterias llamadas metanogénicas hidrogenófilas; usan el hidrógeno como donador de electrones y el dióxido de carbono como aceptor de electrones. Dentro del proceso anaerobio bacterias como las acetogénicas también se pueden utilizar para oxidar el nitrógeno y formar ácido acético, el cual se convierte a metano en una menor proporción.

7.3.2. Parámetros que deben controlarse en la estabilización anaerobia

Existen algunos constituyentes del lodo a tratar que puedan afectar el buen funcionamiento de este proceso, como son compuestos tóxicos, la concentración de la materia orgánica, la temperatura, el pH y los nutrientes.

Para el control de la operación de los reactores anaerobios se específican los siguientes parámetros:

- Físicos: temperatura, mezclado, pH y sólidos totales y volátiles
- Químicos: alcalinidad total, producción de gas, nitrógeno orgánico y total, fosfatos, sulfuros, AGV (ácidos grasos volátiles), DBO, DQO, Ni, Co, Cu , y Fe
- Biológicos: Huevos de helmintos, coliformes fecales y totales

El pH, la alcalinidad total, la concentración de ácidos grasos volátiles, la DQO, y la producción de gas se consideran parámetros de respuesta primarios, ya que con ellos se puede evaluar el funcionamiento del reactor anaerobio.

7.3.2.1. Temperatura

Mantener la temperatura adecuada para el desarrollo de los microorganismos anaerobios, favorece el proceso de tratamiento. Se considera que temperaturas de 30-38 °C ubicadas en el rango mesofílico, son recomendables para alcanzar un buen proceso de estabilización. Otros sistemas se operan en el rango termofilico de 50 a 57 grados centígrados.

La temperatura no solo tiene influencia en la actividad metabólica de la población de los microorganismos sino que también tiene un gran efecto en la tasa de transferencia de gases y en las características de sedimentación de los sólidos biológicos.

Las bacterias formadoras de metano son activas en dos zonas de temperatura, normalmente en el rango mesofílico (29.5-35 °C) y en el rango termofílico (50-60 °C). La estabilización anaerobia de lodos puede ser operada a temperaturas tan bajas como de 20 °C, considerando tiempos de residencia hidráulica suficientes, para que las bacterias puedan producir metano.

7.3.2.2. Potencial de hidrogeno

El pH óptimo para el proceso anaerobio se encuentra alrededor de 7. Un valor de pH fuera del rango de 6.5 a 7.5 puede ocasionar la muerte para la mayoría de las bacterias metanogénicas.El pH debe encontrarse en el rango de 6.8 a 7.4 para la producción de gas metano. Las bacterias formadoras de metano se inhiben a pH menores a 6, que puede ser ocasionada por una cantidad elevada de ácidos grasos volátiles que se acumulan en el reactor. Cuando el pH se encuentra por encima de 8, se generan iones tóxicos para el proceso.

Para realizar el ajuste de pH puede emplearse cal, bicarbonato de sodio ($NaHCO_3$) o hidróxido de sodio (NaOH). Debe tenerse cuidado en la adición de estos compuestos con el fin de evitar la precipitación excesiva de los carbonatos de calcio que se forman.

En (Chernicharo & Augusto, 2007) se menciona que los microorganismos formadores de metano tienen su crecimiento óptimo en un rango de pH 6.6 y 7.4, y que en un proceso estable el rango se puede ampliar entre 6 a 8, pero que valores de pH por debajo de 6 y por encima de 8.3 pueden inhibir la formación de microorganismos metanogénicos.

7.3.2.3. Nutrientes

Los requerimientos de nutrientes (nitrógeno y fósforo) para el crecimiento de microorganismos en el proceso anaerobio son bajos, ya que se producen menos lodos. Para el tratamiento de efluentes industriales, éstos pueden carecer de suficientes nutrientes. Si el residuo carece de nutrientes como nitrógeno (N) y fósforo

(P), el tratamiento puede llevarse a cabo si se le adiciona al sistema los nutrientes en las siguientes relaciones: DQO/N <70 y DQO/P <350.

7.3.2.4. Alcalinidad total

La alcalinidad es una medida para determinar la capacidad buffer de un proceso, por lo que es un parámetro de seguimiento en el control del pH. La concentración de alcalinidad como bicarbonato debe ser aproximadamente 3 000 mg L^{-1} como $CaCO_3$.

Una porción de la alcalinidad aparece como alcalinidad de sales de ácidos volátiles, que resulta de la reacción de ácidos volátiles con el bicarbonato presente. A bajas concentraciones de ácidos volátiles, la alcalinidad como bicarbonato representa aproximadamente la alcalinidad total; sin embargo, como la concentración de ácidos volátiles se incrementa en el proceso anaerobio, la alcalinidad de bicarbonatos es mucho más baja que la alcalinidad total.

La alcalinidad total debe estar presente en suficiente cantidad (2 000 a 5 000 mg L^{-1} de $CaCO_3$) para que se logre reducir el efecto de la producción excesiva de acidez en el reactor, provocada por el incremento de la concentración de ácidos grasos volátiles o por un alto contenido de CO_2. El principal consumidor de alcalinidad es el CO_2 (Metcalf & Eddy, 2003). El dióxido de carbono se produce en las fases de fermentación y metanogénesis. Para incrementar la alcalinidad se puede añadir bicarbonato de sodio, cal o carbonato de sodio. Un rango aceptable de alcalinidad se encuentra entre 1 500 a 5 000 mg $CaCO_3$ L^{-1}.

7.3.2.5. Sólidos totales y volátiles

El realizar un balance de sólidos en el reactor anaerobio, permite determinar la eficiencia de operación del proceso. Una deficiencia en la operación se debe a varias razones, una de ellas es el tiempo en que los sólidos permanecen en el reactor. Un tiempo reducido afectará el proceso teniendo sólidos poco estabilizados. Los sólidos volátiles es el más importante elemento para el control del proceso. La mayoría de los procesos de alta tasa se cargan con un 8 por ciento de SV d, un valor recomendado de sólidos no debería exceder del 5 por ciento de sólidos totales por día. En el tratamiento de lodos por el proceso anaerobio la carga volumétrica se define como la masa de sólidos volátiles adicionados al reactor.

7.3.2.6. Ácidos grasos volátiles

Los ácidos grasos volátiles (AGV) se producen en la etapa de hidrólisis acetogénica de sustancias orgánicas complejas. Un incremento en la producción de éstos ocasiona un desequilibrio de los reactores anaerobios al reducirse el pH hasta valores muy ácidos. Lo anterior tiene efecto directo sobre la actividad metanogénica, por lo que se controla su concentración durante la operación. Un rango aceptable de AGV se encuentra entre 50 y 300 mg L^{-1}; valores por debajo de 500 mg L^{-1} por lo general indican buena estabilización.

7.3.2.7. Sulfuros

Compuestos de azufre oxidado, semejantes a sulfato, sulfito, y tiosulfato, pueden estar presentes en concentraciones significativas en va-

rias aguas residuales industriales y en algún grado para aguas residuales municipales. Estos compuestos sirven como aceptadores de electrones para las bacterias sulfatoreductoras, que consumen compuestos orgánicos en el reactor anaerobio y producen sulfuro de hidrógeno.

El sulfuro de hidrógeno genera mal olor y es corrosivo para los metales; es altamente soluble en agua, con una solubilidad de 2 650 mg L^{-1} a 35 grados centígrados.

Los sulfuros están presentes como H_2S, y sulfuro precipitado. El proceso soporta entre 50 y 100 mg L^{-1} de sulfuros, pero concentraciones superiores a 200 mg L^{-1} son consideradas tóxicas al reactor. En este caso, el pH es determinante ((Metcalf & Eddy, , 2003).

7.3.2.8. Nitrógeno amoniacal

El nitrógeno amoniacal en concentraciones mayores de 1 500 mg L^{-1}, inhibe el proceso anaerobio. Cuando la concentración de nitrógeno amoniacal se encuentra entre 1 500 – 3 000 mg L^{-1} se considera moderadamente inhibitoria para el proceso anaerobio. Para concentraciones mayores a 3 000 mg L^{-1} se presenta una inhibición muy alta. (Metcalf & Eddy, 2003).

La toxicidad por amoniaco puede ocurrir en el tratamiento anaerobio de aguas residuales con un alto contenido de amonio, proteínas o aminoácidos, las cuales se degradan produciendo amonio. El NH_3 es un ácido débil y disociado en agua para formar (NH_4^+) e iones hidroxilo. La cantidad de NH_3 es función de la temperatura y potencial de hidrogeno.

7.3.2.9. Fosfatos totales

El fósforo en sus diversas formas es un nutriente necesario para satisfacer los requerimientos metabólicos de las bacterias encargadas de la degradación del lodo Las relaciones de DBO/N y DBO/P son de 20:1 y de 100:1 en el orden señalado (Sundsrom, 1979).

7.3.2.10. Presencia de Metales

Los metales en concentraciones traza son indispensables para la actividad microbiana. Sin embargo, en concentraciones mayores de 1 mg L^{-1} pueden considerarse como tóxicas al proceso, por ejemplo Cu, Zn y Ni son tóxicos en bajas concentraciones. La toxicidad de los metales se reduce por la presencia de sulfuros que facilitan su precipitación. Aproximadamente de 1.8 a 2.0 mg L^{-1} de metales pesados se precipitan a sulfuros metálicos con 1 mg L^{-1} de sulfuro ($S^=$), (Malina & Pohland, 1992). El hierro y el aluminio no se consideran tóxicos.

7.3.2.11. Producción de natas y espumas

Ocurren durante el arranque, cuando hay una sobrecarga o cuando se desestabiliza el reactor. Las espumas en el reactor pueden originarse por: una alta concentración de grasas, inadecuado o excesivo mezclado, porcentaje alto de sólidos de desecho, sólidos espesados por flotación de aire disuelto, grandes fluctuaciones de temperatura en el reactor, contenido alto de dióxido de carbono, alta alcalinidad, baja concentración de sólidos en el afluente, contenido alto de sólidos en el afluente.

Ilustración 7.2 Reactor anaerobio de lodos

7.3.3. Tipos de procesos

Los tipos de procesos para el tratamiento de lodos por estabilización anaerobia pueden ser: Estabilización de alta tasa, estabilización anaerobia termofílica y la estabilización dual y co-estabilización.

7.3.3.1. Estabilización anaerobia de alta tasa

En este reactor (Ilustración 7.2) el mezclado del lodo se lleva a cabo por recirculación de gas, bombeando o mezclado por tubos de aspiración (separación de espumas y flotantes no toman lugar), el lodo se calienta para aprovechar tasas de estabilización óptima.

La alimentación uniforme es muy importante, y el lodo deberá ser bombeado al reactor continuamente entre 30 minutos a dos horas por ciclo para ayudar a mantener condiciones constantes en el reactor. En los procesos alimentados con un ciclo diario de 8 o 24 h, es importante retirar los lodos estabilizados del reactor antes de adicionar más lodo crudo.

Debido a que no hay separación del sobrenadante en el reactor de alta tasa, los sólidos totales se reducen en un 45 a 50 por ciento y se emiten en forma de gas, los lodos del reactor son aproximadamente la mitad de la concentración con respecto a su alimentación.

Los reactores tienen cubiertas fijas o flotantes. Cualquiera o todas las cubiertas flotantes pueden ser de tipo de soporte de gas, lo cual proporciona una mayor capacidad de almacenamiento de gas. Alternativamente el gas puede almacenarse en contenedores de gas a baja presión o comprimido y almacenado bajo presión.

7.3.3.2. Estabilización anaerobia termofílica

La estabilización anaerobia termofílica se lleva a cabo a temperaturas entre 50 a 58 ºC (122 a 136 ºF) (EPA, 2012). La estabilización termofílica logra una mayor reducción de sólidos volátiles por unidad de volumen del reactor que la estabilización mesofílica, de acuerdo con la ley de Arrehnius.

Las comunidades microbianas que funcionan a temperaturas del rango mesofílico son diferentes a las que funcionan a temperaturas del rango termofílico. Los requerimientos de energía para

la estabilización termofílica son más altos debido a que la temperatura de operación es mayor que la del rango mesofílico.

Los reactores termofílicos son más sensibles a los cambios de temperatura que los mesofílicos, y si el calentamiento se interrumpe la temperatura decae rápidamente. La estabilización termofílica tiene mayores costos de inversión y operación que la mesofílica. Sin embargo la estabilización termofílica produce mayor cantidad de gas, tiene una mayor reducción de sólidos volátiles y de microorganismos patógenos si se compara con la mesofílica. En la Tabla 7.1 se presentan algunas características para el funcionamiento de estos reactores.

Tabla 7.1 Características para el funcionamiento de reactores termofílicos y mesofílicos

Criterio	Termofílica	Mesofílica
Tiempo de retención de sólidos (TRS)	8 - 12 d	15 - 20 d
TRS mínimo para diseño	4.5 – 6 d	12 d
Temperatura de operación	50 - 58 °C	35 - 39 °C
Concentración de sólidos en el lodo alimentado	4.5 – 6.5 por ciento de sólidos totales	3-6 por ciento de sólidos totales
Concentración de lodo en el digestor	2.5 – 4.5 de sólidos totales	1.5 a 4.0 de sólidos totales
Carga de sólidos volátiles	3.2-6.4 kg SV m^{-3} $d^{-1.}$	1.6 – 2.4 kg SV m^{-3} $d^{-1.}$
Concentración de ácidos grasos volátiles	400 -1200 mg L^{-1}	<200 mg L^{-1}
pH	7.0 -7.7	6.8 – 7.2

A pesar de que la estabilización termofílica requiere mayor energía para el calentamiento, tiene varias ventajas sobre la mesofílica:

- Mejora la destrucción de patógenos
- Se obtiene realmente un lodo tipo A
- Mayor capacidad de carga de sólidos volátiles
- Operación estable con menores tiempos de retención de sólidos (TRS)
- Mejora la capacidad de deshidratación del lodo

También tiene algunas desventajas con respecto a la estabiización mesofílica:

- Mayor consumo de energía
- Mala calidad del sobrenadante con altas concentraciones de sólidos disueltos
- Lodo con mayor olor
- Disminuye la estabilidad del proceso

Discusión del proceso

Los reactores termofílicos son de una etapa, de varias etapas y reactores de etapas de temperatura. Los reactores termofílicos de una etapa son similares en configuración a los reactores mesofilicos. Los reactores termofílicos de varias etapas han tenido solo aplicaciones limitadas, son típicamente acoplados con reactores mesofílicos en procesos de múltiples etapas. La estabilización termofílica por etapas incluye un gran reactor seguido de uno o más pequeños. El tiempo de retención de sólidos (TRS) para el primer reactor es típicamente entre 17 a 22 días (EPA, 2012); los reactores adicionales pueden tener TRS de aproximadamente de dos días cada uno.

El reactor anaerobio de etapas de temperatura incorpora ambas digestiones (termofílica y mesofílica). En la configuración termofílica-mesofílica, la fase termofílica opera a 55 ºC (131 ºF) con tres a cinco días de TRS y la fase mesofílica opera a 35 ºC (95 ºF) con un TRS de 10 días o mayor (EPA, 2012).

Un reactor anaerobio termofílico puede conseguir los límites de reducción de patógenos exigidos por la normatividad para un calidad de lodo tipo A, cuando opera con temperaturas arriba de 50°C en un período específico de tiempo durante una operación batch o por lotes. La ecuación 7.1 estima la cantidad de tiempo requerido cuando el reactor opera con una concentración de sólidos menor de 7 por ciento.

$$D = 50\,070\,000/10^{0.14T} \qquad \text{Ecuación 7.1}$$

donde:
D = tiempo, días
T = temperatura,ºC

De acuerdo a la ecuación 7.1 la temperatura de los lodos deberá mantenerse a 55 ºC (131 ºF) por un tiempo mínimo de 24 horas. Si la temperatura es 50 ºC (122 ºF) el tiempo mínimo es de 120 horas. (EPA, 2012) para un tratamiento en batch o por lotes.

La Ecuación 7.2 muestra lo requerimientos del tiempo/temperatura para la desinfección de lodo con un contenido de lodos más grandes de 7 por ciento (U.S.EPA, 1993 en EPA, 2012)

$$D = 131\,700\,000/10^{0.14T} \qquad \text{Ecuación 7.2}$$

donde:
D = tiempo, días
T = temperatura, ºC

Basado en la Ecuación 7.2, para un contenido de sólidos mayor de 7 por ciento, el tiempo mínimo de procesamiento por lotes es de 63 horas a 55 ºC (131 ºF), (EPA, 2012).

En la práctica un incremento en el contenido de sólidos, aumenta la viscosidad y la energía para el bombeo y mezclado del lodo deshidratado.

7.3.3.3. Proceso de estabilización anaerobia de etapas de temperatura

Son instalaciones que comprenden un proceso termofílico seguido de un mesofílico (ver Ilustración 7.3). Son poco comunes comparadas con el convencional mesofílico. El proceso de etapas de temperatura, tiene una mayor velocidad de reacción en la etapa termofílica, la cual es 4 veces más rápida que la mesofílica. Tiene un mejor desempeño por cargas pico y una mayor destrucción de sólidos volátiles.

La adición de la etapa mesofílica también reduce la generación de compuestos olorosos (ácidos volátiles) que no se destruyen en la fase termofílica y mejora la estabilidad del reactor.

Algunos criterios de diseño de este proceso derivados de observaciones que abarcan la experiencia de investigaciones y pruebas piloto a gran escala son los siguientes: (EPA, 2012).

- Rango de temperatura termofílica es 50 a 56 ºC (122 a 133 ºF)
- Tiempos de residencia (termofílica) de 4 a 10 días
- Rango de temperatura mesofílica 35 a 40 ºC centígrados (95 a 104 ºF)
- Tiempo de residencia (mesofílica) 6 a 12 días

7.3.3.4. Procesos emergentes Estabilización dual y Co-estabilización

La estabilización dual es la combinación de la estabilización aerobia autotérmica (en donde el lodo es parcialmente estabilizado) y la estabilización anaerobia mesofílica. La Ilustración 7.4 presenta un diagrama de flujo de un proceso de estabilización dual.

En esta tecnología el reactor aerobio es autotérmico, el cual se diseña con un adecuado suministro de oxígeno o de aire, microorganismos y nutrientes para que el lodo se estabilice. En este proceso se deben minimizar o eliminar la pérdida de calor en el sistema para que el calor producido por la reacciones de oxidación biológica (reacciones exotérmicas), eleven la temperatura al rango termofílico (50-70°C). Debido a que las reacciones termofílicas se realizan con alta velocidad, los tiempos de retención hidráulicos en el reactor son muy bajos. La combinación de este proceso seguido de una etapa de estabilización anaerobia mesofílica tiene las siguientes ventajas:

- La temperatura termofílica destruye los microorganismos patógenos que permite una disposición o uso cumpliendo con la calidad de lodo tipo A
- El lodo en la etapa termofílica realiza una solublización parcial de la materia orgánica, disminuyendo el timpo de retención en la reactor anaerobio (10 d)
- La solubilización produce alcalinidad a través de la amonificación de las proteínas y eleva el pH dando mayor estabilidad al reactor anaerobio

Ilustración 7.3 Configuración del proceso anaerobio de etapas de temperatura, EPA, 2012

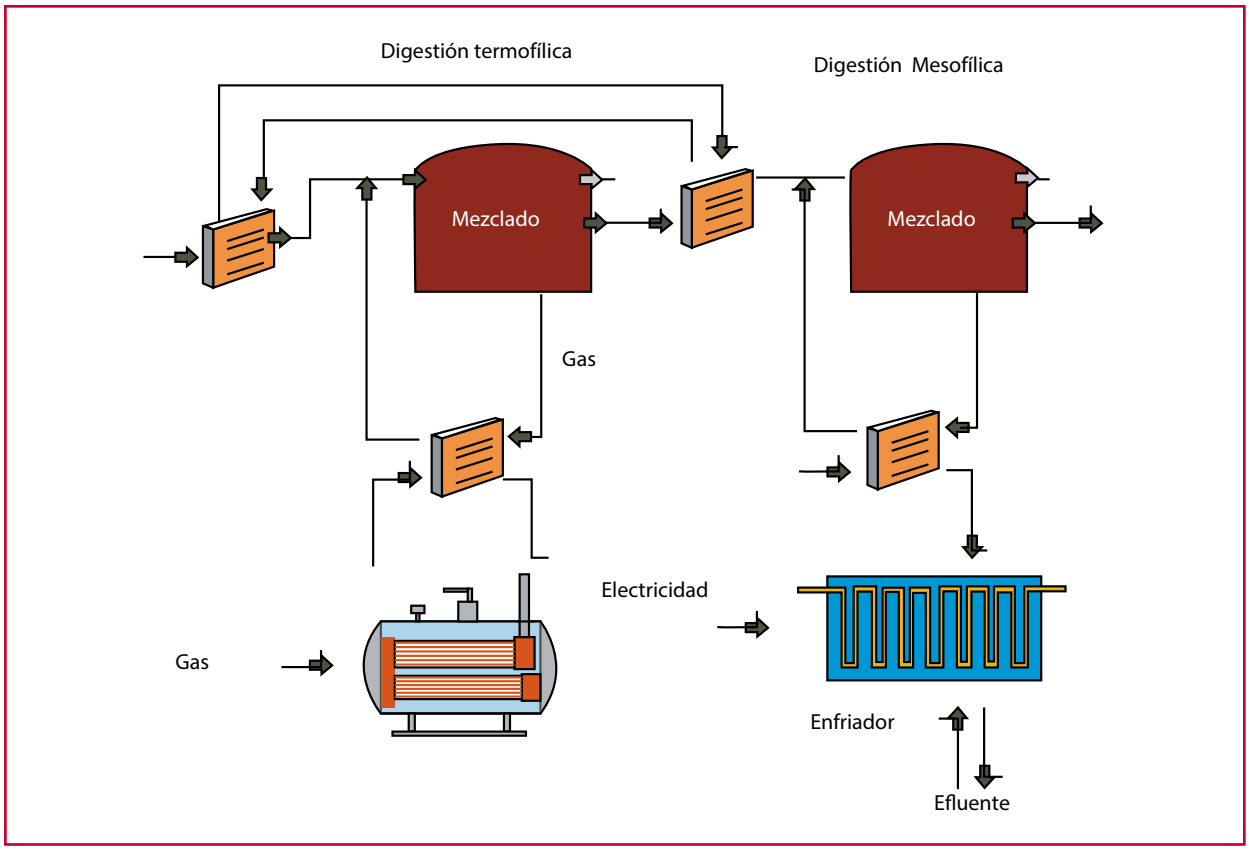
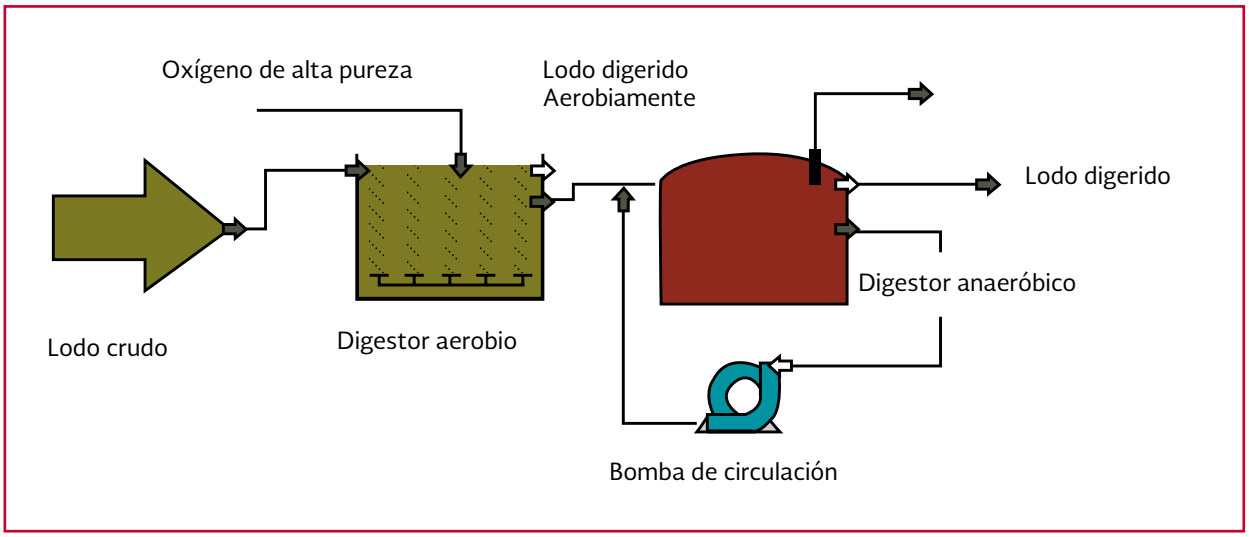


Ilustración 7.4 Proceso de estabilización dual, EPA, 2012



- En el reactor aerobio se realiza una estabilización parcial –solamente para que se genere el calor requerido para mantener la temperatura termofílica, la estabilización finaliza en el reactor anaerobio. La producción metano se reduce por la etapa aerobia
- La mayor cantidad de calor requerida para alcanzar la temperatura termofílica se genera por la reacción biológica (14 650 kJ $kg^{-1}O_2$)
- El reactor anaerobio mantiene su temperatura mesofílica con el calor que trae el lodo de la etapa previa, termofílica. Por lo tanto el calor que se genere en este reactor se puede utilizar para otros propósitos, por ejemplo generación de energía eléctrica

Esta tecnología puede implementarse con muchas ventajas donde se requiere una alta remoción de microognismos patógenos, o donde los reactores anaerobios estén sobrecargados. Una etapa termofílica, seguida de otra etapa mesofílica es muy conveniente ya que se genera un proceso de pasteurización que impide el recrecimiento de microorganismos patógenos.

Este proceso requiere de investigación con el fin de definir el consumo de oxígeno y las ventajas de utilizar oxígeno puro o aire. Estudiar el efecto de la capa de espuma que se forma de la oxigenación con aire. También se requiere determinar el tiempo de retención mínimo en el digestor aerobio sin comprometer la temperatura termofílica. Un mejor control de temperatura tanto en el reactor aerobio y en el anaerobio. Mejorar la operación de los dos reactores para tener una mejor remoción de sólidos volátiles, mayor producción de gas, mejorar la estabilidad del lodo y mejorar las condiciones para la deshidratación del lodo (Messenger *et al.*,1993).

Co-estabilización

La co-estabilización se refiere a la estabilización de los lodos domésticos con otros residuos orgánicos como grasa, aceites, lubricantes, residuos de restaurante, comida, residuos de procesamiento, y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

La co-estabilización con materias primas que contienen concentraciones de sólidos de 15 a 20 por ciento se lleva a cabo en reactores de flujo pisón, tipo silo. Estos procesos se usaron anteriormente en la industria de los residuos sólidos. Actualmente la co-estabilización se realiza en reactores convencionales con concentraciones de sólidos entre 10 y 15 por ciento lo que facilita el mezclado y el bombeo, (EPA, 2012).

La co-estabilización presenta ventajas ya que la mezcla de varios residuos orgánicos permite el balance de nutrientes, la dilución de corrientes de alta carga, consigue la relación carbono-nitrógeno óptima y los porcentajes de humedad requeridos. La desventaja más importante es que el tener diferentes residuos dentro de la planta requiere de infraestructura específica para el manejo y operación de cada uno de ellos.

7.4. Criterios de diseño

7.4.1. Tasa de carga de estabilización

Los métodos tradicionales para determinar el volumen del reactor requerido incluyen: 1) el tiempo de retención de sólidos (TRS), y el tiempo de residencia hidráulica (TRH). 2) la carga de sólidos volatiles. La tasa de carga para reactores anaerobios puede establecerse en función demanda química de oxígeno (DQO) por unidad de volumen. Estas cargas se utilizan comúnmente para el diseño de reactores industriales.

7.4.2. Tiempo de residencia hidráulica y de sólidos

Los factores más comunes para determinar el volumen de un reactor anaerobio son: el tiempo de retención de sólidos (TRS), y el tiempo de residencia hidráulica (TRH); el TRS será usado para representar ambos TRS y TRH. El tiempo de retención de sólidos representa la cantidad promedio del tiempo que el lodo permanece en el reactor y se determina usando la Ecuación 7.3

$$TRS = V/Q \qquad \text{Ecuación 7.3}$$

donde:
TRS = Tiempo de retención de sólidos, d
V = Volumen del tanque del reactor, m^3
Q = Caudal de lodo, $m^3\ d^{-1}$

El TRS afecta el rendimiento del tratamiento de lodos en los reactores anaerobios. El lavado (es el TRS bajo los cuales los organismos se remueven más rápido de lo que se producen) de bacterias metanogénicas ocurre aproximadamente a TRS menores de 5 días. Un factor de seguridad debe aplicarse en el diseño para evitar el lavado debido a variaciones de flujo, perturbaciones en el proceso, y a reducciones de volumen efectivo a causa de la acumulación de gases inertes en el reactor por cambios en los niveles de los tanques.

El 40 CFR Part 503 requiere que el lodo se estabilice entre un TRS de 15 días a 35 a 55 °C y 60 días de TRS a 20 °C para satisfacer sus estándares. (U.S. EPA, 1993).

7.4.3. Tasa de carga de sólidos volátiles

La tasa de carga de sólidos volátiles se refiere a la masa de sólidos volátiles adicionada cada día dividida por el volumen del reactor. Una carga típica para mantener los sólidos suspendidos volátiles (SSV) (máximo por semana o por mes) es de 1.9 a 2.5 kg SSV m^{-3} d^{-1} (0.12 a 0.16 lb SSV d^{-1} ft^{-3}); un valor máximo es de 3.2 kg SSV m^{-3} d^{-1} (0.2 lb SSV d^{-1} ft^{-3}).

Para instalaciones de aguas residuales se recomienda 1.3 kg SSV m^{-3} d^{-1} (0.08 lb SSV d^{-1} ft^{-3}) para reactores con un profundo y efectivo mezclado, y 0.65 kg SSV m^{-3} d^{-1} (0.04 lb SSV d^{-1} ft^{-3}) para sistemas donde el mezclado se acompaña con circulación a través de un intercambiador de calor. Estas tasas de cargas de sólidos se han determinado para un reactor alimentado con una concentración de sólidos totales de 5 por ciento.

7.4.4. Destrucción de sólidos volátiles

El grado de estabilización de un reactor puede medirse por el porcentaje de reducción de sólidos volátiles. La destrucción de sólidos volátiles en un reactor de alta tasa completamente mezclado se estima usando la ecuación empírica:

$$Vd = 13.7\, ln(TRSdes) + 18.9 \quad \text{Ecuación 7.4}$$

donde

Vd = Destrucción de sólidos volátiles, por ciento

TRSdes = Tiempo de retención de sólidos de diseño, días

Esta ecuación empírica proporciona una estimación de la destrucción de sólidos volátiles y no toma en cuenta las variaciones en la alimentación de los lodos.

El porcentaje de destrucción de sólidos volátiles en reactores mesofílicos de mezcla completa puede estimarse en función del tiempo de estabilización en el reactor, (Tabla 7.2).

Tabla 7.2 Destrucción de sólidos volátiles en función del tiempo de estabilización (Metcalf & Eddy, 2003)

Tiempo de estabilización, d	Destrucción de sólidos volátiles (Por ciento)
30	65.5
20	60.0
15	56.0

7.4.5. Pretratamiento

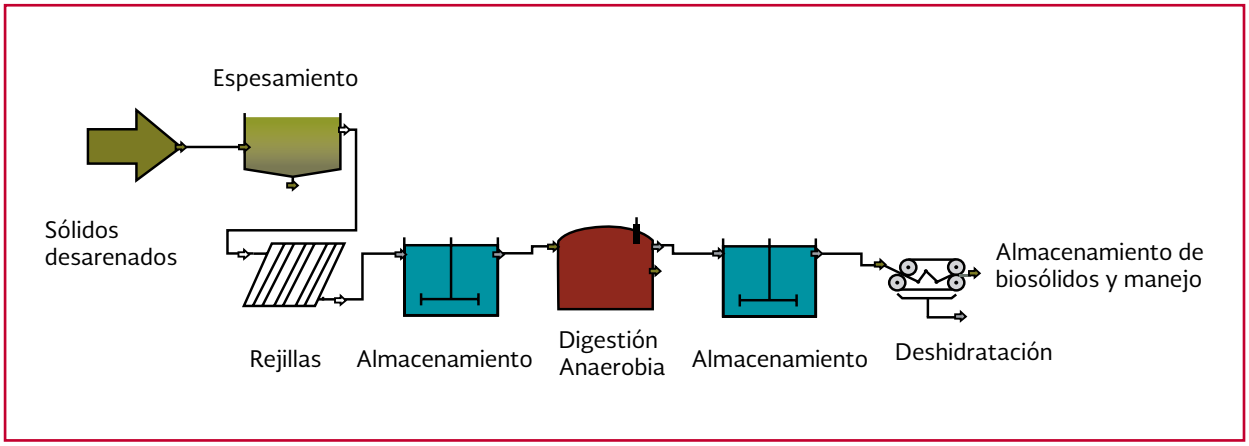
El pretratamiento del lodo es esencial para el proceso anaerobio (convencional o de alto rendimiento). Específicamente, deben seguirse las recomendaciones para la eliminación de residuos, remoción de arenas, y espesamiento.

La Ilustración 7.5 presenta un esquema del pretratamiento que debe tener el lodo previamente desarenado antes de ingresar al reactor anaerobio. El pretratamiento consiste en: espesamiento, cribado, homogeneización y mezclado antes del reactor anaerobio y el almacenamiento y deshidratación después de la estabilización.

7.4.5.1. Caracterización del lodo

Las características del lodo afectan significativamente el proceso de estabilización. Debido a que la población local y la industria varían, es importante conocer el área de servicio; las propiedades químicas del lodo, la relación de lodo

Ilustración 7.5 Descripción del proceso de estabilización simplificado, EPA, 2012



primario y secundario (el lodo primario se estabiliza mas rapidamente que el secundario), la relación de sólidos volátiles con respecto a los totales, la biodegradabilidad del lodo, y la cantidad de inertes en el lodo. Estas características afectan la estabilización del lodo e influyen en el proceso de estabilización anaerobia seleccionado.

También es importante para la selección apropiada del proceso y su diseño la caracterización de otras corrientes de alimentación (incluyendo su contenido energético) semejantes como grasas, aceites, lubricantes, desechos de comida, y corrientes de desechos con una alta carga de DQO para la co-estabilización con lodos de aguas residuales.

7.4.5.2. Espesamiento del lodo

El volumen del reactor y el calentamiento están inversamente relacionados con la concentración de sólidos en la alimentación. El espesamiento del lodo es benéfico para disminuir el volumen del reactor y sus necesidades de calentamiento. El grado de espesamiento lo especifica el proceso de estabilización y el tipo de mezclado en el reactor.

7.4.5.3. Cribado, molienda (desmenuzado y desarenado)

Para un estabilización efectiva se requiere la remoción de basuras, incluyendo arenas y el cribado fino. El cribado del lodo y la remoción de arenas al inicio de una PTAR son importantes durante la planeación del diseño. El espaciado entre las rejillas será determinante para la remoción de los basuras y de partículas sólidas. Los sólidos desmenuzados antes del bombeo y de los procesos, protegen los equipos.

7.4.5.4. Pretratamiento del lodo

Los procesos de pretratamiento mejoran el tratamiento de lodos y se encuentran en algunas instalaciones de reactores anaerobios. Los métodos de pretratamiento se diseñan para mejorar la estabilización del lodo crudo.

El pretratamiento de lisis libera agua intracelular, disminuye la viscosidad del lodo, reduce los requerimientos de mezclado y mejora la deshidratación de sólidos después de la estabilización. Cuando los lodos residuales del sistema de lodos activados contienen organismos filamentosos, el pretratamiento de lisis destruye estos organismos e inhibe su formación.

7.4.5.5. Mezclado del lodo

Un tanque de mezclado que recibe lodo primario y secundario espesado mejora el proceso de estabilización permitiendo la alimentación continua al reactor, Un tanque de mezclado es útil cuando se requiere bombear lodo primario y secundario espesado a varias instalaciones de la planta.

Los tanques de mezclado se construyen de varias formas (cilíndricos o rectangulares) y son de concreto con un rebosadero de emergencia y las conexiones para un sistema de gas que incluye válvulas de alivio de presión / vacío. En la parte inferior presenta una inclinación (con una pendiente mayor al 20 por ciento) (EPA,2012).

Un tanque de mezclado puede tener calentamiento, dependiendo de la temperatura de alimentación del lodo y de la temperatura de operación del reactor.

7.5. Diseño de las instalaciones del reactor

7.5.1. Configuración

Los procesos de estabilización anaerobia se clasifican por el número de etapas de estabilización (simple, etapas múltiples de la misma fase de estabilización) y por las diferentes fases (ácida, gas, o termofílica seguida de mesofílica).

Reactor anaerobio de dos etapas

El reactor de dos etapas es una tecnología de estabilización de alta velocidad, divide la fermentación y la separación de sólido-líquido en dos tanques en serie; ver Ilustración 7.6. El primer tanque se usa para la estabilización (equipado con unidades de calentamiento y agitación), y el segundo tanque funciona sin calentamiento y sin mezclado. La estabilización de dos etapas consiste en un reactor de alta tasa seguido por un tanque de almacenamiento de lodos.

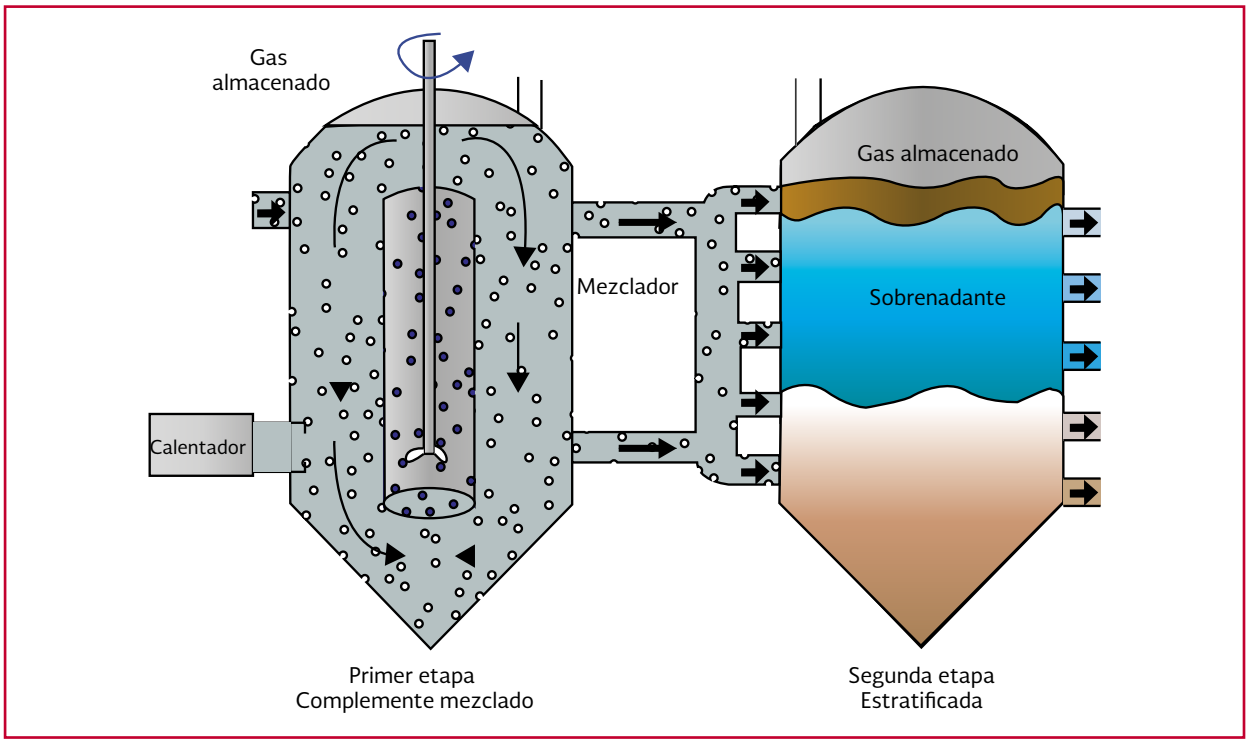
Reactor de una etapa

En un sistema de estabilización de una etapa y como se puede observar en la Ilustración 7.7, la fase de reacción anaerobia toma lugar en un solo tanque. En el que se muestra en forma simple el esquema de tratamiento, se omiten las entradas múltiples, se presenta un esquema sencillo de una caldera, esta puede reemplazarse por otro sistema de calentamiento del lodo.

Las instalaciones con reactores múltiples pueden tener sistemas de calentamiento de agua proveniente de múltiples calderas o equipos combinados para la generación de calor y energía eléctrica.

Los reactores de una etapa representan a los antiguos reactores de baja tasa y es la configuración más básica de reactor consiste en un recipiente cilíndrico sin calentamiento y sin dispositivo de mezclado. La biomasa se mezcla sólo por el movimiento del biogás a través de la materia sólida, acumulándose en la parte superior del tanque.

Ilustración 7.6 Esquema de la estabilización anaerobia en dos etapas



El biogás se extrae para su almacenamiento o como una fuente de energía renovable.

La mayoría de los reactores anaerobios modernos son de una sola etapa, o reactores de alta tasa, los cuales se caracterizan por auxiliarse de calentadores, mezcladores, espesamiento y alimentación uniforme. El tanque es mezclado y el sobrenadante no se retira separadamente; el proceso es más estable y el volumen requerido es menor en comparación con el proceso de baja tasa.

La Ilustración 7.8 muestra un esquema típico de un reactor anaerobio de alta tasa de una etapa, en la que se muestra el detalle de varias entradas y salidas del lodo al reactor.

7.5.2. Geometría del tanque

La forma y la configuración de los reactores afectan su rendimiento. Las consideraciones de diseño, incluyen la forma en conjunto, tipo de cubierta, la pendiente del fondo, la configuración del domo de gas, alimentación del lodo, y los sistemas de extracción de lodo. El sellado y revestimiento del reactor es otra consideración importante del diseño porque afecta el mantenimiento y la duración del reactor.

La Ilustración 7.9 muestra la forma de tres tipos de reactores anaerobios

7.5.3. Alimentación

Idealmente los lodos deberían ser alimentados en una forma constante al reactor, ya que la variación en el caudal puede afectar el balance entre la fase acidogénica y metanogénica ocurrida en el reactor. Sin embargo una alimentación continua no siempre es posible, la mayoría de las plantas establecen un ciclo de alimentación de 5 a 10 minutos sobre uno de 30 minutos a 2

Ilustración 7.7 Configuración del proceso anaerobio mesofilico de una etapa, EPA, 2012

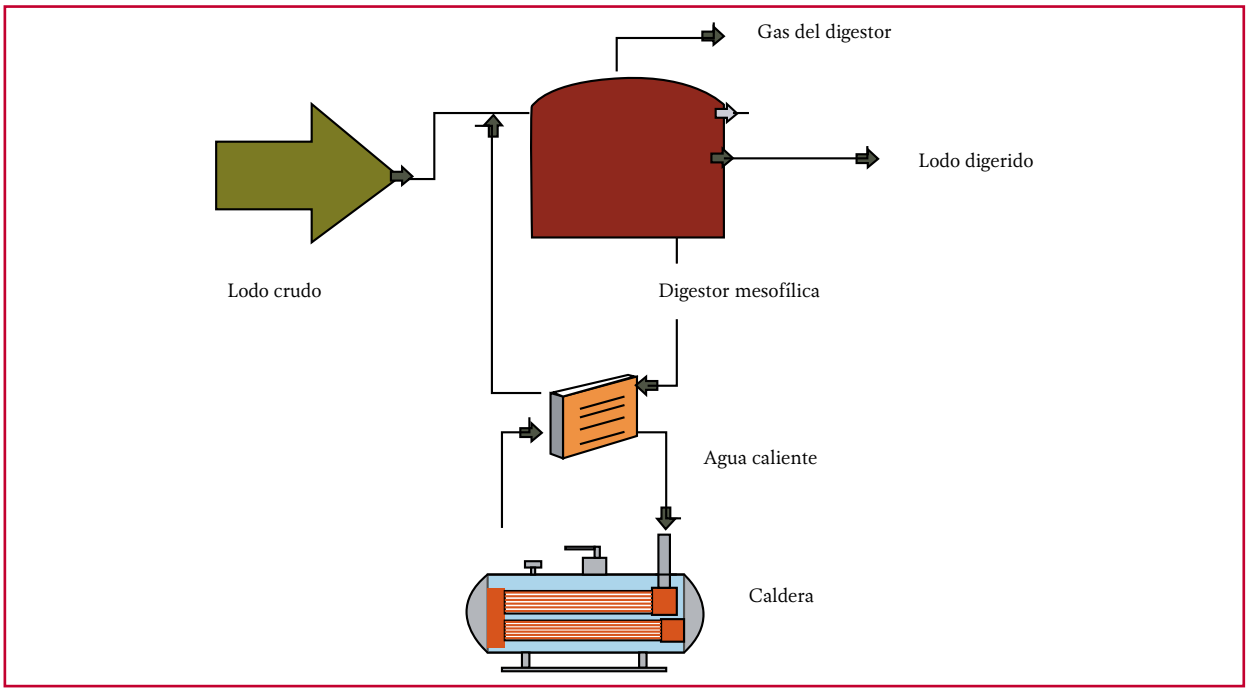


Ilustración 7.8 Diagrama esquemático típico de un reactor anaerobio de alta tasa de una etapa, Metcalf & Eddy, 2003

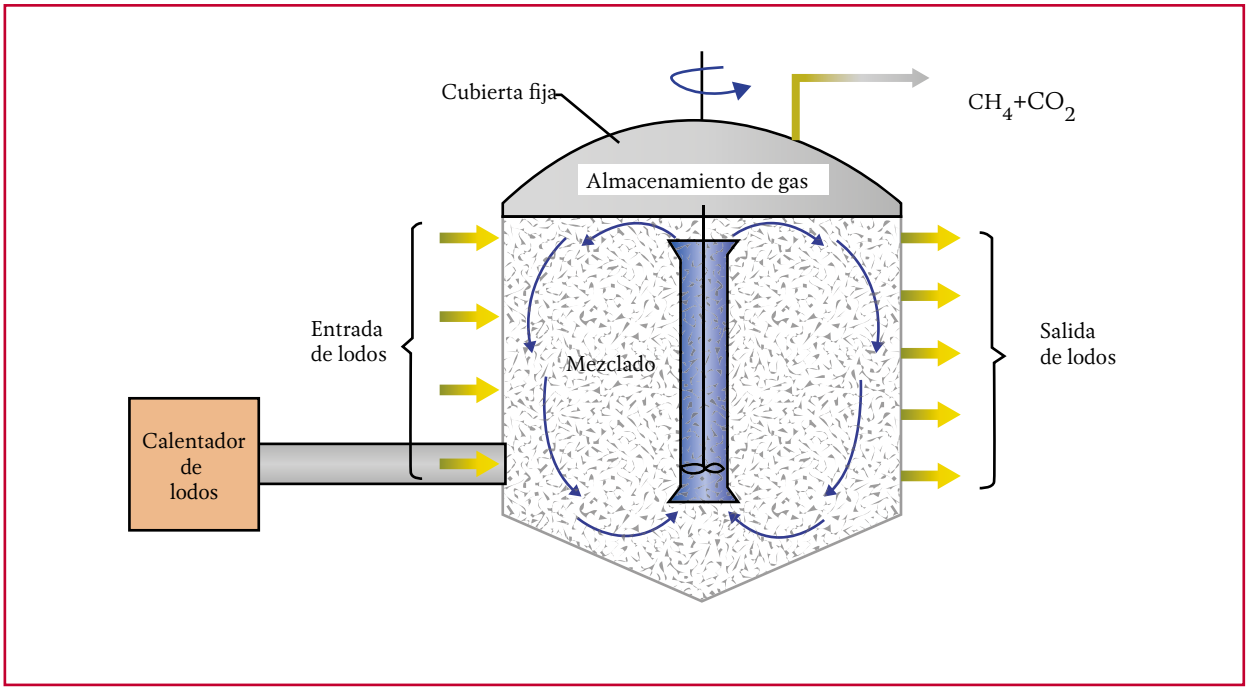
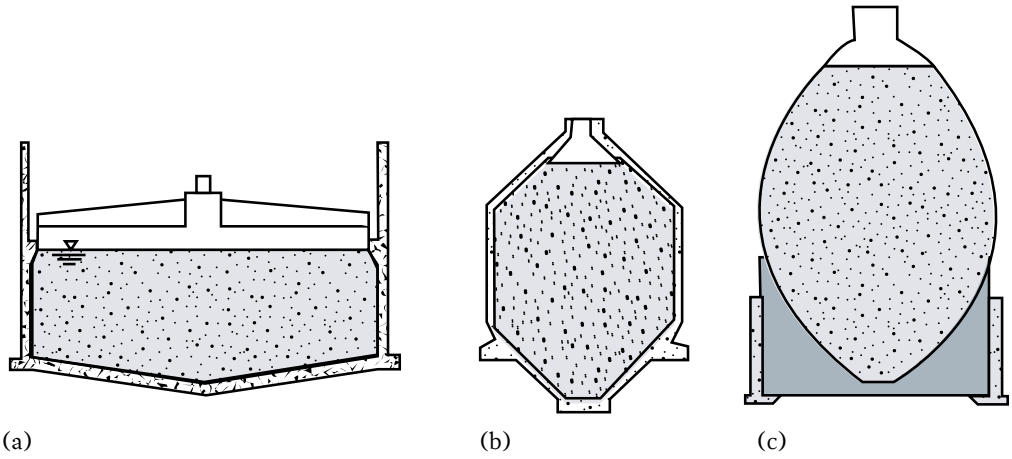


Ilustración 7.9 Formas típicas de reactores anaerobios: (a) cilíndrica con construcción de concreto armado. b).- Diseño Alemán convencional con construcción de concreto armado. c).- Forma de huevo con revestimiento de acero.-Cubiertas y salidas, Metcalf & Eddy, 2003



Formas típicas de digestores anaerobios :

(a) Cilíndrica con construcción de concreto armado
(b) Diseño Alemán convencional con construcción de concreto armado
(c) Forma de huevo con revestimiento de acero

horas para mantener constantes las condiciones del reactor.

Para plantas más pequeñas con personal para un solo turno, deben hacer al menos tres alimentaciones, al inicio, a la mitad y la otra al final del día. Para evitar la formación de cortos circuitos y mantener una concentración baja de patógenos en el efluente. Los reactores con una alimentación intermitente pueden remover los lodos estabilizados antes de alimentar.

Todas las tuberías de alimentación del lodo se diseñan con instalaciones para rascado, limpieza y enjuague. El enjuague y la limpieza de las tuberías del lodo es más efectiva cuando se usa vapor, sin embargo, el agua caliente o lodo estabilizado caliente también puede limpiar la tubería.

7.5.4. Calentamiento del lodo

La alimentación y las fluctuaciones en la temperatura pueden tener efectos perjudiciales sobre la operación del reactor anaerobio. Una pequeña fluctuación de 1 a 2°C (1.8 a 3.6°F) puede formar espuma en el reactor (EPA 2012). La mayor demanda de calor es durante el calentamiento del lodo alimentado. La pérdida de calor en el tanque de estabilización representa una cantidad de calor que debe adicionarse. Los tanques que se construyen a cierta profundidad, generan menores pérdidas de calor al tener un área menor expuesta al ambiente.

Las pérdidas de calor a través del tanque dependen de su forma, del material con que están construidas las paredes y el fondo del reactor, de

la falta de material aislante, de la temperatura interna y externa.

Para tanques cilíndricos la forma más adecuada es aquella en que el diámetro es igual a la profundidad(EPA 2012).

Las pérdidas de calor pueden expresarse:

$$Q = UA\Delta T \qquad \text{Ecuación 7.5}$$

donde:

Q = pérdidas de calor, J s^{-1}, BTU h^{-1}

U = Coeficiente de transferencia de calor en la superficie, J m^{-2} s^{-1} °C (BTU ft^{-2} h^{-1} $°F^{-1}$)

A = área exterior, m^2 (ft^2)

ΔT = Pérdida de temperatura (temperatura interna – temperatura externa de la superficie) °C (°F)

7.5.5. Mezclado

El propósito del mezclado es lograr la distribución uniforme del lodo alimentado en el reactor moviendo los subproductos de la estabilización a través del líquido, impide la estratificación de los sólidos, y crea condiciones homogéneas en el tanque de estabilización.

Se han utilizado varios sistemas de mezclado, el más comúnmente usado es el de inyección de gas, agitadores mecánicos y bombeo mecánico. Algunas instalaciones utilizan una combinación de mezclado por gas y recirculación del lodo por bombeo.

El sistema de inyección de gas usado en tanques cilíndricos se clasifica como no confinado o confinado, (ver Ilustración 7.10 a y b). Los sistemas de gas no confinados recogen el gas en la parte superior de los reactores, lo comprimen y luego lo descargan a través de difusores inferiores por medio de una serie de lanzas radialmente colocadas y montadas en la parte superior del reactor.

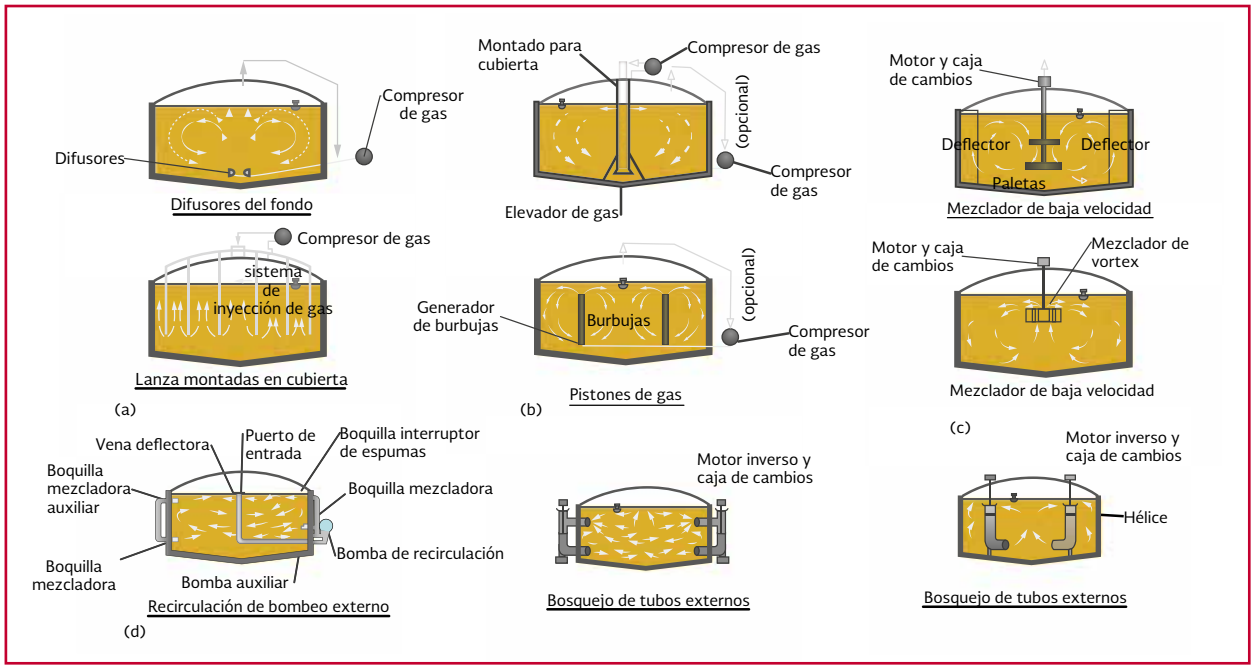
El sistema de gas no confinado mezcla el contenido del reactor por la liberación de burbujas de gas que ascienden a la superficie y mueven el lodo. Estos sistemas son adecuados para reactores con cubiertas fijas, flotantes o de almacenamiento del gas.

En sistemas de gas confinado, el gas comprimido se recoge en la parte superior del reactor y se descarga a través de los tubos confinados. Los principales tipos de sistemas confinados son los elevadores de gas y los de pistón de gas; el primero consiste en tuberías de gas sumergidas o lanzas insertadas dentro de un tubo eductor de gas o de elevadores de gas. El gas comprimido se libera de las lanzas o tuberías y las burbujas de gas suben creando un efecto de ascenso de aire.

En el sistema de pistón de gas, las burbujas de gas se elevan intermitentemente desde la parte inferior de un tubo cilíndrico o pistón. Las burbujas suben y actúan como un pistón, empujando el lodo a la superficie. Estos sistemas son adecuados para cubiertas flotantes o gas fijo.

Los sistemas de agitación mecánica comúnmente utilizan turbinas de baja velocidad o mezcladores (ver Ilustración 7.10 c). En ambos sistemas, el impulsor rotatorio desplaza el lodo, mezclando el contenido del reactor. Los sistemas de turbina de baja velocidad generalmente tienen un motor montado en la cubierta con dos impulsores localizados a diferentes profundidades, este sistema se utiliza en reactores que tienen una cubierta fija o flotante.

Ilustración 7.10 Dispositivos utilizados para el mezclado de los reactores anaerobios de alta tasa: a) sistemas de inyección de gas no confinado. b) sistemas de inyección de gas confinado, c).- sistemas de agitación mecánica d).- sistemas de bombeo mecánico, Metcalf & Eddy, 2003



La mayoría de los sistemas de recirculación se bombean mecánicamente con bombas tipo propela, montadas en tubos externos e internos, (ver Ilustración 7.10 d). La circulación del lodo provoca el mezclado. Estos sistemas se utilizan para reactores con cubierta fija.

7.5.6. Limpieza

La remoción de arenas que se sedimentan en el fondo del reactor, dependen de la tasa de acumulación en la que influyen diferentes factores como: instalaciones adecuadas para la remoción de arenas en las obras de captación de la planta, la capacidad del sistema de mezclado para mantener la arena en suspensión, el método de purga o retiro de lodos y la forma del reactor.

La frecuencia de limpieza del reactor oscila entre un año a 10 o más años, dependiendo de los factores mencionados. Se deberán colocar escotillas de acceso múltiples, sobre la cubierta del reactor para permitir la realización de la limpieza.

7.5.7. Usos del Biogás

El biogás se utiliza en las calderas para los reactores y en el calentamiento de edificios y como combustible en sistemas combinados de calor y energía. El biogás puede procesarse y usarse como combustible para vehículos en forma de gas natural comprimido o gas natural licuado.

El biogás producido en los reactores se deberá transportar de forma segura para su uso. Se debe considerar que es explosivo.

Los diseñadores deben tener en cuenta la producción de biogás, las horas pico, el transporte, la seguridad, el equipo, los quemadores de gas, el tratamiento para el uso beneficioso, el almacenamiento y la adición de cloruro férrico para

el tratamiento del sulfuro de hidrógeno. En el capítulo 14 se presenta una mayor información sobre el uso del biogás.

7.5.8. Control de olor

Los reactores anaerobios son fuente de olor en las plantas de tratamiento. El mejor método para controlar el olor es a través de la contención.

En áreas que son sensibles a los olores, se deben considerar los reactores de cubierta fija o con cubiertas que proporcionan un sello seguro.

7.6. Ejemplo de diseño

a) Diseño de reactores anaerobios

Los reactores anaerobios son reactores biológicos cerrados hechos de concreto o de acero. Dentro de estos reactores el lodo se mezcla y calienta. En los países de clima templado, generalmente el biogás producido se almacena y se utiliza.

La configuración de los reactores anaerobios varía dependiendo del área aprovechable, de la necesidad de mantener las condiciones de mezcla completa y de la extracción de arena y espuma.

Los reactores anaerobios tradicionales tienen un diámetro entre 8 y 40 m, con una pendiente cónica al fondo de 1:3, que favorece la remoción de arena, pero presenta dificultades en su construcción.

Recientemente se construyen los reactores tipo huevo, que son preferidos por los diseñadores y operadores, debido a que es más fácil el control de la espuma y la arena gracias a la pendiente de las paredes laterales.

La mayoría de los reactores de lodos de forma cilíndrica tienen menos de 25 metros de diámetro. El diseño tradicional tiene una relación altura-diámetro de 1:2 a 1:3, para una pendiente de fondo de 33 por ciento. También se han diseñado con una relación 1:1 y con cero pendiente en el fondo.

b) Temperatura y balance de calor

La temperatura dentro de los reactores anaerobios debe mantenerse cerca de 35°C para un buen funcionamiento. Esto debe considerarse en climas fríos, donde el lodo crudo puede estar más debajo de 15 °C, Sperling & Chernicharo, 2005.

El lodo crudo tiene un poder de calentamiento de 11 a 23 MJ kg^{-1}ST sobre base seca, dependiendo del tipo de lodo y de la concentración de sólidos volátiles, Sperling & Chernicharo, 2005.

Para mantener los reactores anaerobios cerca de 35 °C (estabilización mesofílica), se requiere el calor necesario para calentar el lodo y para compensar las pérdidas de calor por las paredes del tanque, cubierta y fondo. Sperling & Chernicharo, 2005.

La Ecuación 7.6 calcula la demanda de energía diaria del reactor.

$$Q_E = Mf \times Cp \times \Delta T1 + H \qquad \text{Ecuación 7.6}$$

donde:

Q_E = Demanda de energía diaria del reactor de lodos, kJ d^{-1}

Mf = Masa de lodo crudo alimentado al reactor

Cp = Calor específico del agua, kJ kg^{-1} $°C^{-1}$

$\Delta T1$=Diferencia entre la temperatura del lodo crudo y la temperatura del reactor, °C

H = Pérdida de calor a través de las paredes, kJ d^{-1}

El calor perdido a través de todas las superficies del reactor puede ser determinado por:

$$H = U \times A \times \Delta T2 \times 86.4 \qquad \text{Ecuación 7.7}$$

donde:

U = Coeficiente de transferencia de masa, J sm^{-2} $°C^{-1}$

A = Área de la superficie externa del reactor, m^2

$\Delta T2$ = Diferencia entre la temperatura interna y externa del reactor,°C

El tiempo de residencia hidráulico y el de sólidos se pueden determinar por la ecuación Ecuación 7.8.

$$TRH = \theta_c = \frac{V}{Q} \qquad \text{Ecuación 7.8}$$

donde:

TRH = Tiempo de residencia hidráulico, d

θc = Tiempo de retención de sólidos, d

V = Volumen del reactor, m^3

Q = Caudal de lodo en el afluente, m^3 d^{-1}

Con la Ecuación 7.9 se calcula el volumen requerido para el reactor de lodos.

$$V = \frac{CSV\ del\ influente}{COV} \qquad \text{Ecuación 7.9}$$

donde:

V = Volumen del reactor, m^3

CSV del afluente = Carga de sólidos volátiles, kg SV d^{-1}

COV = Carga orgánica volumétrica, kg SV m^{-3} d^{-1}

En la Tabla 7.3 se elistan los parámetros típicos para el diseño de reactores anaerobios de lodos.

Tabla 7.3 Parámetros típicos para el diseño de reactores anaerobios de lodos, (Sperling & Chernicharo, 2005)

Parámetros	Valores típicos
Tiempo de retención (θc), d	18 -25
Carga orgánica volumétrica, kg SV m^{-3} d^{-1}	0.8 – 1.6
Carga volumétrica de sólidos totales, kgSST m^{-3} d^{-1})	1.0 – 2.0
Concentración de sólidos en el afluente del lodo crudo, por ciento	3 - 8
Fracción de sólidos volátiles en el lodo crudo, por ciento	70 - 80
Eficiencia en la reducción de sólidos totales, por ciento ST	30 - 35
Eficiencia en la reducción de sólidos volátiles, por ciento SV	40 - 55
Producción de biogás, m^3 kgSV destruidos	0.8 – 1.1
Valor calorífico del biogás, MJ m^{-3}	23.3
Producción del lodo estabilizado, gST habitante por día	38 - 50
Producción de biogás, L habitante por día	20 -30
Poder de calentamiento del lodo crudo, MJ $kgST^{-1}$	15 -25
Poder de calentamiento del lodo estabilizado, MJ $kgST^{-1}$	8 - 15

7.7. Ejemplo de diseño

Diseñar un reactor anaerobio para la estabilización de una mezcla de lodo primario y secundario con un caudal de lodo de Q= 64.2 m^3 d^{-1} . La carga de lodo al reactor es de 3 307 kg ST d^{-1} y tiene una relación SV/ST de 0.77, (Sperling & Chernicharo, 2005).

Solución:

1) Determinar el volumen del reactor:
   a) Parámetros de diseño:
      Carga orgánica volumétrica (COV) tomada de la Tabla 7.3:
      1.4 kg SV m^{-3} d^{-1}
      Volumen reservado para el biogás en el reactor: 15 por ciento del volumen necesario para la estabilización

b) El primer paso es calcular la carga de sólidos volátiles (CSV):

$$CSV = carga\ del\ lodo\ mixto\ al\ reactor \times la\ relacion\ SV/ST$$

Ecuación 7.10

$$CSV = 3\ 307\ kgST\ \ d^{-1} \times 0\ 77\ kgSV\ por\ kg\ ST = 2\ 546.39\ kgSV$$

Ecuación 7.11

c) Una vez calculada la CSV se determina el volumen del reactor de acuerdo a la Ecuación 7.12

$$V = \frac{CSV}{COV}$$ Ecuación 7.12

$$V = \frac{2\,546\ kgSV\ \ d^{-1}}{1.4\ kgSV\ \ m^{-3}\ d^{-1}} = 1\,819\ m^3$$ Ecuación 7.13

d) Para determinar el volumen total del reactor se debe considerar el volumen reservado para la acumulación del biogás, el cual se calcula de la siguiente forma:

$$V\ reservado\ para\ el\ biogas = V\ del\ reactor \times \%\ de\ volumen\ considerado\ para\ el\ biogas$$

Ecuación 7.14

$$V = 1\,819\ m^3 \times 0.15 = 273\ m^3$$

Ecuación 7.15

e) Finalmente se calcula el volumen total del reactor, el cual es la suma del volumen calculado en el punto (c) más el volumen reservado para el biogas:

$$V = 1\ 819\ m^3 + 273 = 2\ 092\ m^3$$ Ecuación 7.16

2. Una vez cálculado el volumen del reactor se determina el tiempo de residencia hidráulico (TRH), para este cálculo el volumen que se considera no es el total si no el calculado en el punto c).

$$TRH = \frac{V}{Q}$$ Ecuación 7.17

$$TRH = \theta_C = \frac{1\ 819\ m^3}{64.2\ m^3\ d^{-1}} = 28\ d$$ Ecuación 7.18

La evaluación económica de los costos de construcción de los reactores anaerobios, sugieren utilizar altas tasas de carga de sólidos volátiles para reducir el tiempo de retención a menos 25 días.

3. Partiendo de la carga de lodo mixto en el reactor, determinar la concentración de ST, SV, SF en el afluente y efluente de lodo del reactor anaerobio.

   La carga de lodo mixto al digestor es de 3 307 kg ST d^{-1}, lo cual es igual a la cantidad de ST en el afluente.

   Para determinar los SV presentes en el afluente se utiliza la Ecuación 7.19

$$SV\ afluente = \frac{SV}{ST} \times ST\ en\ el\ afluente = 0.77 \times 3\,307 = 2\,546\ kg\ SV\ \ d^{-1}$$

Ecuación 7.19

a) La cantidad de Sólidos fijos (SF) en el afluente es:

$$SF\ en\ el\ afluente = \left(1 - \frac{SV}{ST}\right) \times ST\ en\ el\ afluente = (1 - 0.77) \times 3\,307 = 761\ kg\ SF\ \ d^{-1}$$

Ecuación 7.20

Los sólidos fijos no cambian, pero los sólidos volátiles (SV) son parcialmente removidos durante la estabilización. De acuerdo a la Tabla 7.3, la eficiencia de remoción de SV esta entre 40 a 55 por ciento; asumiendo una remoción de SV del 50 por ciento, los ST, SV y los SF en el efluente del reactor anaerobio son:

b) La cantidad de sólidos fijos en el efluente del reactor.

$$SF\ en\ el\ afluente = Solidos\ Fijos\ del\ efluente = 761\ kg\ SF\ \ d^{-1}$$

Ecuación 7.21

c) La cantidad de sólidos volátiles en el efluente del reactor es:

$$SV\ en\ el\ efluente = \\ = (1 - Eficiencia\ de\ remocion\ de\ SV) \times (SV\ en\ el\ influente) \\ = (1 - 0.50) \times (2\ 546\ kg\ SV\ \ d^{-1}) = 1\ 273\ kg\ SV\ \ d^{-1}$$

Ecuación 7.22

d) La cantidad de sólidos totales en el efluente del reactor es:

$$SV\ en\ el\ efluente = \\ = (SF\ en\ el\ efluente) + (SV\ en\ el\ efluente) \\ = (761\ kg\ SF\ \ d^{-1}) \times (1\ 273\ kg\ SV\ \ d^{-1}) = 2\ 034\ kg\ ST\ \ d^{-1}$$

Ecuación 7.23

El caudal del efluente es el mismo que el del afluente de 64.2 $m^3\ d^{-1}$.

e) La concentración de los ST en el efluente del reactor es:

$$Concentracion\ de\ ST = \\ = \frac{carga\ de\ ST}{Q} = \frac{(2\ 034\ kg\ ST\ \ d^{-1}) \times (1\ 000\ g\ \ kg^{-1})}{64.2\ m^3\ \ d^{-1}} \\ = 31\ 682\ g\ \ m^{-3}$$

Ecuación 7.24

f) Producción de biogas

Balance de calor en el reactor:

- El poder calorífico del lodo crudo es: 23 MJ $kgST^{-1}$ (Tabla 7.3)
- El poder calorífico del lodo estabilizado es: 13 MJ $kgST^{-1}$ (Tabla 7.3)
- La producción de biogás: 0.8 m^3 kgSV $destruidos^{-1}$ (Tabla.3)
- El poder calorífico del biogás: 23 MJ m^{-3} (Tabla 7.3)

Producción específica de biogas: 0.8 m^3 de biogás por kg de SSV destruídos (Metcalf & Eddy, 2003)

Volumen de biogás

$$Volumen\ de\ biogás = \\ = (SV\ en\ el\ efluente) \times (producción\ de\ biogás) \\ = (1\ 273\ kg\ SV\ \ d^{-1}) \times (0.8\ ^3 m\ \ kgSV\ destruidos^{-1}) = 1\ 018\ m^3$$

Ecuación 7.25

Poder calorífico del lodo crudo entrando al reactor:

$$Poder\ calorifico\ del\ lodo\ crudo \\ = (carga\ de\ lodo\ mixto\ que\ entra) \\ \times (el\ poder\ calorifico\ del\ lodo\ crudo) \\ = (3\ 307\ kg\ ST\ \ d^{-1}) \times (23\ MJ\ \ kgST^{-1}) = 76\ 061\ MJ\ \ d^{-1}$$

Ecuación 7.26

Poder calorífico del biogás:

$$\begin{aligned}&Poder\ calorifico\ del\ biogas\\&=(Volumen\ del\ biogas)\times(el\ poder\ calorifico\ del\ biogas)\\&=(1\,018\,m^{3})\times(23.3\,MJ\ \ m^{-3})=23\,719\,MJ\ \ d^{-1}\end{aligned}$$

Ecuación 7.27

$$\begin{aligned}&Poder\ calorifico\ del\ lodo\ estabilizado\\&=(ST\ en\ el\ efluente)\\&\times(el\ poder\ calorifico\ del\ lodo\ estabilizado)\\&=(2\,034\,kg\ ST\ \ d^{-1})\times(13\,MJ\ \ kg\ ST^{-1})=26\,442\,MJ\ \ d^{-1}\end{aligned}$$

Ecuación 7.28

Las principales características del reactor y del proceso de estabilización se muestran en la tabla 7.4.

Tabla 7.4 Características del reactor y del proceso de estabilización anaerobio

Parámetro	Valor
Flujo de lodo	64.2 $m^3\ d^{-1}$
Carga de lodos	2 542 kg SV d^{-1}
Volumen del reactor	2 092 m^3
TRH	28 d
Destrucción se sólidos volátiles (SV)	50 por ciento
Volumen de biogás	1 018 $m^3\ d^{-1}$
Poder calorífico del biogás	23 718 MJ d^{-1}
Poder calorífico del lodo estabilizado	26 442 MJ d^{-1}

8

Estabilización aerobia de lodos

8.1. Introducción

El objetivo de la estabilización aerobia o la estabilización oxidativa bioquímica de los lodos es disminuir la cantidad de la materia orgánica biodegradable evitando así la emisión de olores por putrefacción durante su manejo y disposición final. El proceso involucra la oxidación directa de la materia biodegradable por los microorganismos y la oxidación del material celular microbiano. En este proceso se logran porcentajes de reducción de los sólidos suspendidos volátiles de 40-50 por ciento, similares a los obtenidos mediante la estabilización anaerobia de los lodos (Rife & Carayon, 2010).

Dentro del metabolismo de los microorganismos podemos distinguir dos fases:

- La fase de asimilación o síntesis
- La fase de desasimilación o respiración endógena

Durante la primera fase los organismos consumen el alimento disponible creando nueva materia celular activa. Es la fase de crecimiento celular. Pero los organismos también necesitan respirar, moverse, y ejercer sus funciones vitales, para lo cual consumen reservas y, por tanto, parte de su propia biomasa. Esto constituye la segunda fase de su metabolismo, en la cual decrece su materia activa (Metcalf & Eddy, 2003).

En el tratamiento secundario se desarrolla principalmente la primera fase y cuando los lodos (que son básicamente células) llegan a la estabilización aerobia se desarrolla fundamentalmente la fase de respiración endógena, para completar así la oxidación total de la materia orgánica que entró en la planta.

La estabilización aerobia convencional produce un lodo tipo B o C. La estabilización aerobia termofílica autotérmica produce un lodo tipo A.

8.2. Objetivo

El objetivo de este capítulo es proporcionar los conceptos básicos sobre la teoría del proceso de estabilización aerobia y los criterios de diseño. Así como explicar el procedimiento para el diseño de reactores aerobios continuos y discontinuos.

8.3. Bases teóricas

8.3.1. Descripción del proceso

La estabilización aerobia de los lodos fue desarrollada como una extensión del proceso de lodos activados. Esto llevó al desarrollo inicial de los reactores aerobios en dos modalidades, de flujo semicontinuo y continuo, operando en un rango de 10 a 30 °C. En la Ilustración 8.1 se presentan esquemas del reactor semicontinuo y en la Ilustración 8.2 del reactor continuo. (Metcalf & Eddy, 2003). Los tanques de estabilización aerobia pueden ser circulares o rectangulares, de 5 a 6 metros de profundidad, sin cubierta

o con cubierta (en el caso de climas fríos, para ayudar al mantenimiento de la temperatura). Los tanques van provistos de equipos de aeración de tipo turbina o difusores, para mantener las condiciones aerobias. Cada tanque tiene una bomba de alimentación de lodos que los introduce a una profundidad media. Después de un tiempo de retención de aproximadamente 20 días, el lodo estabilizado se conduce mediante una tubería a un espesador. Los lodos espesados pueden o no ser recirculados, siendo lo primero lo más habitual. Esto permite aumentar los rendimientos. El sobrenadante se regresa a la entrada del tren de tratamiento del agua residual (Metcalf & Eddy, 2003).

8.3.2. Microbiología

El proceso de la estabilización aerobia varía dependiendo de las mezclas individuales de los lodos y las condiciones ambientales. De muchas

Ilustración 8.1 Ejemplo de un reactor aerobio semicontinuo (Metcalf & Eddy, 2003)

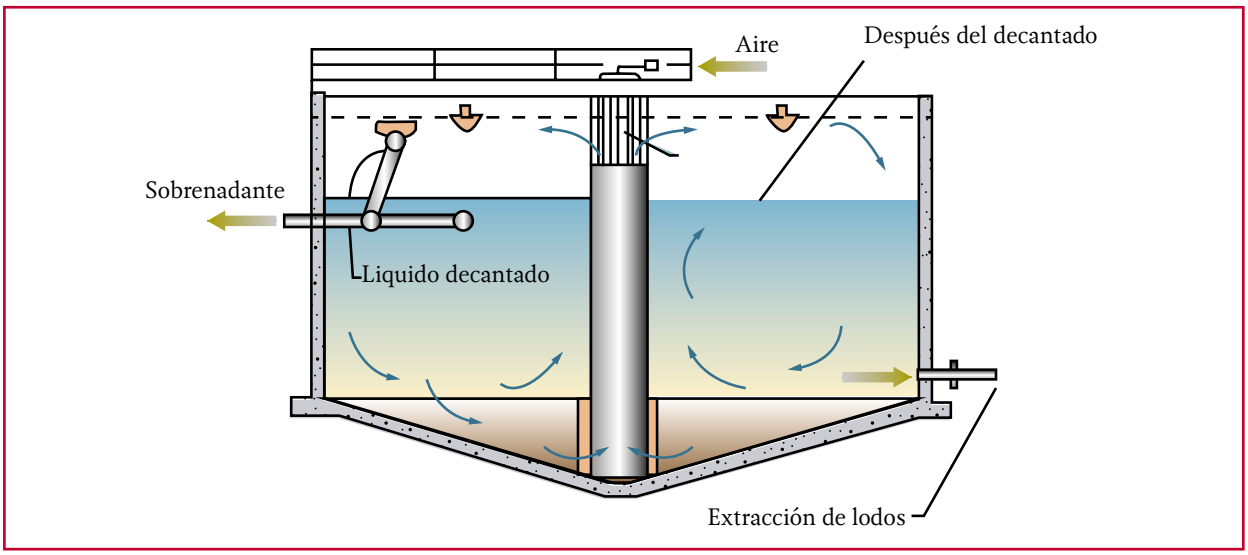
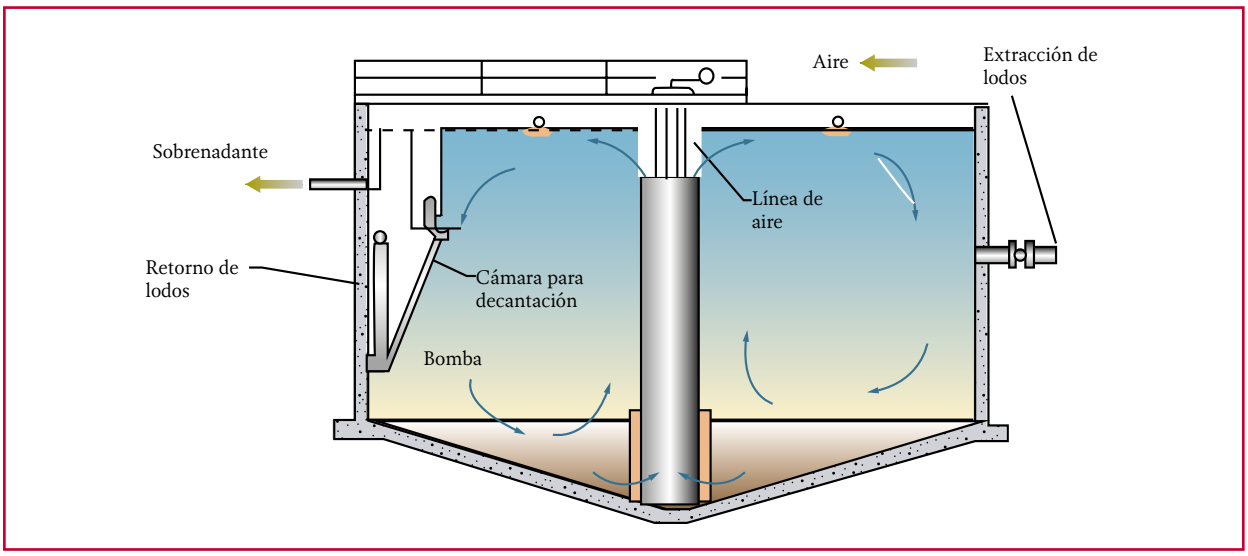


Ilustración 8.2 Ejemplo de un reactor aerobio semicontinuo (Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering Treatment and Reuso, 2003)



maneras, la estabilización aerobia es una extensión del proceso de lodos activados y la reacción real dependerá del tiempo de retención en los reactores (WEF, *et al.*,2012).

El tiempo de retención en los procesos de estabilización aerobia es de 2 a 15 días, los microorganismos heterotróficos aerobios y facultativos serán los que predominen utilizando el oxígeno libre o combinado como un aceptor de electrones y así obtener la energía a partir de la materia orgánica biodegradable disponible en el lodo residual. Cuando el suministro de alimentos disponibles en los lodos residuales es insuficiente, los microorganismos comienzan la lisis y consumen su propio protoplasma para obtener energía para las reacciones de mantenimiento celular (Metcalf & Eddy, 2003). Los productos de la estabilización aerobia incluyen típicamente dióxido de carbono, agua y materiales recalcitrantes (por ejemplo polisacáridos, hemicelulosa y celulosa). Para altos tiempos de retención, los procesos de estabilización entrarán en la respiración endógena o auto-oxidación (Metcalf & Eddy, 2003). Se sabe que solo 75-80 por ciento del tejido celular puede oxidarse, el resto se compone de material inerte y compuestos orgánicos poco degradables. Los cambios bioquímicos que hay en un reactor aerobio se pueden describir con las siguientes ecuaciones.

Destrucción de la biomasa:

$$C_5H_7O_2N + 5O_2 \rightarrow 4CO_2 + H_2O + NH_4HCO_3$$

Ecuación 8.1

Nitrificación

$$NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_3 + 2H^+ + H_2O$$

Ecuación 8.2

Proceso de nitrificación completo

$$C_5H_7NO_2 + 7O_2 \rightarrow 5CO_2 + 3H_2O + HNO_3$$

Ecuación 8.3

Desnitrificación

$$C_5H_7NO_2 + 4NO_3^- + H_2O \rightarrow NH_4^+ + 5HCO_3^- + 2NO_2$$

Ecuación 8.4

Proceso de nitrificación y desnitrificación completos

$$2C_5H_7NO_2 + 11.5\,O_2 \rightarrow 10\,CO_2 + 7H_2O + 2N_2$$

Ecuación 8.5

Aproximadamente 7 kg de alcalinidad expresada como $CaCO_3$ son destruidas por cada kg de amoniaco oxidado. Teóricamente aproximadamente 50 por ciento de la alcalinidad consumida por nitrificación puede ser recobrada por la desnitrificación. Si el oxígeno disuelto es demasiado bajo (menor de 1 mg L^{-1}), la nitrificación no se llevara a cabo. En la práctica, la aeración y el mezclado del reactor aerobio es suficiente para alcanzar la nitrificación mientras se mantenga bajo control el pH. En situaciones en donde la capacidad buffer es insuficiente, el pH baja a 5.5 y es necesario instalar equipo para mantener los niveles de pH requeridos (US, EPA, 1979). Cuando el lodo de un filtro percolador se mezcla con lodo primario y se combina para ser estabilizado aerobiamente, se lleva a cabo la oxidación directa de la materia orgánica del lodo primario y la oxidación del tejido celular.

8.3.3. Estabilización aerobia semicontinua

Originalmente, la estabilización aerobia fue diseñada como un proceso semicontinuo, y este concepto sigue funcionando en muchas instalaciones. Los lodos se bombean directamente desde los sedimentadores hacia los reactores aerobios. El tiempo necesario para el llenado del reactor depende del volumen disponible del depósito, del volumen de los lodos, de la precipi-

tación y de la evaporación. Durante la operación de llenado, los lodos sometidos a estabilización se airean continuamente. Después, cuando el depósito está lleno, la aeración continúa durante dos a tres semanas para asegurar que los sólidos se estabilicen completamente. Posteriormente, la aeración se interrumpe y los sólidos estabilizados se someten a espesamiento. Se decanta el líquido clarificado y los sólidos espesados se retiran con una concentración de 2-4 por ciento. El ciclo se repite después de eliminar una cantidad suficiente de lodo estabilizado y/o sobrenadante. Generalmente entre los ciclos se deja una cantidad de lodo estabilizado en el tanque para proporcionar la población microbiana para la inoculación de la siguiente cantidad de lodo que se alimenta al tanque (Metcalf & Eddy,2003), (US, EPA, 1979).

8.3.4. Estabilización aerobia continua

El proceso de estabilización aerobia convencional continua se asemeja mucho a la de lodos activados de mezcla completa. Los sólidos se bombean directamente desde los sedimentadores secundarios hacia el reactor aerobio, como muestra la Ilustración 8.3. La Ilustración 8.4 presenta ejemplos de este tipo de proceso (Metcalf & Eddy, 2003), (EPA, 1979).

El aerador tiene generalmente un nivel fijo y funciona de forma continua. El efluente del tanque de aeración se dirige a los espesadores para realizar la separación del líquido (sobrenadante) de los sólidos espesados. Parte de los sólidos estabilizados y espesados se recirculan al tanque de aeración y el resto se envía para continuar con el proceso de tratamiento. Otras configuraciones del reactor incluyen sistemas por lotes utilizando tanques en paralelo, semicontinuo, continuo y arreglos de lotes continuos usando dos o más reactores en serie para cada tren de reactores en paralelo. Cada condición tiene ventajas y desventajas dependiendo del equipo usado, de los requisitos de instalación, diferentes tamaños. En las siguientes ilustraciones: Ilustración 8.5, Ilustración 8.6, Ilustración 8.7, e Ilustración 8.8 se presentan algunas configuraciones del proceso de estabilización aerobia que se usan actualmente (WEF, *et al*., 2012).

Además de la estabilización convencional aerobia mesófilica, existen diferentes variaciones del proceso de estabilización aerobia: (1) oxígeno de alta pureza, (2) termofílica, incluyendo siste-

Ilustración 8.3 Diagrama de flujo del proceso de estabilización convencional continua (WEF, ***et al***., 2012)

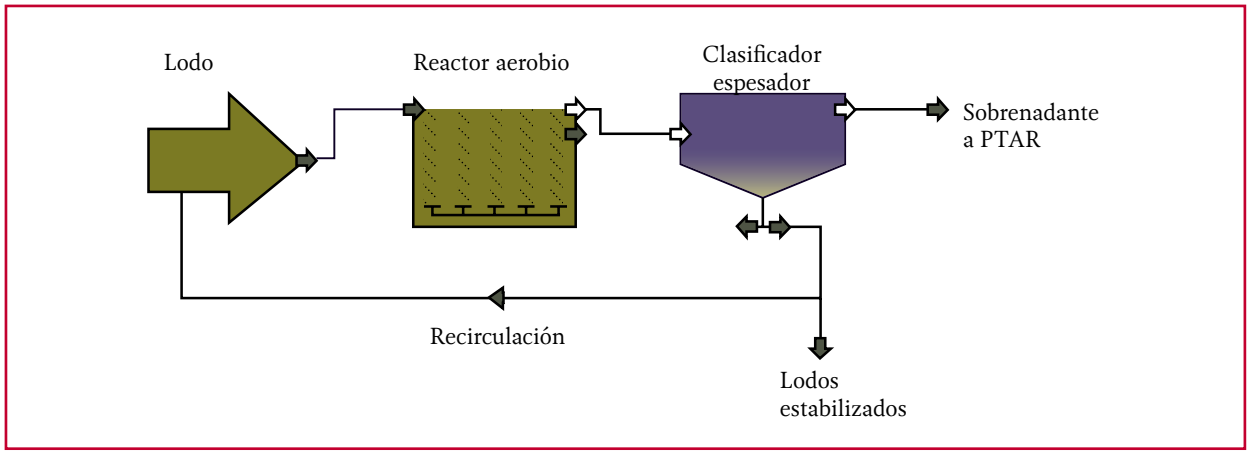


Ilustración 8.4 Ejemplos del proceso de estabilización aerobia convencional continúa

Ilustración 8.5 Configuración alternando reactores en operación semicontinua (WEF, *et al.*, 2012)

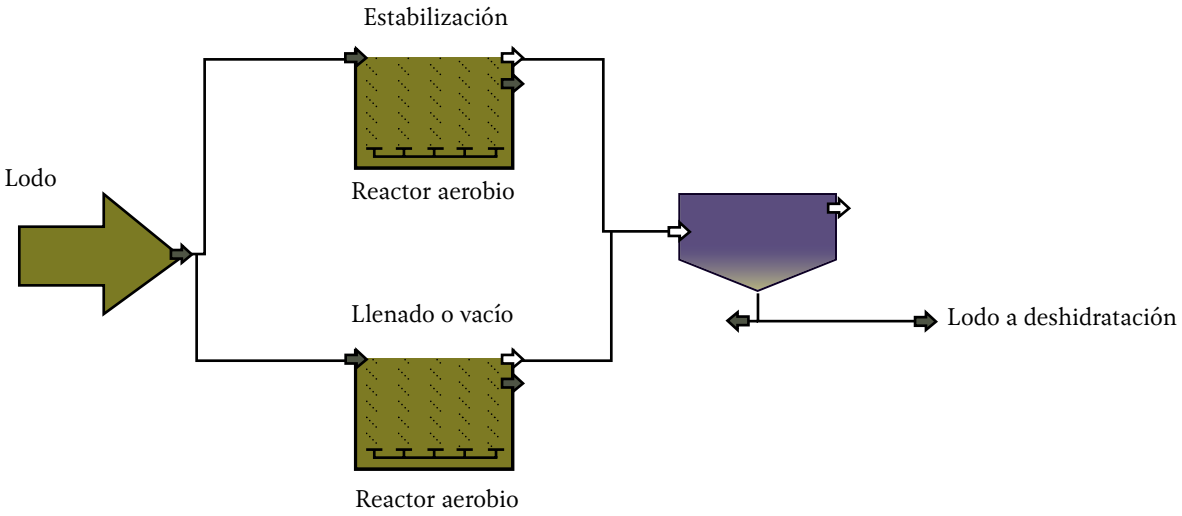


Ilustración 8.6 Configuración de reactores en régimen semicontinuo (WEF, *et al.*, 2012)

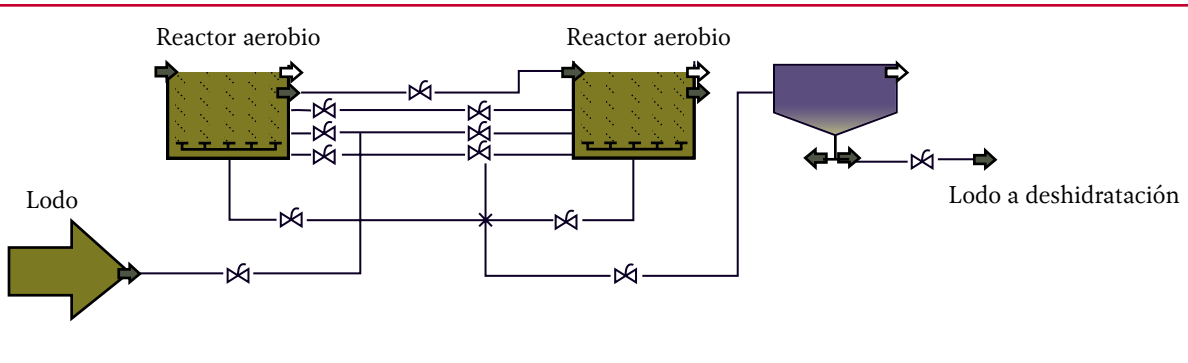


Ilustración 8.7 Configuración de reactores en serie y régimen continuo (WEF, *et al.*, 2012)

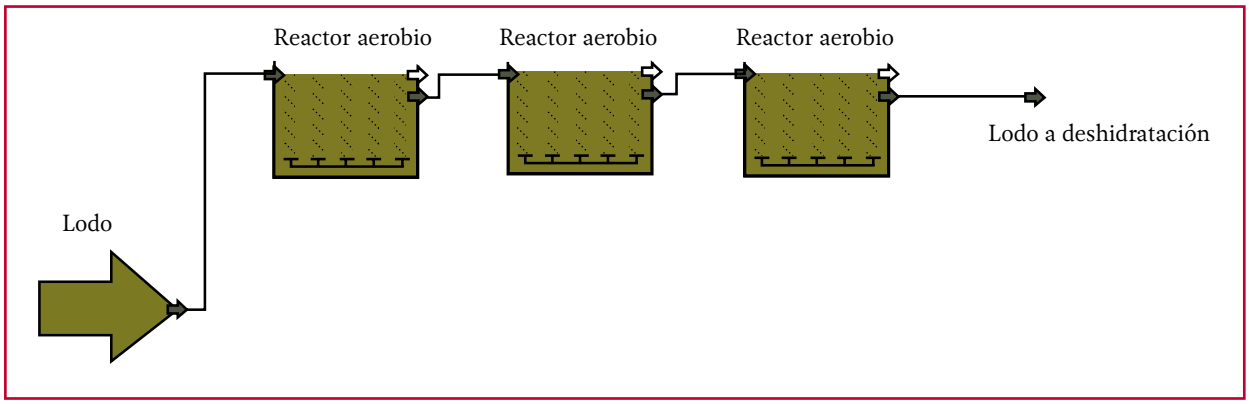
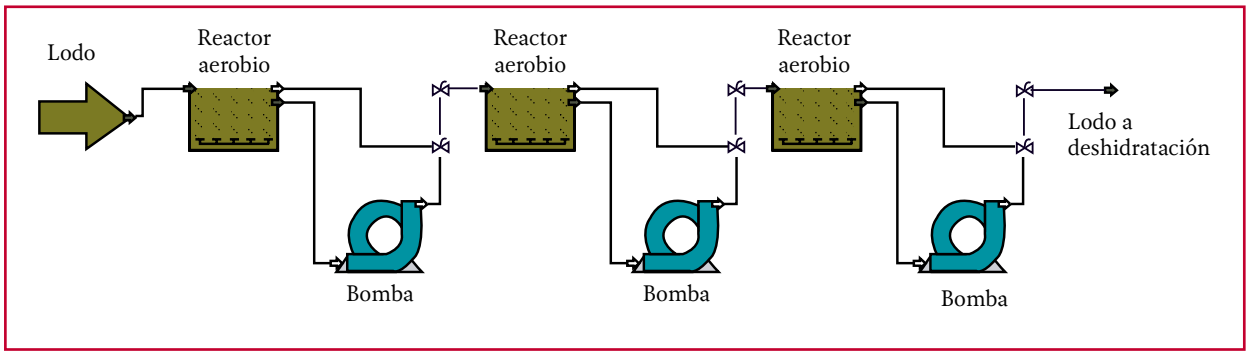


Ilustración 8.8 Configuración en régimen semicontinuo (WEF, *et al.*, 2012)



mas microaerofílicos y (3) estabilización aerobia criofílica y (4) la estabilización aerobia autotérmica. (WEF, *et al.*, 2012).

8.3.5. Estabilización aerobia autotérmica. Operación de autocalentamiento

En este proceso, los lodos de los clarificadores son generalmente espesados para proporcionar una concentración de sólidos en la alimentación del reactor mayor de 4 por ciento. El calor liberado en la estabilización biológica de los sólidos orgánicos es suficiente para elevar la temperatura del líquido en el reactor a valores de 140 ° F (60 °C). Las ventajas de esta forma de operación son: mayores tasas de destrucción de sólidos orgánicos, los requerimientos de volumen por lo tanto son más pequeños, la producción de un lodo pasteurizado, la destrucción de microorganismos patógenos; el oxígeno requerido se reduce en 30-40 por ciento en comparación con el proceso mesofílico, ya que existen pocas bacterias nitrificantes en este rango de temperatura, y la mejora de la separación sólido-líquido a través de la disminución de la viscosidad del lodo. Las desventajas citadas para este proceso son que se debe incorporar una operación de espesamiento y mayores requerimientos de mezclado. (EPA, 1979).

8.3.6. Aplicación, ventajas y desventajas de la estabilización aerobia

La estabilización aerobia de los lodos residuales se utiliza frecuentemente en sistemas de tratamiento de aguas residuales con lodos activados en

modalidad de aeración extendida. En estos casos se aplican bajas cargas orgánicas y altos tiempos de residencia hidráulica y de retención de sólidos en los reactores biológicos, por lo cual los lodos secundarios generados están parcialmente estabilizados. Esto permite lograr una producción de lodos secundarios relativamente pequeña y un consumo de oxígeno bajo en los sistemas de estabilización aerobia de los lodos, reduciéndose así el consumo de energía eléctrica para la aeración y los costos de operación del sistema (Rife & Carayon, 2010), (WEF, *et al*., 2012).

La estabilización aerobia de los lodos residuales se puede utilizar en los casos de sistemas de tratamiento de aguas residuales con lodos activados en modalidad mezcla completa y otras modalidades que trabajan a mayores cargas orgánicas (Rife & Carayon, 2010). Sin embargo, en estos casos se necesita un aporte de oxígeno hasta 9 veces mayor comparado con la aeración extendida. Esto hace que muchos países no utilicen la estabilización aerobia para los lodos generados en sistemas de alta carga orgánica. Por ejemplo, en España sólo se utiliza para poblaciones de 40,000-50,000 habitantes, aunque en otros países este límite es aún más bajo, hasta 10,000 habitantes en Inglaterra. En la Tabla 8.1 se resumen las ventajas y desventajas de la estabilización aerobia (WEF, *et al*., 2012).

8.4. Consideraciones de diseño

Los factores más importantes que se deben considerar en el diseño de reactores aerobios convencionales son: temperatura, reducción de sólidos, volumen del tanque, concentración de sólidos en la alimentación, requerimientos de oxígeno, requerimientos de energía para el mezclado y operación del proceso. Los criterios típicos para el diseño de reactores se presentan en la Tabla 8.2 (Metcalf & Eddy, 2003).

Tabla 8.1 Ventajas y Desventajas de la estabilización aerobia (WEF, et al., 2012)

Ventajas	Desventajas
Bajos costos de capital para instalaciones con capacidad inferiores de 19 000 $m^3 d^{-1}$.	Altos costos de operación, sobre todo cuando se usa para tratar mezclas de lodos primarios y secundarios.
Mínimas molestias por olores (excepto para los procesos TRS y DAT). Produce sobrenadantes que suelen ser fáciles de tratar cuando se recirculan en la instalación.	Mayores costos de energía que cualquier otro proceso de estabilización, especialmente la estabilización anaerobia mesófilica tradicional.
Es mejor para los residuos de las plantas de lodos activados.	Reducción limitada de patógenos excepto para DAT.
No hay peligro de explosiones o asfixias.	Reducción de sólidos excepto para DAT.
Operación simple	Reducción de la alcalinidad excepto para los procesos de TRS corto y DAT. Produce un lodo con alto contenido en agua, más difícil de secar posteriormente.
Pasteurización de lodo en la estabilización aerobia termofílica	Baja destrucción de microorganismos patógenos en la estabilización aerobia convencional sin calentamiento.

(TRS es tiempo de retención de sólidos corto y DAT es estabilización aerobia termófilica).

Tabla 8.2 Criterios de diseño para la estabilización aerobia, (Metcalf & Eddy, 2003)

Parámetros	Unidades	Valor
Tiempo de retención de sólidos (TRS) a 20 °C	d	40
TRS a 15 °C		60
Carga de sólidos volátiles	kg m^{-3} d^{-1}	1.6-4.8
Requerimientos de oxígeno, para el tejido celular	kgO_2 $kgSSV^{-1}$	~2.3
Requerimientos de oxígeno para la DBO en lodo primario		1.6-1.9
Requerimiento de energía para el mezclado, aeradores mecánicos	kW 10^{-3} m^{-3}	20-40
Requerimientos de energía para el mezclado, difusores de aire	m^3 m^{-3} min^{-1}	0.02-0.040
Oxígeno disuelto residual en el liquido	mg L^{-1}	1-2
Reducción de sólidos suspendidos volátiles	por ciento	38-50

8.4.1. Temperatura

La mayoría de los reactores aerobios son tanques abiertos, por lo que la temperatura del líquido del reactor depende de las condiciones meteorológicas y pueden fluctuar ampliamente. Al igual que con todos los sistemas biológicos, las temperaturas más bajas retardan el proceso mientras que las temperaturas más altas lo aceleran. Al considerar los efectos de temperatura, se debe diseñar un sistema para reducir al mínimo las pérdidas de calor mediante el uso de hormigón en lugar de tanques de acero, la colocación de los tanques enterrados en lugar de superficiales, y el uso de aeración sumergida en lugar de aeración superficial. El diseño debe permitir el grado de estabilización necesario de los lodos a la temperatura más baja de operación del líquido, y debe cumplir con los requisitos máximos de oxígeno a la temperatura máxima esperada del líquido (WEF, *et al*., 2012).

8.4.2. Reducción de sólidos

Uno de los objetivos principales de la estabilización aerobia es reducir la concentración de sólidos para su disposición. Se supone que esta reducción tiene lugar sólo con el contenido biodegradable de los lodos, aunque algunos estudios han demostrado que también se puede eliminar material no orgánico. En esta sección, la reducción de sólidos pertenecerá sólo al contenido biodegradable de los lodos. El cambio en los sólidos volátiles biodegradables puede ser representado por una reacción bioquímica de primer orden (Metcalf & Eddy, 2003)

$$\frac{dM}{dt} = -K_d M \qquad \text{Ecuación 8.6}$$

donde:
dM/dt = Velocidad de estabilización de los SSV (masa de SSV degradados/tiempo, kg d^{-1})
K_d = Coeficiente cinético de la velocidad de estabilización (tiempo, d^{-1})
M = Concentración de SV biodegradables remanentes en el reactor en el momento t (masa/volumen, kg m^{-3})

El tiempo t en la Ecuación 8.6 es en realidad la edad de los lodos o el TRS en el reactor aerobio. Dependiendo de como está siendo operado el reactor aerobio, el tiempo t puede ser igual o considerablemente mayor que el tiempo de residencia hidráulico teórico. Usando la porción biodegradable de los sólidos volátiles en la ecuación se observa que aproximadamente del 20 al 35 por ciento de los lodos residuales del sistema de lodos activados de una planta de tratamiento de aguas residuales con tratamiento primario es no biodegradable.

La velocidad de reacción K_d es una función del tipo de lodo, temperatura, y de la concentración de sólidos. Valores representativos para K_d pueden estar entre 0.05 d^{-1} a 15 °C y 0.14 d^{-1} para 25 °C para lodos activados. Es una pseudoconstante, puesto que el valor del término es el resultado de la medida de muchos factores. En la Ilustración 8.9 se muestra un gráfico de diversos valores de K_d reportados como una función de la temperatura de estabilización (EPA, 1979). Los datos que se muestran son para diferentes tipos de lodos residuales, lo que explica en parte la dispersión. Además, no ha habido ningún ajuste en el valor de K_d para la edad de los lodos. En este momento, no hay suficientes datos disponibles para permitir la segregación de K_d por tipo de lodos, por lo tanto, la línea que pasa por los puntos representa un valor global promedio K_d. Pocos estudios se han realizado sobre el efecto de la concentración de sólidos en la velocidad de reacción. Los resultados de un estudio con lodo residual activado a una temperatura de 68 ° F (20 ° C) se presentan en la Ilustración 8.10 lo que indica que Kd decrece con el incremento de la concentración de sólidos.

8.4.3. Volumen del reactor y requerimientos del tiempo de retención

El volumen del tanque está regido por el tiempo de retención necesario para alcanzar la reducción de sólidos volátiles deseados. En el pasado el TRS de 10 a 20 días era la norma de diseño de los sistemas de estabilización aerobia. Para satisfacer los requerimientos de la reducción de patógenos, los criterios de TRS en un reactor aerobio convencional prevalecerán sobre el criterio de una reducción del 35 por ciento de sólidos (Metcalf & Eddy, 2003), (US, EPA, 1979). La estabilización aerobia convencional con criterio de reducción de patógenos alcanzará el 38 por ciento de reducción de sólidos suspendidos volátiles que elimina la atracción de vectores, 2 logaritmos (2 $\log_{10}$) y 1 log de indicadores de virus. (CFR 40, parte 503, WEF 2012).

El volumen del reactor de estabilización puede calcularse por la siguiente ecuación.

$$V = \frac{Q_i(X_i + YS_i)}{X(K_d P_v 1/TRS)} \qquad \text{Ecuación 8.7}$$

donde:
V = Volumen del reactor aerobio, m^3
Q_i = Caudal del lodo afluente al reactor, $m^3\ d^{-1}$
X_i = Concentración de los SST del afluente, mg L^{-1}
Y = Fracción de la DBO del afluente debida al lodo primario (decimal)
S_i = DBO del afluente, mg L^{-1}
X = Concentración del SST en el reactor, mg L^{-1}
K_d = Coeficiente de la velocidad de estabilización, d^{-1}
P_v = Fracción decimal de SSV/SST en el reactor
TRS = Tiempo de retención de los sólidos o (edad del lodo), días

Ilustración 8.9 Velocidad de reacción contra la temperatura de estabilización, (US, EPA, 1979)

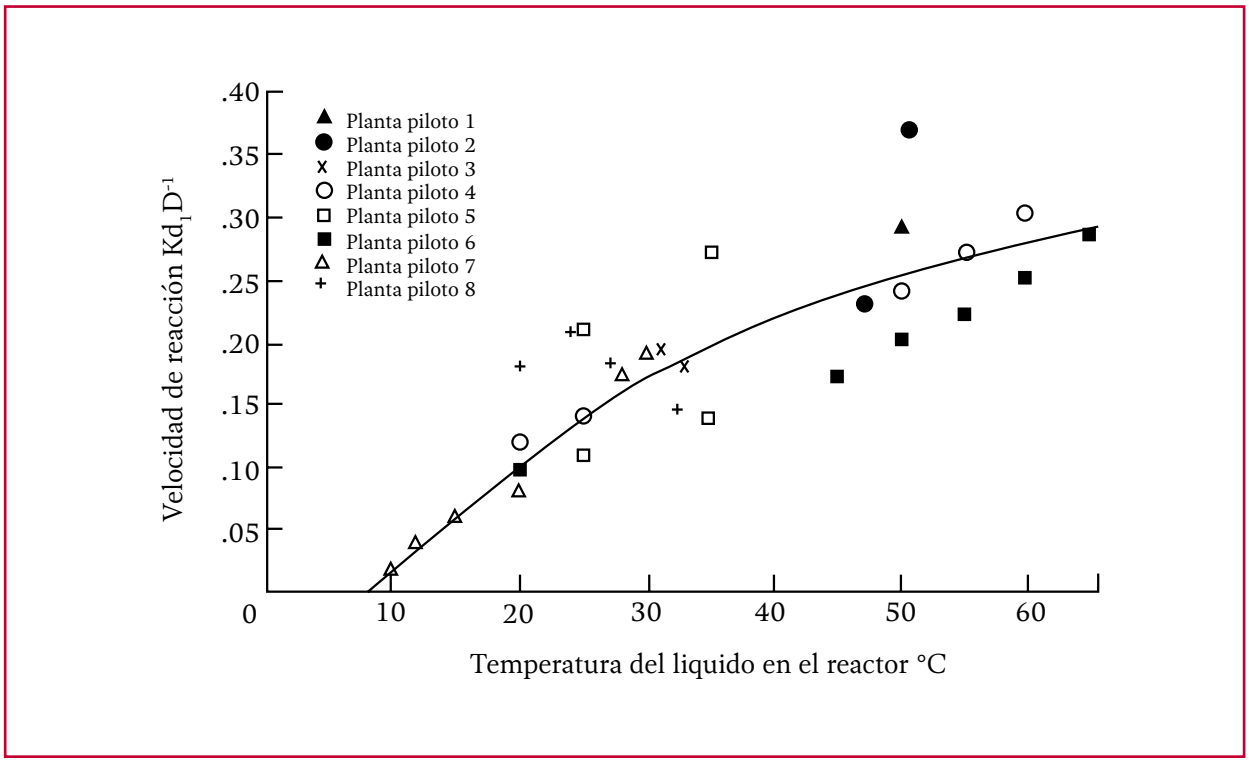
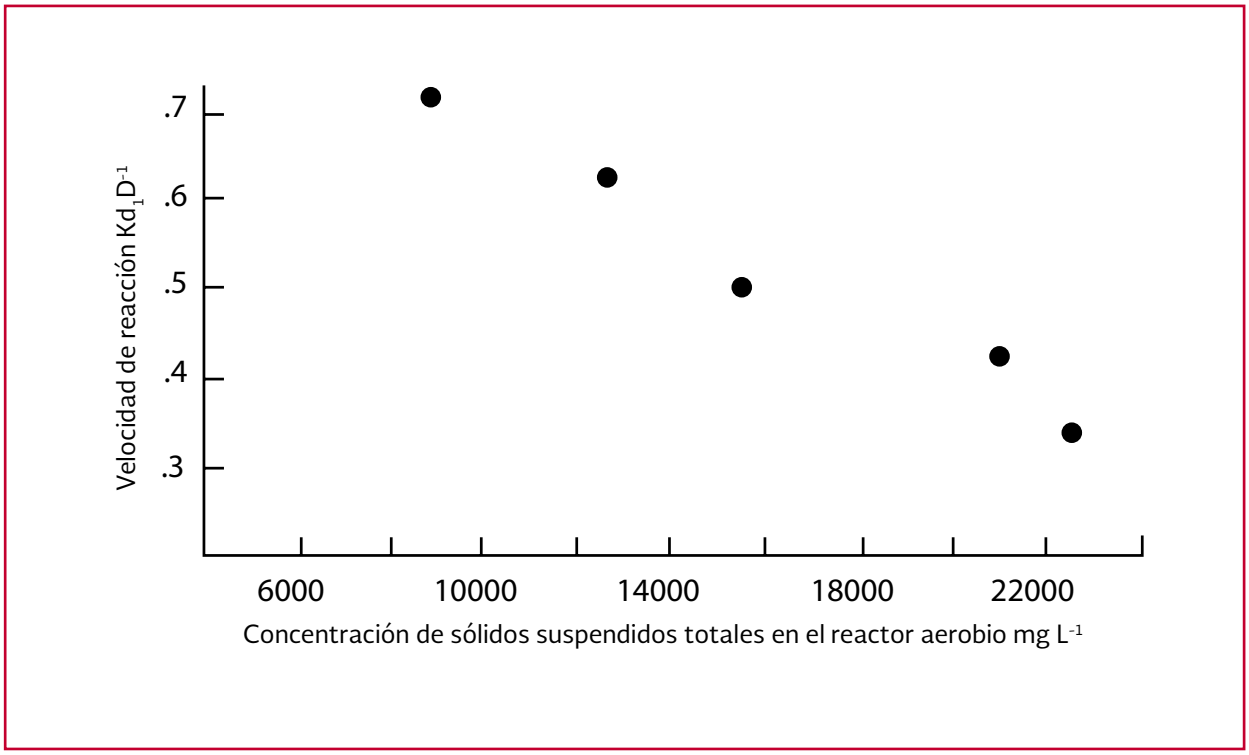


Ilustración 8.10 Efecto de la concentración de sólidos sobre el coeficiente de velocidad de reacción (US, EPA, 1979)



El termino YS_i de la ecuación 8.7 puede eliminarse si el lodo primario no se incluye en la carga de lodo que entra al reactor aerobio.

El tiempo de retención de sólidos (TRS) se divide entre el número de reactores para una configuración de dos o tres reactores de mezcla completa.

8.4.4. Concentración de sólidos en la alimentación

La concentración de sólidos en la alimentación del reactor es importante en el diseño y operación del reactor aerobio. A mayor porcentaje de sólidos en el lodo espesado que entra al reactor aerobio hay mayores requerimientos de oxígeno por unidad de volumen de reactor. Mayores tiempos de retención de sólidos (TRS), requieren reactores de menor volumen, y facilitan el control del proceso (Menos purga de lodos en los sistemas operados en semicontinuo) y por lo tanto un incremento en los niveles de destrucción de sólidos volátiles.

Una concentración de sólidos en la alimentación mayor de 3.5 a 4 por ciento puede afectar la eficiencia del mezclado y la aeración del sistema con un adecuado nivel de oxígeno disuelto necesario para soportar el proceso biológico. Para una concentración de sólidos mayor del 4 por ciento los equipos de aeración son evaluados cuidadosamente para asegurar el adecuado mezclado y alcanzar los niveles de aeración requeridos. (Metcalf & Eddy, 2003), (WEF, *et al*., 2012).

8.4.5. Requerimientos de oxigeno

La biomasa del lodo activado a menudo se representa por la ecuación empírica $C_5H_7N0_2$. Bajo los períodos prolongados de aeración típicos del proceso de estabilización aerobia, puede representarse por la siguiente ecuación: (Metcalf & Eddy, 2003):

$$C_5H_7NO_2 + 7O_2 \rightarrow 5CO_2 + 3H_2O + H^+ + NO_3$$

Ecuación 8.8

Hipotéticamente, esta ecuación indica que se requieren 0.898 kg de oxígeno para oxidar 0.45 kg de masa celular. Sin embargo, a partir de estudios piloto y a gran escala, los kg de oxígeno requerido para degradar 0.45 kg de sólidos volátiles fueron de 0.789 a 0.939 kg. Para los sistemas mesófilicos, se recomienda un valor de diseño de 0.90 kg. Para los sistemas auto-térmicos, que tienen temperaturas superiores a 45 °C, la nitrificación no se produce y se recomienda un valor de 0.65 kg. El oxígeno residual debe mantenerse al menos en 1 miligramos por litro.

La tasa real de consumo específico de oxígeno, kg de oxígeno por kg de sólidos volátiles por hora ($kg\ O_2 kg^{-1} SSV^{-1}\ h^{-1}$), es una función de la edad total de lodos y de la temperatura del líquido. En un estudio, se visitaron varias instalaciones en operación y se desarrolló la relación que se muestra en la Ilustración 8.11, en la cual se observa como la velocidad específica de consumo de oxígeno va disminuyendo con el aumento de la edad de los lodos y con la disminución de la temperatura de la estabilización aerobia (US, EPA, 1979).

8.4.6. Requerimientos de energía para el mezclado

La mezcla es necesaria en un reactor aerobio para mantener los sólidos en suspensión y para proporcionar condiciones óptimas de contacto entre las burbujas de aire y el líquido. Cualquiera de estos dos requisitos que necesite la mayor energía de mezclado controla el diseño.

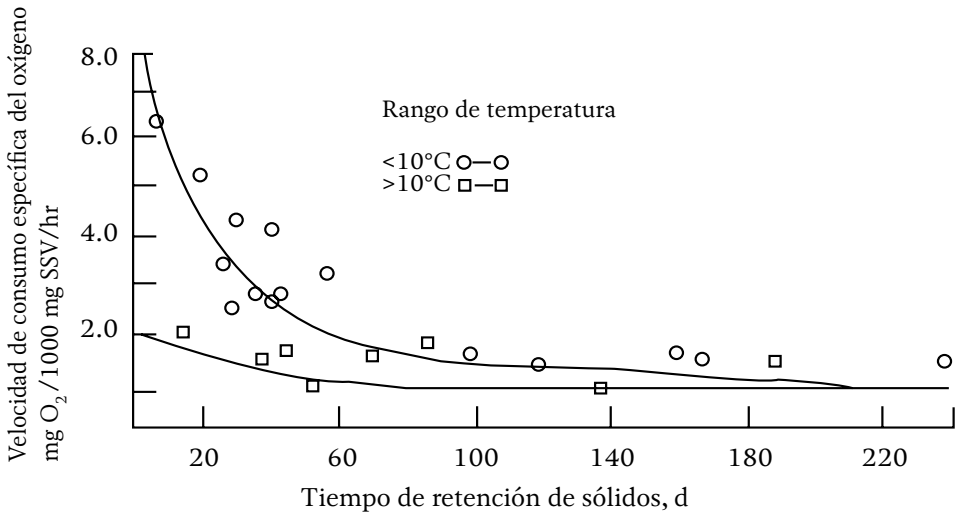
Para asegurar una correcta operación, el contenido de los reactores aerobios debe estar bien mezclado. Un reactor grande deber tener instalado múltiples dispositivos de mezclado para asegurar una buena distribución de la energía de mezclado. Típicamente los requerimientos de energía para el mezclado se presentan en la Tabla 8.2. En general, porque es una gran cantidad de aire que debe ser administrado para cubrir los requerimientos de oxígeno, se debe lograr un adecuado mezclado; sin embargo, los requerimientos de la potencia de mezclado deben verificarse, particularmente cuando la concentración de sólidos en la alimentación es mayor al 3.5 por ciento. Si se están utilizando polímeros para el proceso de espesamiento, especialmente en el espesamiento con centrífuga, una gran cantidad de energía podrá ser requerida para la mezcla. No hay estudios publicados que estén disponibles, de la evaluación en campo de los requerimientos de potencia para mantener diferentes niveles de sólidos en suspensión dentro de los reactores aerobios. Basado en experiencias pasadas, fueron satisfactorios los niveles que van desde 0.5 a 4.0 caballos de fuerza por cada 1000 pies cúbicos de volumen del reactor (13 a 106 kW / 1 000 m^3) (Metcalf & Eddy, 2003).

8.4.7. Reducción del pH

En la Ilustración 8.12 se muestra el efecto de aumentar el tiempo de retención sobre el pH del lodo en los reactores aerobios a diferentes temperaturas (US, EPA, 1979).

La formación de ácido que se produce durante la nitrificación causa la caída del pH y la alcalinidad. Aunque en un momento el pH bajo se considera inhibidor del proceso, se ha demostrado

Ilustración 8.11 Influencia del tiempo de retención de sólidos y de la temperatura del reactor sobre la velocidad específica de consumo de oxígeno en el reactor aerobio, (US, EPA, 1979)



que el sistema puede aclimatarse y puede operar bien a valores bajos de pH. Cabe señalar que si la nitrificación no tiene lugar, pH disminuirá un poco o nada. Esto puede ocurrir a temperaturas bajas y TRS pequeños o en la operación termofílica. Las bacterias nitrificantes son sensibles al calor y no sobreviven en temperaturas superiores a 113 °F (45 °C).

8.4.8. Operación del proceso

Dependiendo de la capacidad buffer del sistema, el pH puede disminuir a valores alrededor de 5.5 cuando el tiempo de residencia hidráulica es grande. El pH disminuye por el incremento de iones de nitrato presentes en la solución y la reducción de la capacidad de amortiguamiento se debe al arrastre con aire. El crecimiento de microorganismos filamentosos también disminuye los valores de pH. El pH se revisa periódicamente y se ajusta si está excesivamente bajo. Los niveles de oxígeno disuelto y la velocidad de respiración también se controlan para asegurar un apropiado desarrollo del proceso (Metcalf & Eddy, 2003).

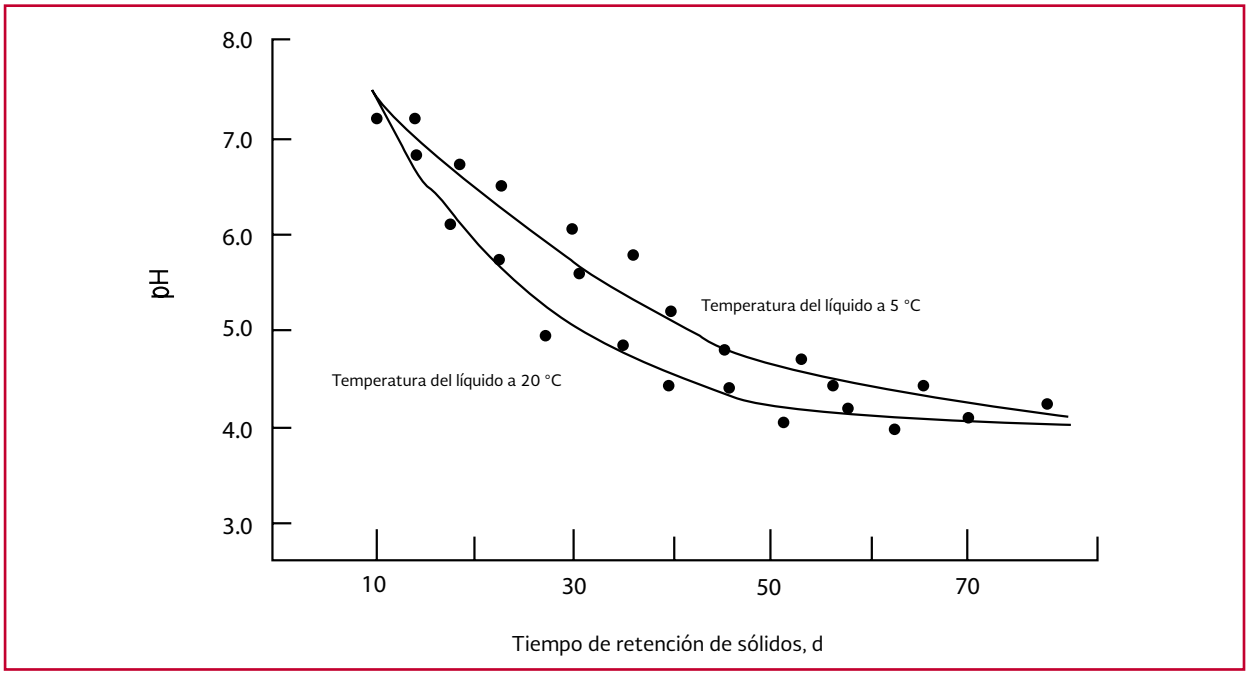
Los reactores aerobios que no incluyan un espesamiento previo deben tener equipos de decantación para el espesamiento de los lodos, que se enviaran al proceso siguiente. El manejo y el seguimiento de la operación de decantación son consideraciones de diseño importantes. El tiempo de retención de sólidos no será igual al tiempo de residencia hidráulica, si el rector se opera de manera que el lodo entrante se utilice para desplazar el sobrenadante y permitir que los sólidos se mezclen. (Metcalf & Eddy, 2003).

8.4.9. Desempeño del proceso

8.4.9.1. Reducción de sólidos volátiles

Se ha demostrado que la reducción de los sólidos se debe principalmente a la temperatura del líquido y al tiempo de residencia del lodo

Ilustración 8.12 Efecto del tiempo de retención de sólidos sobre el pH durante la estabilización aerobia, (US, EPA, 1979)



en el reactor. En la Ilustración 8.13 se presenta un gráfico de la reducción de sólidos volátiles en función de la temperatura del líquido y de la edad del lodo. Los datos fueron tomados de estudios a escala piloto y a gran escala para varios tipos de lodos de aguas residuales municipales (EPA, 1979).

8.4.9.2. Calidad del sobrenadante

El sobrenadante de los reactores aerobios normalmente se recircula a la entrada de la planta de tratamiento. En la Tabla 8.3 se presentan las características del sobrenadante de estudios a escala real operando bajo rangos de temperatura mesofílicos. La Tabla 8.4 resume los criterios de diseño de la estabilización aerobia de lodos (US, EPA, 1979).

Tabla 8.3 Características del sobrenadante, (US, EPA, 1979)

Parámetros	Referencias		
	Smith, 1971	Folk, 1976	Hagstrom, 1978
Turbiedad, UTJ	120	-	-
$N\text{-}NO_3$, mg L^{-1}	40	-	30
NTK, mg L^{-1}	115	2.9-1 350	-
DQO, mg L^{-1}	700	24-25 500	-
$P\text{-}PO_4$, mg L^{-1}	70	2.1-930	35
P filtrado, mg L^{-1}	-	0.4-120	-
DBO, mg L^{-1}	50	4.4-6 350	2-5
DBO filtrada, mg L^{-1}	-	3-280	-
Sólidos suspendidos, mg L^{-1}	300	9-41 800	6.8
Alcalinidad, mg L^{-1} $CaCO_3$	-	-	150
SO_4, mg L^{-1}	-	-	70
Silice, mg L^{-1}	-	-	26
pH	6.8	5.7-8.0	6.8

Ilustración 8.13 Reducción de sólidos volátiles en función de la temperatura del líquido y la edad del lodo en el reactor (US, EPA, 1979)

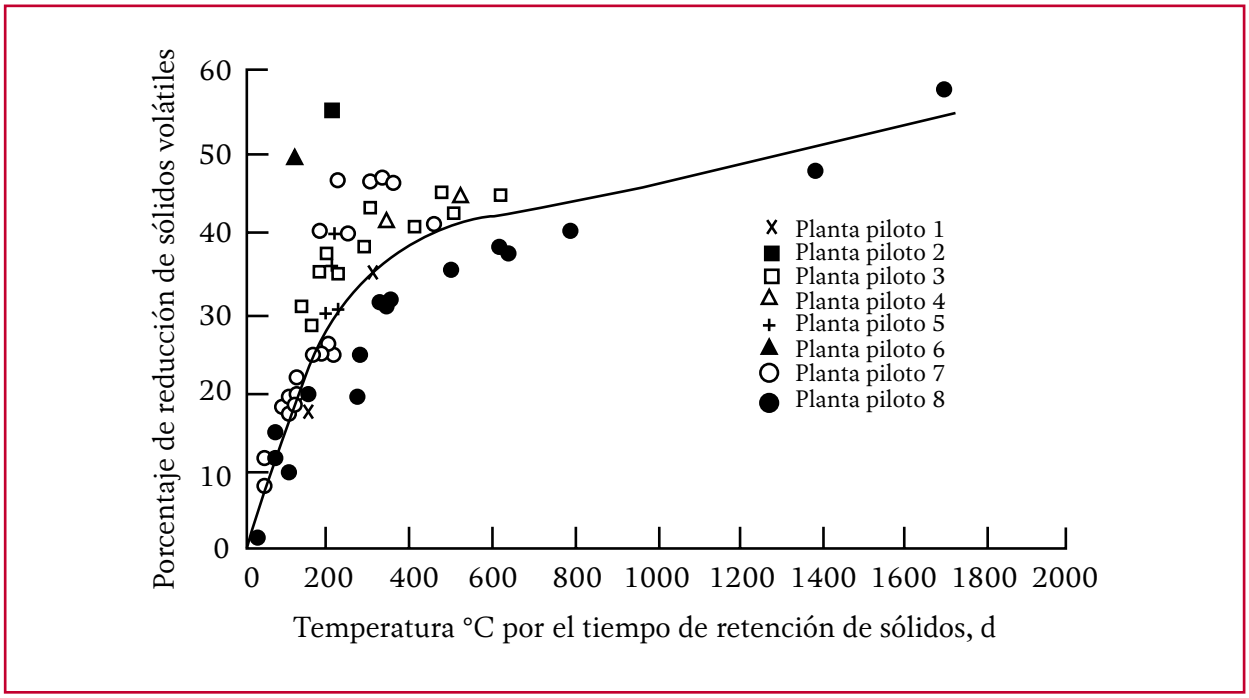


Tabla 8.4 Criterios de diseño (US, EPA, 1979)

Criterios	Días	Temperatura del líquido (°C)
Tiempo de residencia de sólidos requerido para lograr: - 40 por ciento reducción de sólidos volátiles	108 31 18	4.4 15.6 26.7
- 55 por ciento reducción de sólidos volátiles	386 109 64	4.4 15.6 26.7
Requerimientos de oxígeno	2.0 kg de oxígeno por kg de sólidos volátiles destruidos cuando la temperatura del líquido es de 45 °C o menos 1.45 kg de oxígeno por kg de sólidos volátiles destruidos cuando la temperatura del líquido es mayor de 45 °C.	
Oxígeno disuelto	1.0 mg L^{-1} de oxígeno en las condiciones de diseño más desfavorables	
Concentración máxima esperada de sólidos por decantación	2.5 a 3.5 por ciento sólidos cuando se trata de lodo sin arena o al cual no se le han agregado químicos.	
Potencia para mezclado	En función de la geometría del tanque y tipo de equipo de aeración utilizado. Se deberá consultar al fabricante del equipo. Los valores han variado entre 13.3 y 106.4 kW por 1 000 m^3	

8.5. Ejemplos sobre el diseño de reactores aerobios

8.5.1. Ejemplo 1

Diseñar un reactor aerobio para tratar el lodo residual producido por el sistema de lodos activados de una PTAR. Asumiendo las siguientes condiciones de operación (Metcalf & Eddy, 2003).

- La cantidad de lodo residual que va a estabilizarse es 2 057 kg SST d^{-1}
- La mínima y máxima temperatura de operación del líquido es de 15 °C para el invierno y de 25 °C para verano
- El sistema debe alcanzar 40 por ciento de reducción de sólidos suspendidos volátiles en el invierno
- El TRS mínimo en el invierno es de 60 d
- El lodo residual está concentrado al 3 por ciento, usando un espesador por gravedad
- La gravedad específica del lodo residual es 1.03
- La concentración del lodo en el reactor es el 70 por ciento de la concentración del lodo espesado entrante
- El coeficiente de la velocidad de reacción K_d es de 0.06 d^{-1} a 15 °C
- La fracción de volátiles en los SST del reactor es del 80 por ciento
- Los lodos primarios no están incluidos en el afluente del reactor
- Para el mezclado se utiliza un difusor de aire
- La temperatura del aire en el sistema de difusión es de 20 °C

Solución:

1. Paso 1, a partir de la Ilustración 8.13 calcula la reducción de SSV bajo las condiciones de invierno y verano.
   a) Para utilizar la Ilustración 8.13, se debe multilicar la temperaura para invierno por el TRS. Por lo tanto:

$$15\,^{\circ}C \times 60\,d = 900 \qquad \text{Ecuación 8.9}$$

Con este valor de 900 de la Ilustración 8.13, se obtiene que la reducción de SSV es del 45 por ciento, el cual excede los requerimientos del 40 por ciento para el invierno.

b) Durante el verano, la temperatura del líquido debe ser 25 °C, repitiendo lo indicado en el inciso (a) se tiene:

$$25\,^{\circ}C \times 60\,d = 1\ 500$$ Ecuación 8.10

De la Ilustración 8.13 y con un valor de 1 500, la reducción de SSV en el verano es del 50 por ciento.

2. El segundo paso calcula la masa de SSV reducidos para el invierno y el verano en base al porcentaje de reducción de SSV

a) Primero se debe determinar la masa total de SSV que entran al digestor

$$25\,^{\circ}C \times 60\,d = 1\ 500$$

Ecuación 8.11

b) Para las condiciones de invierno la reducción de masa de SSV es:

$$\begin{aligned} &\textit{Masa de SSV reducida} \\ &= \textit{Masa total de SSV} \times \%\ \textit{de reduccion de SSV} \\ &= 1\ 646\,kg\ \ d^{-1} \times 0.45 \\ &= 741\,\textit{kg de SSV reducidos por dia} \end{aligned}$$

Ecuación 8.12

c) Para las condiciones de verano la masa de SSV es:

$$\begin{aligned} &\textit{Masa de SSV reducida} \\ &= \textit{Masa total de SSV} \times \%\ \textit{de reduccion de SSV} \\ &= 1\ 646\,kg\ \ d^{-1} \times 0.50 \\ &= 823\,\textit{kg de SSV reducidos por dia} \end{aligned}$$

Ecuación 8.13

3. El tercer paso determina los requerimientos de oxígeno en base a la Tabla 8.2, en donde se específica que se necesitan 2.3 kgO_2 $kgSSV^{-1}$

a) Bajo las condiciones de invierno se tiene:

$$\begin{aligned} \textit{Requerimiento de oxigeno} &= \textit{Masa de SSV reducida} \times 2.3\,kgO_2\ \ kgSSV^{-1} \\ &= 741\,\textit{g de SSV reducidos por dia} \times 2.3 = 1\ 704\,kgO_2\ \ d^{-1} \end{aligned}$$

Ecuación 8.14

b) Para las condiciones de verano los requerimientos de oxígeno son:

$$\begin{aligned} \textit{Requerimiento de oxigeno} &= \textit{Masa de SSV reducida} \times 2.3\,kgO_2\ \ kgSSV^{-1} \\ &= 823\,\textit{g de SSV reducidos por dia} \times 2.3 = 1\ 893\,kgO_2\ \ d^{-1} \end{aligned}$$

Ecuación 8.15

4. El cuarto paso calcula el volumen de aire requerido por día bajo condiciones estándar. Para este cálculo es necesario conocer la densidad del aire.

a) Para el Invierno el volumen de aire requerido es:

$$V = \frac{\textit{requerimiento de oxigeno}}{(\textit{densidad del aire}) \times (0.233)} = \frac{1\ 704\,kgO_2\ \ d^{-1}}{(1.204\,kg\ \ m^{-3})(0.233)} = 6\ 100\,m^3\ \ d^{-1}$$

Ecuación 8.16

b) Para el verano el volumen de aire requerido es:

$$V = \frac{1\ 893\,kgO_2\ \ d^{-1}}{(1.204\,kg\ \ m^{-3})(0.233)} = 6\ 747\,m^3\ \ d^{-1}$$

Ecuación 8.17

Asumiendo una eficiencia de la transferencia de oxigeno del 10 por ciento, la velocidad de flujo del aire es;
Para las condiciones de invierno:

$$q = \frac{6\ 100\ m^3\ d^{-1}}{(0.1)(1\ 440\,min\ \ d^{-1})} = 42.4\,m^3\ \ min^{-1}$$

Ecuación 8.18

Para las condiciones de verano:

$$q = \frac{6\ 747\ m^3\ \ d^{-1}}{(0.1)(1\ 440\ min\ \ d^{-1})} = 46.8\ m^3\ \ min^{-1}$$

Ecuación 8.19

5. El quinto paso calcula el volumen de lodo para disposición por día, usando la siguiente ecuación:

$$V = \frac{M_S}{\rho S_L P_S}$$ Ecuación 8.20

donde:

V = volumen de lodo, m^3

M_S = masa de los sólidos secos, kg

P = peso específico del agua, 1000 kg m^{-3}

S_L = gravedad específica del lodo

P_S = porcentaje de sólidos expresado como un decimal

Sustituyendo los datos en la ecuación, se obtiene:

$$V = \frac{2\ 057\ kg}{(1\ 000\ kg\ \ m^{-3})(1.03)(0.03)} = 66.66\ m^{-3}\ \ d^{-1}$$

Ecuación 8.21

6. El sexto paso determina el volumen del reactor aerobio (las condiciones de invierno son las que prevalecen) usando la Ecuación 8.7.

$$V = \frac{(66.6\ m^3\ \ d^{-1})(30\ 000\ g\ \ m^{-3})}{(30\ 000\ g\ \ m^{-3})\left[(0.7)(0.06\ d^{-1})(0.8) + \left(\frac{1}{60\ d}\right)\right]} = 1\ 318\ m^3$$

Ecuación 8.22

7. El séptimo paso calcula los requerimientos de aire por m^3 con respecto al volumen del reactor.

$$Requerimientos\ de\ aire = \frac{flujo\ de\ aire\ para\ el\ verano}{volumen\ del\ reactor}$$

$$= \frac{47.1\ m^3\ \ min^{-1}}{1\ 318\ m^3} = 0.036\ m^3\ \ min^{-1}\ \ m^{-3}$$

Ecuación 8.23

Se deben revisar los requerimientos de mezclado para garantizar un buen mezclado. Los requerimientos de aire calculados en el paso 7 están dentro de los valores dados en la Tabla 8.2.

Comentario: El presente ejemplo está basado en un solo reactor aerobio, si se requiere utilizar dos o más reactores, es posible que haya una reducción significativa en el volumen del tanque. En un arreglo de varios reactores, la distribución, necesidad y/o cantidad del aire entre los tanques varia en función de la demanda esperada ya que la mayoría de la reducción de sólidos volátiles se producirá en la primera etapa en donde la biomasa es más activa.

En la Tabla 8.5 se muestra un resumen de las características del reactor y del proceso de estabilización aerobia.

Tabla 8.5 Principales resultados para el diseño del reactor

Parámetro	Valor
Cantidad de lodo a estabilización	2 057 kg SST d^{-1}
Reducción de sólidos volátiles	50 por ciento en verano y 45 por ciento en invierno
Tiempo de retención de sólidos (TRS)	60 días
Oxígeno requerido	1 893 kg O_2 d^{-1}
Volumen de aire requerido	6 777 m^3 d^{-1}
Volumen de lodo a disposición final	66 m^3 d^{-1}
Volumen del reactor	1 318 m^3

8.5.2. Ejemplo 2. Diseño de un reactor continuo y discontinuo

El siguiente ejemplo presenta el diseño de un reactor continuo a escala industrial, a partir de datos obtenidos de un reactor discontinuo a escala de laboratorio. El procedimiento de diseño de un reactor discontinuo a escala industrial es directo, ya que en este caso la unidad de laboratorio es esencialmente una réplica a menor escala (Ramalho, 1996).

Partiendo de los datos obtenidos de un reactor discontinuo a escala laboratorio a 20 °C, diseñar un reactor aerobio continuo para tratar un caudal de 190 m^3 d^{-1} de lodos. Los datos de laboratorio se presentan en la Tabla 8.6, los SSV remanentes y la velocidad de utilización de oxígeno, en función del tiempo de aeración.

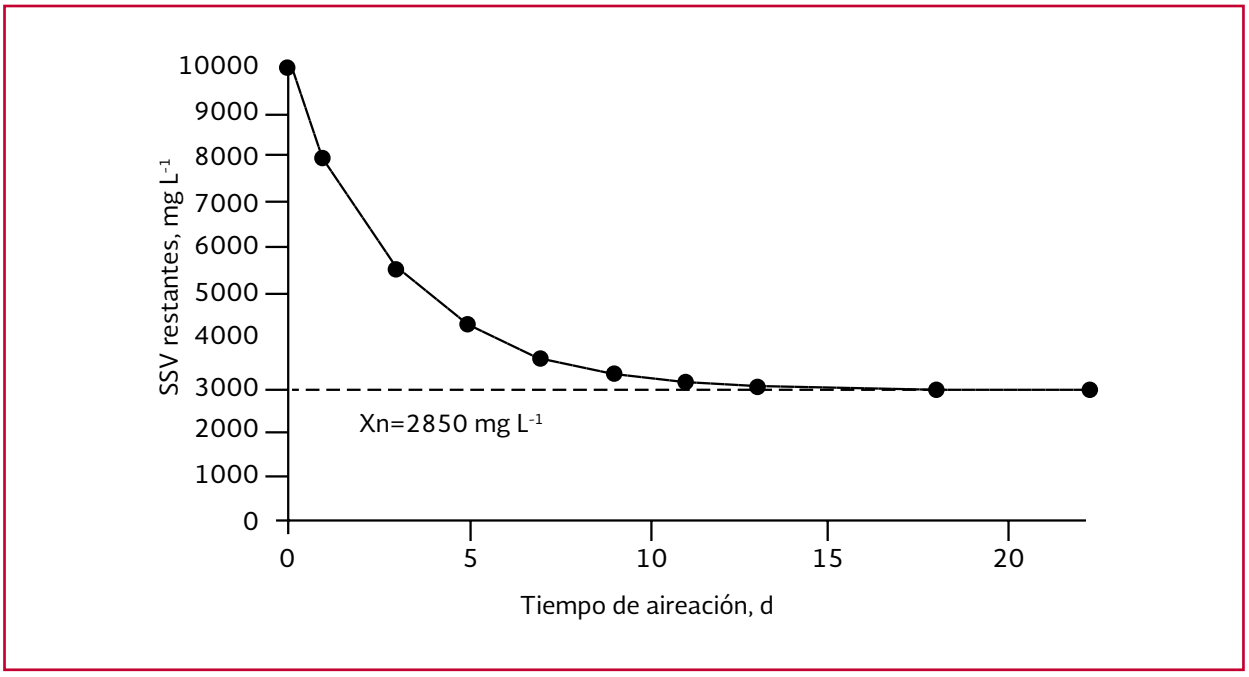
Tabla 8.6 Datos de laboratorio para el diseño de un reactor continúo (t=20°C)

1 Tiempo de aeración, d	2 SSV, mg L^{-1}	3 Velocidad de utilización de oxígeno (VUO), mg L^{-1} h^{-1}
0	10 000	42.5
1	7 950	32.5
3	5 550	22.8
5	4 250	18
7	3 570	15
9	3 230	12.5
11	3 050	11.0
13	2 955	9.5
18	2 850	7.75
22	2 850	7.0

El diseño del reactor aerobio continuo, se realizará en base a las siguientes especificaciones:

1. Calcular el volumen del reactor en m^3 para una reducción del 80 por ciento de

Ilustración 8.14 SSV en función del tiempo de aeración, (Ramalho, 1996)



SSV para condiciones de invierno cuando la temperatura de los lodos es de 16 °C. Además determinar la reducción de SSV en condiciones de verano, para este mismo reactor, cuando la temperatura de los lodos es de 30 °C

2. Calcular los kg O_2 h^{-1} requeridos basados en las condiciones de verano

Solución:

1. Solución parte 1: Diseño del reactor aerobio en condiciones de invierno.
   a) El primer paso es determinar X_n (SSV no degradables en el lodo)
   Para esto es necesario trazar el gráfico de variación de SSV remanentes (mg L^{-1}), en función del tiempo de aeración de la Tabla 8.6, tal y como se muestra en la Ilustración 8.14, la curva es asintótica con respecto a un valor de SSV que se estima en 2 850 mg L^{-1} que corresponde a SSV no degradables en el lodo (o sea X_n = 2 850 mg L^{-1}). Siendo el porcentaje:

$$\%\ SSV\ no\ biodegradables = \frac{X_n}{SSV\ iniciales} = \frac{2\ 850\ mg\ \ L^{-1}}{10\ 000\ mg\ \ L^{-1}} \times 100 = 28.5\%$$

Ecuación 8.24

Puesto que un 28.5 por ciento de los SSV en el lodo no son biodegradables, entonces el 71.5 por ciento de los SSV en el lodo son biodegradables.

   b) El paso 2 es hacer un balance de materia para el reactor aerobio (en condiciones de invierno)
   La concentración inicial de SSV es la concentración al tiempo cero, de acuerdo a los datos que se presentan en la Tabla 8.6 y manejando una reducción de SSV del 80 por ciento. En la Tabla 8.7 se presenta el balance de materia en donde:

$(X_d)_0$ = SSV degradables a la entrada del reactor, mg L^{-1}

X_n = SSV no degradables a la entrada del reactor, mg L^{-1}

X_0 = SSV totales a la entrada del reactor, mg L^{-1}

$(X_d)_e$ = SSV degradables a la salida del reactor, mg L^{-1}

X_e = SSV totales a la salida del reactor, mg L^{-1}

Tabla 8.7 Balance de materia para condiciones de invierno, sobre una disminución del 80 por ciento de SSV

Entrada	Salida
SSV	
Degradable:	$(X_d)e = (0.2)(7\ 150) = 1\ 430\ mg\ L^{-1}$
$(X_d)o = 0.715(10\ 000) = 7150\ mg\ \ L^{-1}$	$X_n = 2\ 850\ mg\ \ L^{-1}$
No degradable:	$X_e = 1\ 430 + 2\ 850 = 4\ 280\ mg\ \ L^{-1}$
$X_n = (0.285)(10\ 000) = 2\ 850\ mg\ \ L^{-1}$	

$SSV\ totales\ (X_o)$: = 7 150 + 2 850 = 10 000 $mg\ \ L^{-1}$

   c) Paso 3. Calcular la constante de reacción k_{dc}.
   Para ralizar el cálculo de la constante, es necesario calcular los SSV degradables remanentes o restantes, los cuales se calculan con la siguiente ecuación:

$$SSV\ degradables\ remanentes = SSV - 2\ 850\ mg\ \ L^{-1}$$

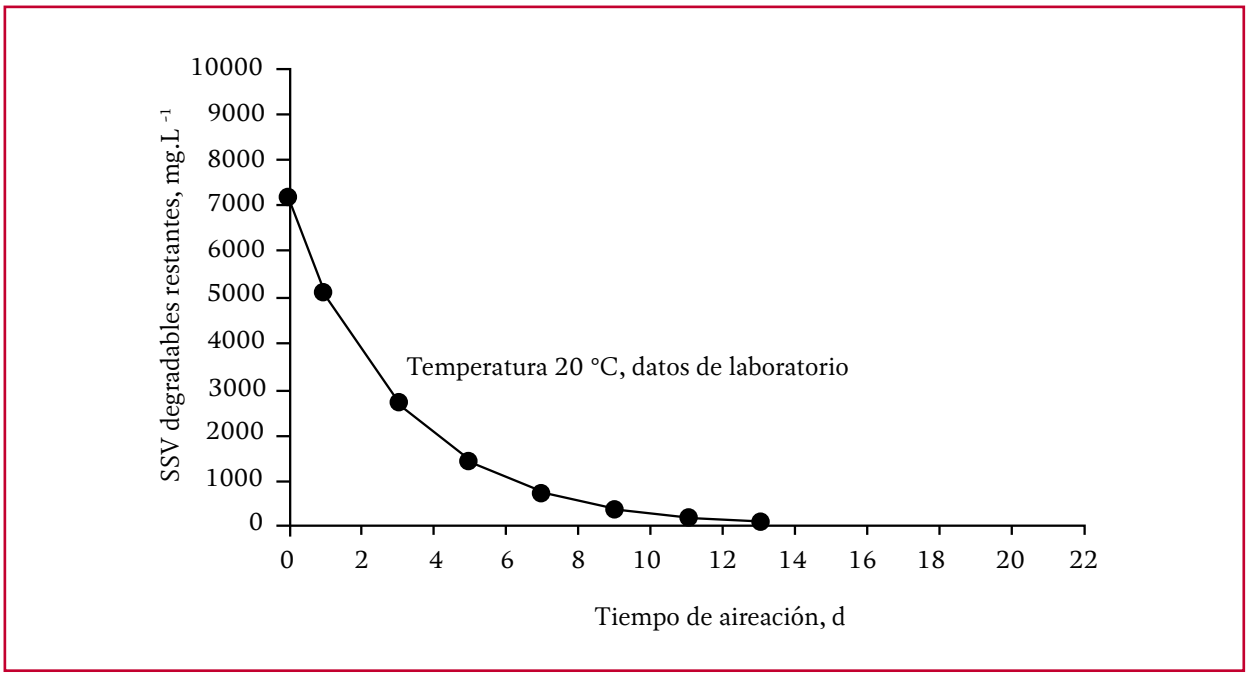
Ecuación 8.25

donde:

SSV = SSV de la columna 2 de la Tabla 8.6

Una vez calculados, hacer una tabla de estos datos y el tiempo de aeración (columna 1 de la Tabla 8.6), como se presenta en la Tabla 8.8.

Ilustración 8.15 SSV degradables remanentes en función del tiempo de aeración



Realizar el gráfico de los SSV degradable remanentes en función del tiempo de aeración, como se muestra en la Ilustración 8.15. Siendo el valor de k_{dc}, la pendiente que resulta de graficar el log se SSV contra el tiempo, cuyo resultado se muestra en la Ecuación 8.26 o en la Ecuación 8.27:

$$k_{dc} = -(pendiente) = \frac{\log 7,150 - \log 280}{10 - 0} = 0.1407 d^{-1} (base\ 10)$$

Ecuación 8.26

$$k_{dc} = (2\,303)(0.1407) = 0.3241\, d^{-1} (base\ e)$$

Ecuación 8.27

Tabla 8.8 SSV degradables remanentes función del tiempo de aeración

1 Tiempo de aeración, d	2 SSV degradable remanentes, mg L^{-1} Columna 2 de la Tabla 8.6 menos 2 850
0	7 150
1	5 100
3	2 700
5	1 400
7	720
9	380
11	200
13	105
18	-
22	-

Corregir k_{dc} para las temperaturas de funcionamiento de invierno y verano, con la siguiente ecuación.

$$k_{Tw} = k_{20}\theta^{T_w-20}$$ Ecuación 8.28

a) Condiciones de verano (T = 30 °C)

$$k_{30} = (0.3241)(1.05)^{30-20} = 0.528\,d^{-1}$$

Ecuación 8.29

b) Condiciones de invierno (T=16 °C)

$$k_{16} = (0.3241)(1.05)^{16-20} = 0.267\,d^{-1}$$

Ecuación 8.30

d) Paso 4. Cálculo del tiempo de residencia y volumen del reactor.

Tiempo de residencia tomando como base 80 por ciento de reducción del contenido de SSV en condiciones de invierno. Utilizar la Tabla 8.7 y tomar k_{dc} = 0.267 d^{-1} (para una temperatura de 16 °C). Para un reactor continuo el tiempo de residencia se determina con la siguiente ecuación:

$$TRH = \frac{X_O - X_e}{k_{dc}(X_e - X_n)} = \frac{1\,0000 - 4\,280}{0.267\,(4\,280 - 2\,850)} = 15\,d$$

Ecuación 8.31

donde:

TRH = tiempo de residencia, d

X_n = SSV no degradables a la entrada del reactor, mg L^{-1}

X_0 = SSV totales a la entrada del reactor, mg L^{-1}

X_e = SSV totales a la salida del reactor, mg L^{-1}

Solo para hacer una comparación: calcular el tiempo de residencia para el caso de un reactor discontinuo que opere en las mismas condiciones que las anteriores y con una reducción del 80 por ciento de SSV. Tomar la Ecuación 8.32 y resolver para TRH.

$$\ln\left[\frac{X_e - X_n}{X_o - X_n}\right] = -k_{dc}t$$

Ecuación 8.32

$$TRH = \ln\left[\frac{X_e - X_n}{X_o - X_n}\right] \Big/ -k_{dc} = \ln\left(\frac{4\,280 - 2\,850}{10\,000 - 2\,850}\right) \Big/ -0.267 = 6.03\,d$$

Ecuación 8.33

Como se esperaba, el reactor discontinuo es más efectivo, ya que el régimen continuo, opera con una concentración de SSV constante X_e = 4 280 mg L^{-1}. Para el reactor discontinuo, la concentración de SSV totales es X_O = 10 000 mg L^{-1} al comienzo de la operación, disminuyendo gradualmente hasta el valor X_e=4 280 mg L^{-1}. Debido que se considera una cinética de primer orden, la degradación será más rápida en el caso de reactores discontinuos para los que el valor medio de SSV es superior al valor constante X_e = 4 280 mg L^{-1} de un reactor continuo.

Volumen del reactor

El volumen del reactor se determina con la Ecuación 8.34, que considera el caudal de entrada y el tiempo de residencia.

$$V = Q_O \times TRH$$ Ecuación 8.34

Siendo Q_o = 190 $m^3 \cdot d^{-1}$, con lo cual:

$$V = 190\,m^3\ d^{-1} \times 15\,d = 2\,850\,m^3$$

Ecuación 8.35

e) Paso 5. Estimar la reducción en SSV en condiciones de verano, para el reactor diseñado en el paso anterior

Para calcular la reducción de SSV es necesario estimar el valor de X_e para las condiciones de verano y posteriormente realizar el balance de materia. Con la Ecuación 8.36 se calcula X_e:

$$X_e = \frac{X_O + k_{dc} X_n t}{1 + k_{dc} t}$$
$$= \frac{10\ 000 + (0.528)(2\ 850)(15)}{1 + (0.528)(15)}$$
$$= 3\ 652\ mg\ \ L^{-1}$$

Ecuación 8.36

donde:

$K_{30} = 0.528\ d^{-1}$
$X_o = 10\ 000\ mg\ L^{-1}$
$X_n = 2\ 850\ mg\ L^{-1}$
$t = 15\ d$

En la Tabla 8.9 se presenta el balance de materia para el reactor bajo las condiciones de verano.

Tabla 8.9 Balance de materia para funcionamiento en verano

Entrada	Salida
SSV	
Degradable:	$(X_d)e = 3\ 652 - 2\ 850 = 802\ mg\ \ L^{-1}$
$(X_d)o = 0.715(10\ 000) = 7\ 150 mg\ \ L^{-1}$	$X_n = 2\ 850\ mg\ \ L^{-1}$
No degradable:	$SSV\ totales\ (X_o) := 7\ 150 + 2\ 850 = 10\ 000\ mg\ L^{-1}$
$X_n = (0.285)(10\ 000) = 2\ 850\ mg\ \ L^{-1}$	
$SSV\ totales\ (X_o) := 7\ 150 + 2\ 850 = 10\ 000\ mg\ L^{-1}$	

La reducción de SSV en el verano se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$Reduccion\ de\ SSV\ en\ verano = 100\% - \left[\frac{(X_d)_e}{(X_d)_O} \times 100\%\right]$$
$$= 100\% - \left[\frac{802\ mg\ \ L}{7\ 150\ mg\ \ L} \times 100\%\right] = 88.8\%$$

Ecuación 8.37

Bajo las condiciones de verano se logra una reducción de SSV del 88.8 por ciento y en el invierno un 80 por ciento.

2. Solución parte 2. Cálculo de los kg de O_2 h^{-1} requeridos basados en las condiciones de verano

   Especificación de los aeradores (en base a las condiciones de verano).

   El procedimiento para específicar los aeradores para un reactor continuo funcionando a una temperatura T_w, (ejemplo, T_w = 30 °C) a partir de los datos obtenidos en un reactor discontinuo de laboratorio funcionando a una temperatura T_O (ejemplo, T_o = 20 °C), se describe a continuación.

   a) Paso 1. Determinar la concentración de SSV en la salida, X_e.

      Para un reactor discontinuo de laboratorio aerado durante un tiempo t (ejemplo, t = 15 d) a 20 °C. Esto se consigue resolviendo la Ecuación 8.38 (las variables de la ecuación son las mismas que se han manejado en las ecuación anteriores dentro de este mismo ejemplo)

$$X_e = (X_0 - X_n)e^{k_{dc}t} + X_n$$

Ecuación 8.38

$$X_e = (10\ 000 - 2\ 850)e^{(-0.3241)(15.0)} + 2\ 850 = 55 + 2\ 850$$

$$X_e = 2\ 905\ mg\ \ L^{-1}$$

Ecuación 8.39

$$\because (X_d)_e = (X_e - X_n) = 2\ 905 - 2\ 850 = 55\ mg\ \ L^{-1}$$

Ecuación 8.40

   b) Paso 2. De la Tabla 8.6 trazar la curva de consumo de oxígeno, que es la representación de la columna 3 en función de la columna (1).
   c) Paso 3. Determinar el área limitada por la curva entre las abscisas t = 0

y t = 15 (t=15 por el tiempo de retención calculado) para la curva de la (Ilustración 8.16).

Esta área equivale al oxígeno consumido mg L^{-1} para un reactor discontinuo cargado con una concentración de SSV inicial X_0 (X_0 = 10 000 mg L^{-1}) aerado durante un tiempo de t días (t = 15 d) a 20 °C:

$$Oxigeno\ utilizado = \int_0^t \underset{\downarrow}{(VUO)}dt = \frac{mg}{L.h} \times d^t \times \frac{24\,h}{d} = \frac{mg}{L}$$

Ecuación 8.41

donde:

VUO = Velocidad de utilización del oxígeno, mg L h^{-1}

d = Días

h = Horas

mg = miligramos

L = Litros

De acuerdo a la Ecuación 8.41, el área bajo la curva de la Ilustración 8.16 debe multiplicarse por un factor 24 h d^{-1} para que el oxígeno utilizado venga en mg L^{-1}. Resolviendo la integral, para el ejemplo el área calculada será:

$$255.0\frac{mg}{L \times h} \times d \times \frac{24\,h}{d} = 6\ 120\ \ mg\ L^{-1}$$

Ecuación 8.42

d) Paso 4. Obtener el valor medio de la velocidad de utilización de oxígeno, en mg L^{-1} h^{-1}, para el periodo de aeración del reactor discontinuo en el intervalo 0 a t. Será el valor medio de la integral, por lo tanto se tiene:

$$Valor\ medio\ de\ la\ velocidad\ de\ utilizacion\ de\ oxigeno(reactor\ discontinuo)$$
$$= \frac{1}{t-0}\int_0^t (VUO)dt = \frac{1}{t}\int_0^t (VUO)dt$$

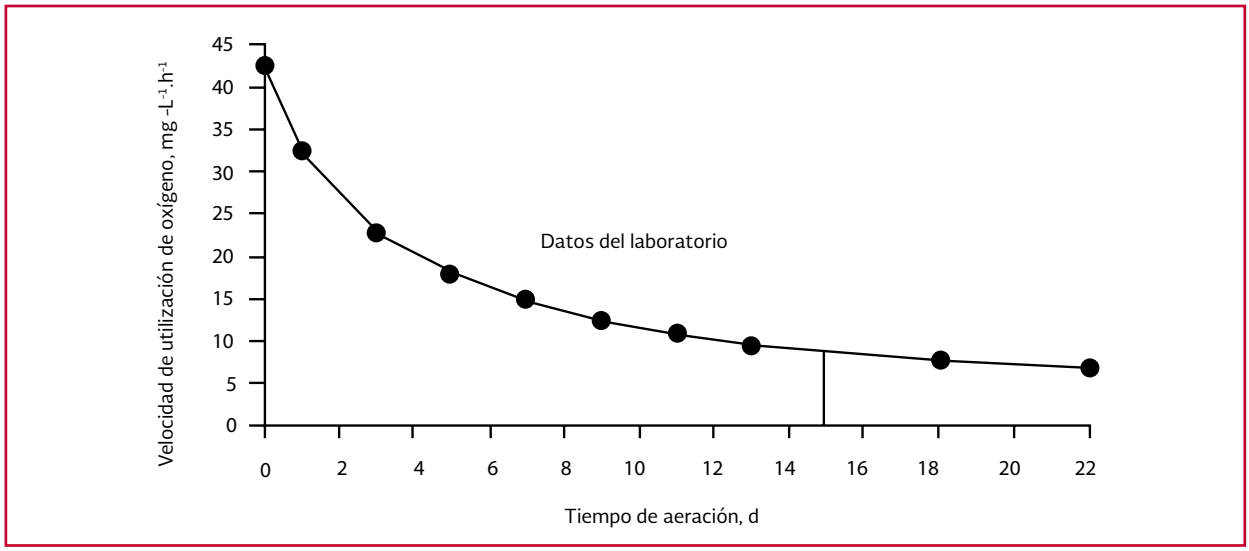
Ecuación 8.43

Para el ejemplo de diseño será:

$$Valor\ medio\ de\ la\ velocidad\ de\ utilizacion\ de\ oxigeno\ (reactor\ discontinuo)$$
$$= \frac{1}{15\,d-0\,d} \times 6\ 120\frac{mg}{L} = 408\ mg\ \ L^{-1}\ \ d^{-1}$$

Ecuación 8.44

Ilustración 8.16 Curva de utilización de oxígeno



e) Paso 5. Puede suponerse que la velocidad de utilización de oxígeno es proporcional a la reducción de SSV conseguida en la operación. De este modo, el valor medio de la ecuación 8.45 del funcionamiento en discontinuo puede corregirse para las condiciones del reactor continuo por la relación de la Ecuación 8.46

$$\left[\frac{1}{t}\int (VUO)dt\right] \qquad \text{Ecuación 8.45}$$

$$\text{Velocidad de utilizacion de oxigeno (reactor continuo)} = \frac{\int_0^t (VUO)dt[(X_d)_0-(X_d)_e]\,react.cont.T_W(verano)}{t[(X_d)_0-(X_d)_e]\,reac.disct.T_W(lab.)}$$

Ecuación 8.46

donde:

VUO = Es el valor medio de la velocidad de utilización de oxígeno para un reactor continuo, calculado anteriormente en 408 mg L^{-1} d^{-1}

$(X_d)_0$ = reactor continuo a la temperatura de verano = SSV degradables a la entrada del reactor en mg L^{-1} calculados anteriormente (7 150 mg L^{-1})

$(X_d)_e$ = reactor continuo a la temperatura de verano = SSV degradables a la entrada del reactor en mg L^{-1} calculados anteriormente (802 mg L^{-1})

$(X_d)_0$ = reactor discontinuo a la temperatura de verano = SSV degradables a la entrada del reactor en mg L^{-1} calculados anteriormente (7 150 mg L^{-1})

$(X_d)_e$ = reactor discontinuo a la temperatura de verano = SSV degradables a la entrada del reactor en mg L^{-1} calculados anteriormente (55 mg L^{-1})

$$\text{Velocidad de utilizacion de oxigeno (reactor continuo)} = (408)\times\left[\frac{7\ 150-802}{7\ 150-55}\right] = 365\ mg\ \ L^{-1}\ \ d^{-1}$$

Ecuación 8.47

f) Paso 6. A partir de la utilización de oxígeno en el reactor continuo obtenido en el paso 5, y el volumen del reactor calculado en la solución de la parte 1 (paso 4.), se calculan los kg O2 por día requeridos. Para el ejemplo (mg L^{-1} equivalen a g m^{-3})

$$\text{Velocidad de utilizacion de oxigeno (reactor continuo)} = (408)\times\left[\frac{7\ 150-802}{7\ 150-55}\right] = 365\ mg\ \ L^{-1}\ \ d^{-1}$$

Ecuación 8.48

O también:

$$\frac{1\ 040}{24} = 43.5\ kg\ O_2\ transferidos\ \ h^{-1}$$

Ecuación 8.49

La expresión para la edad de lodos en el reactor de lodos podría escribirse como se presenta en la Ecuación 8.50.

$$\theta_c = \frac{kg\ SSVLM\ en\ el\ digestor}{entrada\ neta\ de\ SSV\ en\ el\ sistema\ (kg\ \ d^{-1})} > 0$$

Ecuación 8.50

Partiendo de esta ecuación calcular la edad del lodo en condiciones de invierno y verano.

En la Tabla 8.7 se presenta el balance de materia correspondiente. El volumen del reactor calculado fue de 2 850 m^3. (Parte 1, paso 4), en consecuencia:

$$kg\ de\ SSVLM\ en\ el\ reactor = VX_e$$
$$= 2\ 850\ m^3 \times 4\ 280\ g\ \ m^{-3} \times \frac{1}{1\ 000} kg\ \ g^{-1} = 12\ 198\ kg$$

Ecuación 8.51

Entrada neta de SSV en el sistema:

$$Q_0(X_0 - X_e)$$
$$= 190\ m^3\ \ d^{-1} \times (10\ 000 - 4\ 280)g\ \ m^{-3} \times \frac{1}{1\ 000} kg\ \ g^{-1}$$
$$= 1\ 087\ kg\ \ d^{-1}$$

$$\theta_C = \frac{12\ 198}{1\ 087} = 11.2\ d$$

Ecuación 8.52

Para las condiciones de verano X_e = 3 653 mg L^{-1}, dando los cálculos similares correspondientes θ_c = 8.63 d.
En la Tabla 8.5 se muestra un resumen de las características del reactor y del proceso de estabilización aerobio

Tabla 8.10 Principales resultados para el diseño del reactor

Parámetro	Valor
Cantidad de lodo a estabilización	190 $m^3\ d^{-1}$
Reducción de sólidos volátiles	88 por ciento en invierno y 80 por ciento en verano
Tiempo de residencia hidráulica	11.2 d
Oxígeno requerido	1 040 kg $O_2\ d^{-1}$
Tiempo de retención hidráulico	15 d
Volumen del reactor	2 850 m^3

En el ejemplo anterior se observa que la reducción o destrucción de sólidos volátiles puede lograrse con un tiempo de retención de sólidos mucho menor que el recomendado para alcanzar un remoción significativa de patógenos que garantiza un lodo de calidad tipo B. Las recomendaciones para lograr la reducción de patógenos son entre 40 y 60 d, de tiempo de retención de sólidos (TRS) (WEF *et al*., 2012). En caso de que por las condiciones ambientales se requieran menores tiempos de retención de sólidos, la EPA recomienda el análisis continuo de los microorganismos patógenos en el lodo estabilizado.

9

Estabilización de lodos por composteo

9.1. Introducción

El composteo aerobio termofílico, es una tecnología que estabiliza el lodo para obtener un biosólido tipo A de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002 o una destrucción adicional de patógenos conforme a lo establecido en el CFR-40 parte 503 de la EPA. Para alcanzar esta destrucción adicional de patógenos es necesario que la temperatura promedio dentro de la mezcla en composteo alcance temperaturas de 55°C durante por lo menos 10 días consecutivos, de lo contario se puede presentar un recrecimiento de los microorganismos patógenos.

Si el proceso de composteo se realiza a temperatura mesofílica, el lodo se estabiliza pero la inactivación de patógenos a esta temperatura, en promedio 40°C, no es completa, logrando que la composta, solo alcance a ser un biosólido tipo B según la NOM-004-SEMARNAT-2004.

El composteo es una tecnología atractiva para la estabilización de lodos residuales donde se requieran compostas de alta calidad para uso en la agricultura, en los cultivos ornamentales, en viveros y para su comercialización como abono orgánico o mejorador de suelo. De esta forma este proceso se puede considerar costo-efectivo ya que la venta de la composta puede disminuir o pagar completamente los costos de operación y mantenimiento.

El IMTA, realizó un estudio de factibilidad para un sistema de composteo ubicado en el estado de Morelos y considerando dos alternativas para la venta de composta: a granel y envasada (Ramírez, *et al.*,1991). Bajo este contexto, obtuvo que la primera opción, venta de composta a granel, es capaz de recuperar la inversión inicial y mantener los gastos de operación y mantenimiento, siempre y cuando el precio de venta fuera similar al de las tierras de vivero que se comercializan en esta región. La venta envasada es mucho más rentable pero debe realizarse un estudio de mercado para su comercialización.

Si se quiere considerar esta tecnología para el tratamiento del lodo se debe realizar un estudio de mercado para conocer las posibilidades de venta del producto, así también la disponibilidad de materiales acondicionadores, orgánicos e inorgánicos de la región, que sean de bajo costo, disponibles durante el año para asegurar que siempre se tengan los insumos que se requieren para realizar este proceso.

En este capítulo se define el proceso de composteo, los objetivos, las bases teóricas que comprenden: las etapas del proceso, los factores que

influyen en el composteo, los tipos de sistemas de composteo. Los criterios de diseño y un ejemplo de diseño.

9.2. Objetivos

Los principales objetivos de esta tecnología son:

- Estabilizar la materia orgánica para convertirla en humus
- Reducir la concentración de microorganismos patógenos
- Proporcionar estabilización adicional, eliminando la generación de olor y la atracción de vectores
- Producir un material estable, manejable que pueda usarse como acondicionador de suelo o comercializarse

9.3. Bases teóricas

El composteo es un proceso de estabilización biológica de la materia orgánica en presencia de oxígeno y bajo condiciones controladas. Durante el composteo moléculas orgánicas complejas se transforman en compuestos simples, a través de la actividad y crecimiento de las bacterias, actinomicetos y hongos. Durante el proceso los microorganismos utilizan una porción del carbono y nitrógeno para la síntesis de materiales celulares (crecimiento), y durante su actividad y desarrollo (respiración) generan calor incrementando la temperatura llegando a predominar en el proceso los microorganismos termofílicos. El rango óptimo de temperatura para estos microorganismos está entre 40 y 75°C (Haug, , 1993). La intensidad y duración de este calor interno produce la rápida destrucción de los microorganismos patógenos y elimina los compuestos orgánicos productores del mal olor, asegurando la estabilidad del producto final. El composteo es un método que elimina la necesidad de reactores y otros procedimientos costosos.

Reacciones:

Fase 1

Materia Bacteria Material

$$Organica + NH_4 + 0_2 \text{--------} > Celular + CO_2 + H_2O$$

Ecuación 9.1

Fase 2

Materia

$$Celular + 0_2 \text{--------} > Composta + CO_2 + H_2O + NO_3$$

Ecuación 9.2

Los principales componentes del sistema de composteo son el lodo residual y los materiales acondicionadores. El conocimiento de las características de cada componente determina las proporciones en que deben integrarse para que el proceso se realice adecuadamente.

Lodo

El lodo para el proceso de composteo no necesita estar estabilizado, debe conocerse la generación diaria del lodo para poder establecer correctamente la capacidad del sistema de composteo.

Materiales acondicionadores

Los materiales acondicionadores se utilizan para acondicionar el lodo para el composteo, sus principales funciones son:

Proporcionar estructura, textura y porosidad al lodo con el fin de facilitar la difusión del oxígeno y de otros gases en la mezcla.

Proporcionar energía adicional al proceso, para elevar la temperatura al rango termofílico y evaporar el agua

Algunos materiales acondicionadores pueden cumplir las dos funciones ya que por ser biodegradables además de dar porosidad y textura son una fuente de energía adicional durante el proceso. Los materiales más adecuados son de origen orgánico como desperdicios agroindustriales, entre los cuales se encuentran la pedacería de madera, el aserrín, la viruta, la cascarilla de arroz, el bagazo de caña y la basura orgánica, entre otros.

Materiales inorgánicos pueden utilizarse para dar porosidad a la mezcla, siempre y cuando su densidad no sea muy alta y contribuyan a dar mayor estructura al lodo. Estos materiales pueden ser piedras volcánicas como tezontle (lava volcánica), carbón activado, etc. En la tabla se muestran materiales acondicionadores que generalmente se utilizan en este proceso.

Además de estos requisitos básicos se debe tomar en cuenta la disponibilidad y el costo del material acondicionador. Se debe enfocar la atención sobre todo en aquellos desechos agroindustriales que se producen en grandes volúmenes como pedacería de madera, bagazo de caña, cascarilla de arroz, basura orgánica, etc. Otros materiales pueden considerarse como una fuente estacional de material por ejemplo, algunos desperdicios de la cosecha como olote, rastrojo, etc. La Tabla 9.1 presenta algunos materiales acondicionadores que fueron utilizados en experimentos realizados por el Instituto Mexicano del Tecnología del Agua (IMTA) (Ramírez, *et al.*, 1994).

Tabla 9.1 Materiales acondicionadores para el composteo (Ramírez, et al., 1994)

Orgánicos	Inorgánicos o inertes
Proporcionan porosidad y Energía	**Proporcionan estructura y porosidad**
Bagazo de caña	**Tezontle**
Pedacería de madera	**Carbón activado**
Desperdicios de la poda de árboles	**Pedazos de hule**
Cáscara de arroz	
Carbón vegetal	
Cáscara de coco	
Cáscara de nuez	
Viruta de madera	
Basura orgánica	

9.3.1. Etapas del proceso

El proceso de composteo consta básicamente de las siguientes etapas: mezclado, estabilización termofílica y curado o estabilización final; además existen dos etapas opcionales que son el secado y el cribado. En la Ilustración 9.1, se muestra el diagrama de flujo del proceso. Los componentes básicos del proceso son el lodo y los materiales acondicionadores. Las principales etapas del proceso se describen a continuación:

9.3.1.1. Mezclado

Es la primera etapa del proceso y consiste en obtener una mezcla homogénea al revolver el material acondicionador con el lodo. La mezcla final debe tener una porosidad de 30 a 35 por ciento (espacios libres) y una humedad inferior al 60 por ciento. El mezclado se puede realizar por medio de diferentes mezcladores estáticos (Ilustración 9.2) que existen en el mercado o con ayuda de un cargador frontal.

9.3.1.2. Estabilización termofílica

La etapa termofílica tiene lugar después del mezclado y requiere de tres o cuatro semanas para completarse. Durante este período la mezcla debe tener aeración manual o forzada con el fin de proporcionar el oxígeno necesario para que los microorganismos realicen la biodegradación y se generen altas temperaturas (50-55 °C) necesarias para la destrucción de microorganismos patógenos. Según (Haug, *et al.*,1978), es la etapa de alta actividad microbiana caracterizada por la presencia de microorganismos termofílicos y alta reducción de sólidos volátiles biodegradables. Es la etapa que requiere de mayor control, (Ilustración 9.3).

9.3.1.3. Curado o estabilización final

Se realiza después de la estabilización termofílica y su duración es de aproximadamente 30 días. Esta etapa se caracteriza por bajas temperaturas, menores requerimientos de oxígeno y baja producción de olores. Es una etapa muy importante donde se puede lograr la degradación adicional de compuestos difícilmente biodegradables (Ilustración 9.4).

9.3.1.4. Secado y cribado

Tanto el secado como el cribado son etapas opcionales en el proceso de composteo, tienen como propósito la obtención de un material de mejor calidad.

Ilustración 9.1 Composteo de lodos de aguas residuales

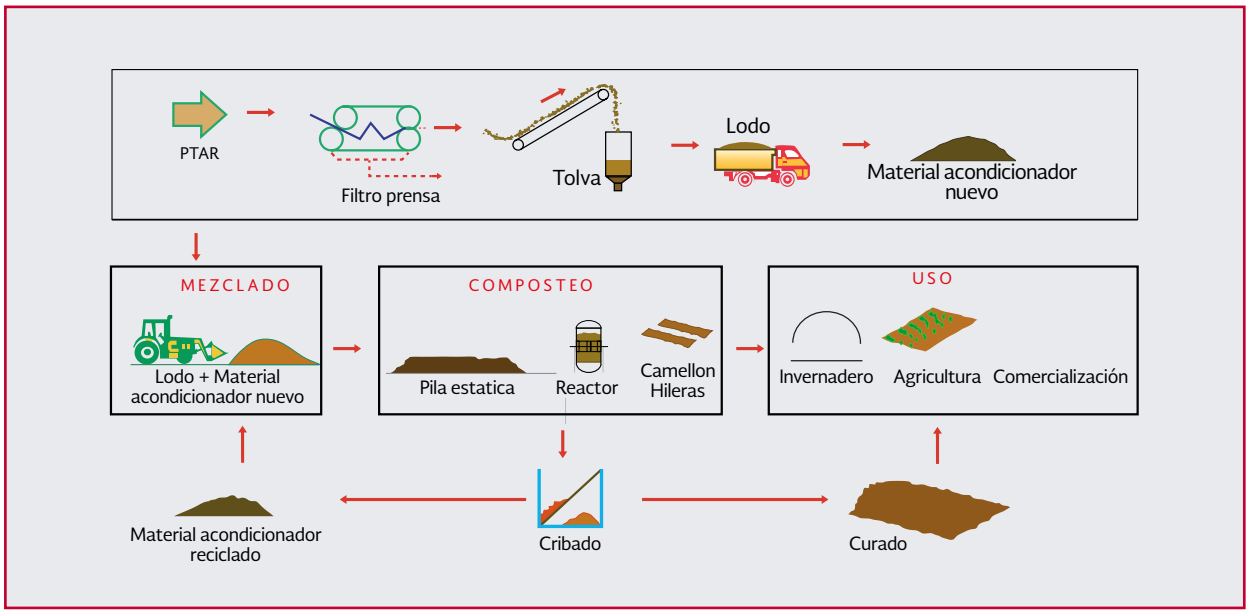


Ilustración 9.2 Mezclado de lodos residuales con materiales acondicionadores

Ilustración 9.3 Pila estática de composteo en su etapa termofílica

Ilustración 9.4 Pilas en curado

Ilustración 9.5 Criba para composta

El cribado (Ilustración 9.5) permite una mejor recuperación del material acondicionador que puede reciclarse al proceso y un producto de tamaño homogéneo dependiendo del uso que quiera darse a la composta.

9.3.2. Sistemas de composteo

El composteo puede realizarse por medio de camellones, en pila estática y en reactores. En la Tabla 9.2, muestras las características de los diferentes tipos de sistemas.

Tabla 9.2 Principales sistemas de composteo

Sistemas	Características	Ilustración
Camellón o hileras	La mezcla se coloca formando una hilera o camellón. Las dimensiones prácticas son de 15 m de largo, 4.5 m de ancho y 1.5 m de altura. El aire se suministra por volteo 3 o 4 semanas. Ventajas: Fácil de operar, ideal para pequeños volúmenes de lodo. Desventajas: Requerimientos de área, control del proceso para mantener condiciones aerobias y alcanzar temperaturas termofílicas. Inversión inicial: Terreno, cargador frontal y camión para transporte de materiales.	Ilustración 9.6 Composteo en camellón
Pila estática	La mezcla se coloca formando una pila. Las dimensiones prácticas son de 20 m de largo, 6 m de ancho y de 2 o 3 metros de altura. El aire se suministra por medio de un ventilador y un sistema de difusores de aire. Ventajas: Menores requerimientos de área que el sistema de camellón, control total del proceso en forma manual o automática. Inversión: Equipo de mezclado (opcional), superficie impermeable, ventiladores, sistema de difusores de aire, termopares, cargador frontal y camión para manejo de materiales.	Ilustración 9.7 Composteo en pila estática
Reactor	Los reactores se construyen en forma rectangular o circular pueden ser de flujo horizontal, vertical o inclinado. Pueden tener un lecho fijo o móvil. El suministro de aire es por medio un sistema de difusores y un compresor. Ventajas: Menores requerimientos de área, mayor control del proceso, control efectivo de olor y no hay efectos por cambios meteorológicos. Desventajas: Altos costo de inversión, operación y mantenimiento. Inversión inicial: Variable dependiendo del tipo de reactor seleccionado	Ilustración 9.8 Reactores experimentales

9.3.3. Control del proceso

El proceso debe tener un control para garantizar que cumpla con los objetivos del tratamiento que son principalmente obtener un producto estable similar a un abono orgánico e inactivar o matar los microorganismos patógenos. En la Tabla 9.3 se muestran los principales parámetros que deben controlarse en el proceso.

Tabla 9.3 Parámetros para el control del proceso

Parámetro	Criterio de control	Muestreo	
		Frecuencia	Puntos
Humedad	Mezcla inicial: 60 por ciento Durante el proceso de 40-60 por ciento	Semanalmente	Mezcla inicial, al inicio del proceso, si hay cambios en los materiales, cambios de estación que afecten el contenido de humedad (calor, lluvias, etc). Mezcla en composteo, durante el proceso.
Temperatura	55ºC por tres días consecutivos en la etapa termofílica (Burge & Claccio (1979)	Diariamente	Mezcla en composteo y curado, para asegurar la estabilización y la muerte o inactivación de patógenos
Oxígeno	5-15 por ciento de oxígeno en la mezcla	Opcional	Mezcla en composteo, en la etapa termofílica para asegurar condiciones aerobias
Supervivencia de patógenos, contenido de metales pesados, tóxicos orgánicos, compuestos emergentes	De acuerdo a normas establecidas	Periódicamente	En el lodo y la composta, al inicio y final del proceso. Si hay cambios en los materiales acondicionadores. Periódicamente en la composta que va a ser utilizada o comercializada
Olor	No debe generar olor	Diariamente	Mezcla en composteo. Indica falta de oxígeno, falta de porosidad o exceso de humedad en la mezcla
Operación del proceso	De acuerdo al diseño	Diariamente	Mezcla en composteo. Revisión del funcionamiento de ventiladores, termopares, timers, etc.
Estabilidad y nutrientes	De acuerdo a normas	Periódicamente	Composta. Caracterización del producto y para control de calidad.

9.3.4. Estabilidad de la composta

Es término "estabilización" se refiere a la oxidación de la materia orgánica y a su conversión a formas más refractarias. Cuando la materia orgánica se oxida por medio de microorganismos, una porción de la energía liberada se aprovecha para la síntesis de nuevo material celular, y para transformar la materia orgánica a CO_2 y H_2O. Después de un determinado tiempo de reacción, queda materia orgánica que es muy resistente al ataque microbiano. Esto es lo que comúnmente se denomina humus o composta. Existen diferentes formas para medir el grado de estabilización de una composta, en la Tabla 9.4 aparecen las más fáciles de implementar.

En la Tabla 9.5 se muestran otros parámetros que pueden utilizarse para medir la estabilidad de la composta.

Tabla 9.4 Métodos para medir la estabilidad de la composta

Método	Significado
Medida de la respiración microbiana por medio de respirómetro	Mide el consumo de oxígeno de los microorganismos aerobios, producto de sus actividades metabólicas. Una composta estable tendrá un consumo de oxígeno entre 100 a 20 mg O2/ kg-d. ((Willson B. & Dalmat, 1986)
Medida del efecto de la composta sobre el crecimiento y desarrollo de plantas	Zucconi et al. 1981, desarrollaron una prueba basada en la medida del porcentaje de germinación y en la elongación de raíces en un extracto acuoso de composta. El procedimiento sólo requiere de 24 horas con incubación a 27°C y es cuantitativo
La relación carbono: nitrógeno	La relación C:N es un indicador muy sensible del comportamiento del proceso, si el proceso de composteo se ha llevado en buenas condiciones la relación tenderá a reducirse, una relación baja es característica de una composta de alta calidad. Una relación de 56/1 es considerada como indicadora de un material estable.
Materia orgánica	La estabilización de la materia orgánica durante el composteo puede medirse en forma indirecta por medio de los siguientes parámetros: Sólidos volátiles (SV), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y carbón orgánico total (COT). Estos parámetros pueden servir para indicar la estabilidad de la composta pero no son medidas exactas y no sirven para hacer comparaciones con otras compostas.

Tabla 9.5 Otros parámetros utilizados para medir la estabilidad de la composta (Haug, 1993)

Parámetros
Disminución de la temperatura durante el composteo y curado.
Bajo potencial de recalentamiento en la composta
Presencia de compuestos tales como nitratos y la ausencia de otros como amoniaco, sulfuros, ácidos orgánicos y almidones;
Reducción de la atracción de insectos y del desarrollo de larvas en la composta
Cambio en las características del olor. La composta estabilizada tiene un olor característico a tierra húmeda.
La experiencia del operador. La composta estabilizada puede determinarse por su color, textura, tamaño de partícula y olor.

9.3.5. Equipos y materiales para el composteo

En la Tabla 9.6 se enlistan los equipos y materiales que son útiles en un sistema de composteo. El camión de volteo sirve para transportar materiales acondicionadores y lodo al área de composteo, así como la composta a los sitios de venta. El cargador frontal va a hacer las labores de mezclado y montaje de la pila. La picadora va a fraccionar el material acondicionador hasta dejarlo a un tamaño adecuado de partícula (5 a 10 cm de largo). En un sistema mecanizado las bandas transportadoras van a facilitar el manejo del material haciendo más rápidas las labores de traslado de materiales.

Existen en el mercado mezcladores mecánicos que ayudan a hacer el mezclado de los materiales pero no sustituyen a los cargadores en el montaje de las pilas. La cribadora ayuda a obtener una composta de tamaño de partícula homogénea que va a hacer más atractiva para su venta, además ayuda a recuperar material acondicionador que puede ser recirculado al proceso.

Tabla 9.6 Equipos para el composteo

Concepto
• Camión de volteo
• Cargador frontal
• Picadora
• Mezcladores mecánicos
• Cribadora
• Bandas transportadoras
• Equipo de aeración (Ventiladores y difusores)
• Termopares

En las siguientes ilustraciones (Ilustración 9.9, Ilustración 9.10 y Ilustración 9.11) se muestran otros equipos utilizados durante en la preparación de materiales acondicionadores y el mezclado.

Durante el proceso se requiere proporcionar oxígeno a la mezcla. Esto se realiza por medio de un cargador frontal o trascabo en los sistemas de composteo de camellón y para los sistemas en pila estática se utilizan equipos de aeración forzada como ventiladores y una tubería o canal para la inyección de aire a la pila. La Ilustración 9.12 muestra una tubería perforada de PVC y la Ilustración 9.13 un canal de aeración utilizada en los sistemas de composteo. La Ilustración 9.14 muestra los ventiladores que se utilizan para enviar el aire a la pila de composteo.

Ilustración 9.9 Camión para transporte de lodos a sitio de composteo

Ilustración 9.10 Sistema de aeración para las pilas estáticas.

Ilustración 9.11 Picadora para el fraccionamiento del material acondicionador

Ilustración 9.12 Canal perforado para la inyección de aire

Ilustración 9.13 Mezclador estático y bandas transportadoras para los materiales y mezcla

Ilustración 9.14 Ventilador centrífugo para el sistema de composteo

9.3.6. Áreas de un sistema de composteo

Para hacer la instalación de un sistema de composteo se requiere de diferentes áreas:

- Almacén de lodo y material acondicionador
- Área de mezclado
- Área de composteo. (Camellones, pila estática, o reactor)
- Área de pilas en curado
- Área de cribado (opcional)
- Almacén de composta
- Área de análisis para control del proceso

9.3.7. Calidad de la composta

La calidad de la composta se mide por el contenido de materia orgánica, contenido de nutrimentos, el pH, el contenido de sales, las bases intercambiables y la relación de adsorción de sodio (RAS). En la Tabla 9.7 se compara la composta de lodo residual con diferentes abonos orgánicos. Se observa la similitud en el contenido de materia orgánica y nutrimentos entre estas compostas y la obtenida con lodo residual.

Desde el punto de vista de protección ambiental, la calidad de la composta la definen otros parámetros como son: el contenido de metales pesados, los compuestos orgánicos tóxicos (compuestos orgánicos volátiles, plaguicidas, compuestos orgánicos polinucleares, compuestos orgánicos policlorados (PCVs)), los compuestos emergentes y el contenido de microorganismos patógenos. El uso de la composta ya sea para usos agrícolas, forestales, parques y jardines, viveros, etc., se controla por medio de normas. En México la aplicación de la composta de lodos residuales se controla por medio de los límites máximos permisibles señalados en la NOM-004-SEMARNAT-2002.

En caso de que la composta no cumpla con la calidad requerida para uso y disposición en suelo se le tendrá que dar otra disposición final, como sería llevarla a un relleno sanitario. Para conocer la normatividad puede consultar el Capítulo3 del libro y para la forma de disponer la composta en el suelo agrícola el Capítulo 13.

9.3.8. Subproductos

Durante el proceso de composteo se generan olores producto de la degradación de la materia orgánica, los cuales en su mayoría pueden controlarse con una adecuada operación del sistema de ventilación y una buena operación y mantenimiento en la planta.

Cuando las instalaciones están localizadas dentro de áreas urbanas se requieren dispositivos adicionales para el control de olor. Entre las tec-

Tabla 9.7 Comparación de abonos y composta de lodo residual

Parámetro	Abonos de:				
	Vacuno	Gallinaza	Porcino	Ovino	Composta de lodo residual
pH	8.7	7.6	7.2	9.0	6.3
Materia orgánica por ciento	48.24	29.43	46.90	48.24	30
Nitrógeno por ciento	2.10	5.10	3.10	2.30	5.0
Fósforo por ciento	0.58	2.06	0.64	0.72	0.94
Potasio por ciento	3.10	2.20	1.83	4.36	0.36

nologías más utilizadas se destacan: los lavadores químicos, los filtros de carbón activado y los biofiltros. Algunas instalaciones de composteo han tenido éxito en el uso de biofiltros y empiezan a documentarse en la literatura, donde se recomienda por su fácil manejo, costo efectivo de operación y alta eficiencia de remoción. En la Ilustración 9.15, se muestras las instalaciones para control de olor de la planta de composteo en pila estática de Betsville, Maryland. E.U.

Ilustración 9.15 Sistema para el control de olor. Cortesía planta de composteo de Betsville, Maryland

9.4. Criterios de diseño

La estabilización de la materia orgánica, la reducción de microorganismos patógenos y la remoción de sustancias tóxicas orgánicas e inorgánicas, son los principales objetivos del proceso. El desempeño del sistema depende del porcentaje de humedad o contenido de sólidos en la mezcla, de la relación carbono nitrógeno(C:N), de la concentración de oxígeno, del pH, la temperatura y de los materiales acondicionadores. En la Tabla 9.8 se resume la importancia de cada uno de estos parámetros dentro del proceso.

Para realizar el diseño de un sistema de composteo además de los criterios de la Tabla 9.8, deben considerarse los siguientes aspectos:

9.4.1. Planeación

En la planeación del proyecto deben considerarse los siguientes puntos:

Tabla 9.8 Consideraciones para el diseño de un sistema de composteo

Factores	Criterio
Contenido de humedad o sólidos en la mezcla	La mezcla lodo-material acondicionador debe tener un contenido de humedad ≤ 60 por ciento. Mayores contenidos de humedad provocan una degradación incompleta, bajas temperaturas y mal olor. Una mezcla muy seca (humedad < 40 por ciento), inhibe el proceso. (Poincelot, 1975)
Relación carbono-nitrógeno (C:N)	La degradación de materia orgánica puede limitarse por el contenido de carbono y nitrógeno en la mezcla. Relación recomendada C:N es de 30:1 a 40:1 (Gray, & A.J. , 1971), (Poincelot, 1975)
Aeración y oxígeno	La aeración se requiere para mantener condiciones aerobias, controlar la temperatura y evaporar el agua en exceso. 5-15 por ciento de oxígeno en la mezcla es adecuado para mantener condiciones aerobias
pH	El pH de la mezcla debe estar en un rango de 6 a 8, por la actividad microbiana. pHs extremos ≤ 5 o ≥ 10 reducen la velocidad del proceso.
Temperatura	Diversas especies se presentan durante la etapa de composteo. En la etapa inicial se registran temperaturas entre 25 y 40 °C y predominan los microorganismos mesofílicos. En la etapa termofílica, donde hay mayor remoción de patógenos, se encuentra poblaciones de actinomicetos y bacterias termofílicas, las temperaturas puede llegar a los 80ªC. La temperatura durante el proceso debe controlarse en un rango de 45 a 55 °C, por medio de la aeración. Para asegurar la inactivación de patógenos debe permanecer por los menos cinco días a temperaturas entre 55 y 60 °C.

9.4.1.1. Determinación de la generación de lodos

Es indispensable conocer la cantidad de lodo generada en la planta. Para cuantificar el lodo que se utiliza para el proceso de composteo se usa el lodo que sale de los lechos de secado o después de la deshidratación. Es decir del filtro prensa, la centrífuga o cualquier otro equipo que se utilice para deshidratar el lodo. Otro aspecto muy importante es que el lodo para ser composteado no requiere una estabilización, pero tiene que ser deshidratado hasta alcanzar un contenido de sólidos totales (ST) de 20 por ciento aproximadamente. Para el desaguado de volúmenes pequeños de lodo (1 a 2 toneladas/día) se pueden utilizar lechos de secado. Para volúmenes más grandes se requiere una deshidratación por medios mecánicos como filtros de banda, centrífugas, (ver capítulo 12).

9.4.1.2. Caracterización de lodo

Para definir la proporción en que debe prepararse una mezcla de lodo y materiales acondicionadores debe determinarse en el lodo ya deshidratado los siguientes parámetros:

- Sólidos totales (ST)
- Sólidos totales volátiles (STV)
- Humedad (por cientoH)
- Biodegradabilidad
- Capacidad Calorífica

Para decidir si el lodo puede utilizarse como biosólido se deben determinar los metales pesados y los microorganismos patógenos como lo recomienda la NOM-004-SEMARNAT-2002. También se debe realizar un análisis CRIT de acuerdo a la norma NOM-052-SEMARNAT-2005 para asegurar que no es un residuo peligroso.

Si la composta se va a utilizar en suelos agrícolas o cultivos de plantas ornamentales, se debe analizar en el lodo residual su contenido de nutrimentos (nitrógeno, fósforo y potasio) y la cantidad de materia orgánica. Los lodos con alto contenido de materia orgánica, baja concentración de contaminantes se pueden utilizar con pocas restricciones en suelo agrícola.

Otro aspecto que está tomando relevancia es la evaluación de toxicidad debido a que los contaminantes en el agua y lodo se encuentran formando mezclas que pueden presentar efectos sinérgicos antagónicos, neutros o aditivos. Una evaluación individual de cada parámetro no permite valorar completamente los efectos de toxicidad. Las pruebas utilizadas actualmente para la evaluación de toxicidad en lodos son las de microtox, la respiración microbiológica y los bioensayos con vegetales.

Los métodos analíticos para la determinación de los diferentes parámetros aparecen en el capítulo 3, de este libro.

9.4.1.3. Selección de materiales acondicionadores

Los materiales seleccionados deben estar disponibles en cualquier época del año y ser de bajo costo. Al igual que para el lodo, para cada material acondicionador se debe conocer el contenido de materia orgánica, sólidos totales y sólidos volátiles, humedad, densidad aparente, capacidad calorífica, biodegradabilidad, nutrimentos para definir la proporción en que deben utilizarse. El tamaño de los materiales no debe ser mayor de 5 cm. Cuando se usen materiales agroindustriales se debe verificar que estos no contengan residuos de plaguicidas o insecticidas ya que serían una gran fuente de contaminación para la composta.

9.4.1.4. Selección del sitio de composteo

El criterio de selección del sitio es básicamente similar al que se sigue para disponer desechos sólidos. La consideración general es contar con el área suficiente para realizar todas las operaciones de una manera económica sin provocar una alteración en el ambiente y molestias a las poblaciones cercanas.

El sitio más adecuado es cerca de la planta de tratamiento de agua. Otra ubicación deberá ser analizada detalladamente ya que podría generar altos costos debido al transporte del lodo. Aspectos importantes que deben considerarse en la selección del sitio son: costo del terreno, geohidrología, topografía, vías de acceso, uso del suelo y densidad de población.

9.4.1.5. Usos de la composta

También es importante definir los usos de la composta. Se debe determinar los posibles sitios de aprovechamiento ya sea en campos agrícolas, para recuperación de suelos, usos forestales, o la comercialización de la misma. Si se planea la comercialización de la composta se debe realizar un estudio de mercado con el fin de conocer los lugares de demanda del producto.

9.4.2. Balance de masa y energía

9.4.2.1. Balance De Masa

El balance de masa define la proporción en que deben mezclarse el lodo con los materiales acondicionadores y determinar los cambios cuantitativos de la mezcla en cada etapa del proceso.

Los criterios para preparar la mezcla de lodos y materiales acondicionadores son:

- Porosidad 35 a 40 por ciento (espacios libres). Ir al capítulo 10 para ver el cálculo de porosidad
- Humedad (≤ 60 por ciento)
- Sólidos totales 40 por ciento
- Densidad aparente 0.5-0.3 ton m^{-3} de mezcla

Para calcular el balance de masa se necesita conocer diferentes características en los materiales (lodo y acondicionadores). Se requiere determinar para cada uno de ellos las densidad aparente, el porcentaje de sólidos totales (ST por ciento), el porcentaje se sólidos volátiles que contienen los sólidos (por cientoSV) y la biodegradabilidad (por cientoBD). En la Tabla 9.9 se muestran los datos que se requieren para elaborar un balance de masa.

Tabla 9.9 Características de los materiales al inicio del proceso de composteo

Material	Densidad aparente ton m^{-3}	por ciento ST	por ciento SV	por ciento BD*
Lodo	0.95	20	74	50
Bagazo de caña	0.32	55	81	60
Reciclo	0.45	60	40	-

* BD= Biodegradabilidad

9.4.2.2. Balance de energía

El balance de energía determina la energía requerida en el sistema para elevar la temperatura y evaporar el agua. Para calcular la energía requerida se pueden utilizar las correlaciones empíricas propuestas por Haug.

1° Método

Cálculo de la energía requerida y disponible en el sistema.

Se calcula la energía del sistema o energía disponible y se compara con la energía requerida. La energía disponible debe ser mayor o igual a la energía requerida para asegurar que la mezcla pueda alcanzar la temperatura termofílica y evaporar el agua.

Energía del sistema o energía disponible

La energía disponible la proporcionan los sólidos volátiles biodegradables (SVB) que contiene la mezcla del lodo con los materiales acondicionadores y se calcula como:

Cálculo de los sólidos volátiles biodegradables

$$SVB = \sum_{i=1}^{n} SVi \times BDi \qquad \text{Ecuación 9.3}$$

SVi = Sólidos volátiles de cada componente (lodo y materiales)
BDi = Biodegradabilidad de cada componente

$$Energia\ disponible = \sum (SVBi \times Hi)$$

Ecuación 9.4

donde
SVBi = Sólidos volátiles biodegradables de cada componente (lodo y materiales acondicionadores)
Hi = Capacidad calorífica de cada componente

Energía requerida

La energía requerida es la cantidad de energía que requiere el sistema para evaporar el agua y es igual a la masa de agua que se debe evaporar por el calor latente de vaporización del agua a la temperatura del proceso.

$$Energia\ requerida = masa\ de\ agua\ evaporada \times Ha$$

Ecuación 9.5

Ha = Calor latente de vaporización del agua a la temperatura del proceso

2° Método

La energía requerida en el sistema se puede estimar mediante la siguiente correlación:

Relación de agua

$$W = Peso\ del\ agua / Peso\ SVB$$

Ecuación 9.6

Para que la energía del sistema sea suficiente para evaporar el agua la relación anterior debe ser <10 g H_2O/gSVB

Relación de energía

La energía también puede calcularse por la siguiente correlación:

$$E = calor\ liberado / peso\ del\ agua$$

Ecuación 9.7

La energía del sistema es adecuada si E> 1 260 BTU/LB Ó 542kJ kg^{-1} , y es baja

$$E< 1080\ BTU/LB\ \acute{O}\ 465\ kJ\ kg^{-1}$$

Cuando la energía es baja se debe adicionar un material acondicionador que proporcione energía, es decir que contenga un alto porcentaje de sólidos volátiles biodegradables.

9.4.2.3. Relación carbono: nitrógeno (C/N)

Par asegurar que la proporción de los materiales que definió el balance de masa y energía es correcta también se debe calcular la relación carbono/ nitrógeno. Para esto se debe conocer la cantidad de carbón y la cantidad de nitrógeno de cada componente.

La relación C/N se recomienda de: 30:1 a 40:1 (Gray, K., & A.J. , 1971), (Poincelot, 1975); 20:1 a 35:1 (Metcalf & Eddy, 2003).

Bajas relaciones C/N provocan pérdidas de nitrógeno por volatilización. Altas relaciones, por ejemplo 50:1, no permiten el sostenimiento de la masa microbiana. La relación C:N puede mejorar adicionando materiales que contengan carbón, por ejemplo cascarilla de arroz, bagazo de caña, viruta de madera.

$$\frac{C}{N}mezcla = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_i C_I}{\sum_{i=1}^{n} W_i N_i} \qquad \text{Ecuación 9.8}$$

Ci = Cantidad de carbono en cada material
Ni = Cantidad de nitrógeno en cada material
Wi = Peso seco de cada material

9.4.3. Dimensionamiento de áreas

El área requerida para el proceso se define en las diferentes etapas del mismo y se puede estimar de la siguiente manera.

Área de mezclado

Si la producción de lodos es menor de 10 toneladas por día, se puede usar un área de igual tamaño a la del composteo. Para manejo de mayores cantidades de materiales se requiere de un lugar especial que debe incluir el espacio para manejar la producción diaria de lodos y acondicionadores y otro para maniobras de la maquinaria (cargador frontal y camiones de carga).

Las consideraciones anteriores se aplican cuando el mezclado se realizar por medio de cargadores frontales. Si se utilizan otro tipo de mezcladores mecánicos, tales como molinos rotatorios, el área se reduce considerablemente.

Área de composteo

El espacio debe ser suficiente para acomodar en pilas la producción de 21 días, el equipo de aeración, y además permitir el movimiento de cargadores frontales. Cuando se requiera de una pila de control de olor se debe considerar un 10 por ciento del tamaño total.

El cálculo del área de composteo se realiza de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$Area = \frac{(1.1)(vol.de\ lodo\ de\ 21\ dias\ )(R+1)}{altura\ promedio\ de\ la\ pila}$$

Ecuación 9.9

$$R = \frac{V.\,de\ material\ acondicionador}{V.\,del\ lodo}$$

Ecuación 9.10

Se debe agregar un espacio de 12 a 15 metros para maniobras.

Área de curado. Para el curado se debe considerar que su duración es entre 30 y 45 días. Los cálculos son los mismos que para el composteo. En esta área no es necesario construir sistemas de inyección de aire.

Área de cribado y almacenamiento. El tamaño de esta área, depende de las condiciones de operación de la planta, del clima, de los acondicionadores utilizados y de la capacidad de comercialización del producto.

Es necesario considerar vías de acceso y estacionamiento. Se recomienda colocar una zona de amortiguamiento. Esta zona consiste en una barrera de árboles alrededor de la planta de composteo.

9.4.4. Sistema de ventilación

La aeración es el mecanismo más importante para el control del proceso de composteo. El sistema de ventilación lo constituye, como se mencionó anteriormente, un ventilador centrífugo horizontal conectado por un tubo sin perforar a un sistema de difusión de aire, que puede ser un canal de concreto o tubería (rígida o flexible) con perforaciones.

El área de las perforaciones varía a lo largo del difusor para obtener un suministro de aire homogéneo. Las especificaciones presentadas en la Tabla 9.10, permiten cumplir con este propósito:

Tabla 9.10 Área perforada a lo largo de un difusor (EPA, 1986)

Longitud de tubería (m)	Área perforada
Primeros 5 m	9.2 $cm^2\ m^{-1}$
5 a 10 m	18.4 $cm^2\ m^{-1}$
10 a 19 m	36 $cm^2\ m^{-1}$
19 m	90 $cm^2\ m^{-1}$

Un flujo de aire de 3500 pies cúbicos/hora/ton de lodo seco y una velocidad de 1500 pies/minuto son suficientes para satisfacer las necesidades de aeración durante el proceso. Presión requerida para vencer la cama de composta 200-315 mm de agua.

Ciclos de ventilación

Son específicos para cada tipo de mezcla y se pueden determinar experimentalmente para llevar un control manual o automático. El control manual se efectúa por medio de controladores de tiempo.

9.4.5. Automatización del proceso

Permite optimizar los ciclos de ventilación, la velocidad de biodegradación de la mezcla y reducir el mayor número de organismos patógenos debido a que se mantiene la temperatura en el rango termofílico (45-55°C) y la concentración requerida de oxígeno (>5 por ciento en volumen) en forma permanente.

La cantidad de aire que se suministra al sistema es la única variable de control. La temperatura y la cantidad de oxígeno se gradúan ajustando la aeración por retroalimentación.

Un sistema de automatización desarrollado por el IMTA consta de una unidad digital y de un programa ("COMPOSTA"), para la adquisición y control de datos. Los ciclos de ventilación programan el encendido o apagado del ventilador para mantener la temperatura o la concentración de oxígeno en los niveles preestablecidos o fijados por el operador.

Principios de operación del sistema

El sistema adquiere los valores de temperatura o concentración de oxígeno a través de sensores (termopares o medidores de oxígeno), colocados en la pila de composteo. Esta señal se conduce por cableado hasta los acondicionadores de señal, de donde salen con el voltaje adecuado para excitar los circuitos analógicos de entrada de la tarjeta para conversión de datos. El programa de control se encarga de depositar esta información al disco duro y a la pantalla de la computadora. El promedio de los datos de temperatura o el nivel de oxígeno registrado, se determinan de acuerdo con el nivel seleccionado si se enciende el ventilador para aerear la pila.

Base de datos del sistema

El programa, TEMCO, permite desplegar y analizar información generada por el programa de control y adquisición, COMPOSTA, y realiza la graficación y el análisis estadístico de los datos, y elabora reportes diarios o generales de las condiciones del proceso.

9.4.6. Sistema de control de olor

Un filtro de la composta producida es una forma muy económica de hacer un biofiltro que permita el control de olor en el sistema de composteo. Los parámetros de diseño más importante se muestran en la Tabla 9.11.

Tabla 9.11 Criterios generales para el diseño de biofiltros con composta (Sandoval, 2000)

Parámetro	Rango
Velocidad de flujo	0.3 - 1 m^3 min^{-1} m^{-2}
Temperatura	20-40 °C
Espesor del lecho	0.5 a 2.5 m (típico 1m)
Humedad	40 a 60 por ciento
pH	6-8
Lecho filtrante	Lodo, carbón activado, composta, turba, etc
Tiempo de residencia del gas	30-60 s
Capacidad de eliminación de gases H_2S	80-130 g m^{-3} h^{-1}

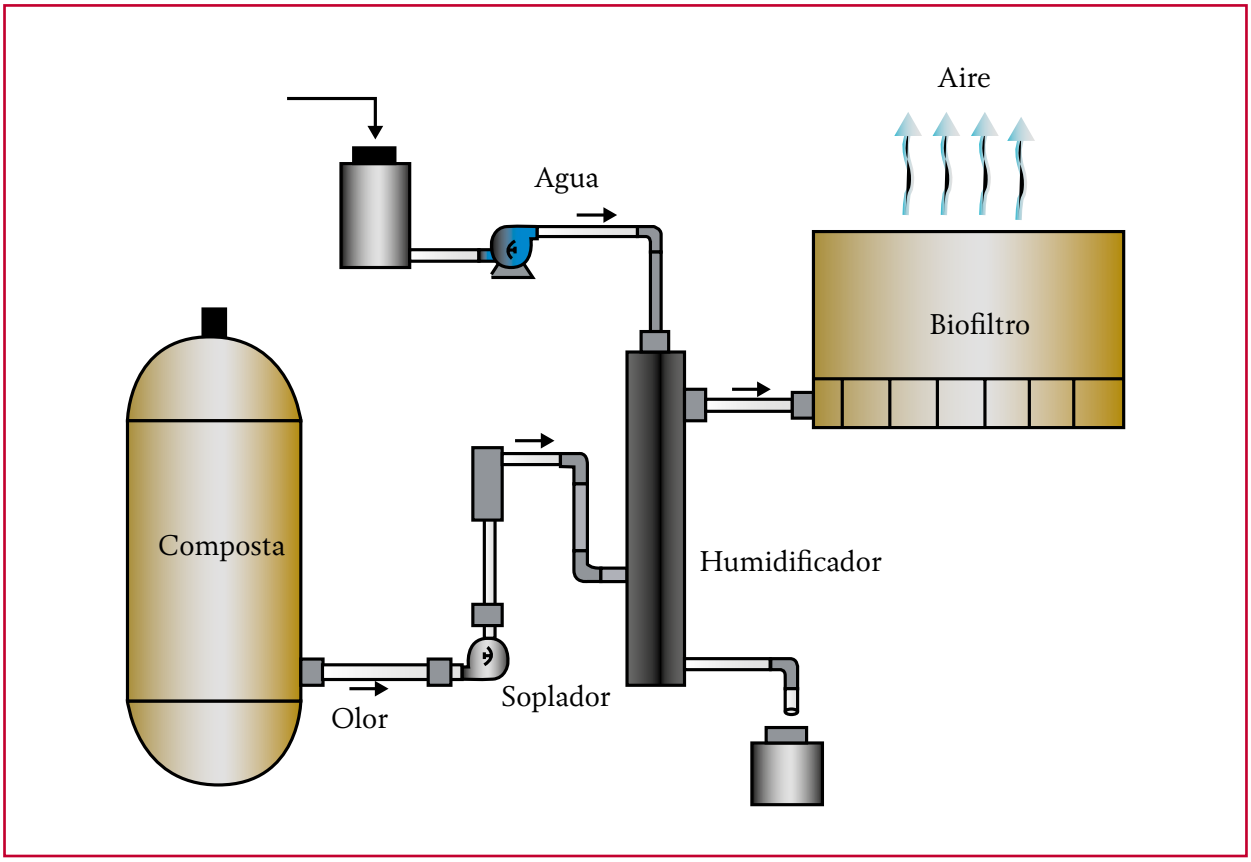
La biofiltración es una alternativa que alcanza remociones entre 90 y 95 por ciento de gases que contienen alcoholes, aldehídos, aminas, amoníaco, éteres y compuestos azufrados (Leson *et al.*, 1992).

En los sistemas de composteo se utilizan los lavadores químicos o la biofiltración para el control de olor. Los biofiltros son un 50 por ciento más económicos que los lavadores químicos (Lang & Jager, 1992). El biofiltro está compuesto por un medio filtrante que permita el desa-

rrollo microbiano. Se debe establecer el tamaño de partícula y la porosidad del mismo con el fin de proporcionar una gran área de contacto y bajas caídas de presión. Además debe tener poca compactación para reducir el mantenimiento y el reemplazo del material filtrante. Los materiales que pueden utilizarse como medio filtrantes pueden ser la composta de lodos de plantas de PTAR, turba, aserrín, pedacería de madera, arcilla porosa o esferas de poliestireno. El carbón activado puede utilizarse para incrementar la capacidad amortiguadora del filtro.

El esquema de la instalación del biofiltro se muestra en la Ilustración 9.16. El aire se succiona de la pila de composteo o del reactor de composteo por medio del ventilador. El aire pasa por una columna de humidificación para alcanzar la humedad recomendada, de 40 a 60 por ciento, y posteriormente se envía al biofiltro donde los microorganismos presentes en el lecho filtrante degradan los compuestos generadores de olor. Los sistemas de composteo pueden trabajar con los ventiladores en modo de succión y de aeración. Los primero días del proceso, el aire de la pila estática se succiona y se lleva hacia los filtros de control de olor. Este período varía entre 5 y 10 días. Posteriormente se invierte la operación del ventilador para que inyecte aire a la pila de composteo.

Ilustración 9.16 Sistema de control de olor durante el composteo



9.5. Ejemplo de diseño

9.5.1. Ejemplo para un PTAR de 600 L/s

Diseño de una planta de composteo para la estabilización del lodo de una planta de tratamiento de agua residual municipal con un caudal de 600 L/s. Las características del agua residual se muestran a continuación:

$$Q=600\ L\ s^{-1}$$

Tabla 9.12 Características del agua residual de una planta de tratamiento

Parámetros	Unidad	Afluente	Efluente
DBO	mg L^{-1}	220	30
SST	mg L^{-1}	120	30
pH	unidades	7.5	8.0
N_T	mg L^{-1}	38	4.5
P_T	mg L^{-1}	6	1

Determinación de la generación de lodos. Cuando se está realizando el proyecto de la planta de tratamiento se puede estimar la generación de lodos de acuerdo a las características del afluente de la planta de tratamiento de agua residual y al esquema o tren de tratamiento (Ilustración 9.17).

Cálculo de generación de lodo primario

Q= 600 L/s
SST= 120 mg L^{-1}
DBO= 220 mg L^{-1}

Se considera que el sedimentador primario tiene una eficiencia de remoción de 65 por ciento de SST y de 30 por ciento de DBO

Producción de lodos en función de la remoción de SST.

$$W_{lodo} = Q \times SST \times \%R$$

$$W_{Lodo} = \left(600\frac{l}{s}\right)\left(120\frac{mg}{L}\right)(0.65)\left(86400\frac{s}{d}\right)\left(\frac{kg}{10^6 mg}\right)$$

$$W_{Lodo} = 4\,044\ kg\ \ d^{-1}$$

W_{Lodo}= peso de lodo en base seca
Q= caudal o flujo de agua residual
SST= sólidos suspendidos totales
%R= porcentaje de sólidos SST

Producción de lodos en función de la remoción de DBO

$$W_{Lodo} = Q \times DBO \times \text{ por ciento } R$$

$$W_{Lodo} = \left(600\frac{l}{s}\right)\left(220\frac{mg}{L}\right)(0.3)\left(86400\frac{s}{d}\right)\left(\frac{kg}{10^6 mg}\right)$$

$$W_{Lodo} = 3\,422\ kg\ \ d^{-1}$$

Para el diseño se tomara la producción mayor 4 044 kg d^{-1} de lodo en base seca.

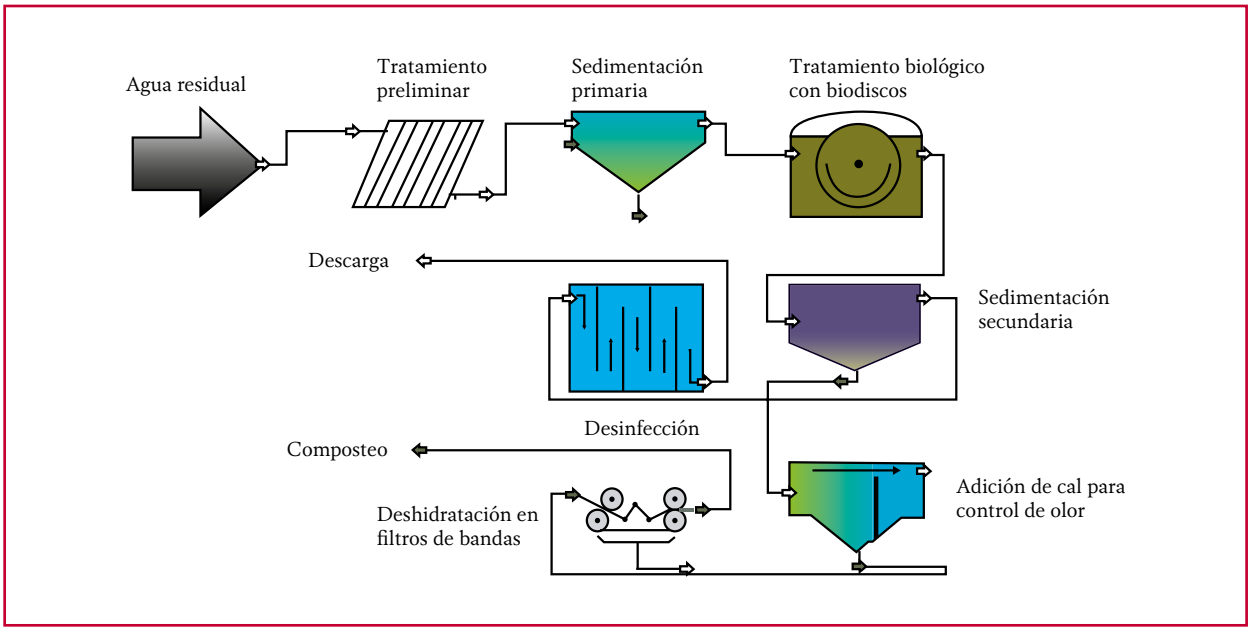
Producción de lodo secundario de un proceso de biodiscos

Q= 600 L/s
DBO=154 mg L^{-1}
SST= 42 mg L^{-1}
Remoción de SST= 80 por ciento
Remoción de DBO= 90 por ciento
DBO removida = (154 mg L^{-1})(0.9)=138.6 mg L^{-1}

Considerando que la producción de lodos en un biodisco es de 0.62 – 0.83 kg SST / kg DBO removida (WEF)

Considerando 0.83 kg SST/kg DBO removida la producción de lodos en base seca es:

Ilustración 9.17 Tren de tratamiento de agua residual



$$W_{Lodo} = \left(\frac{0.83\ kg\ SST}{kg\ DBO\ removido}\right)\left(139\frac{mg}{L}\right)\left(139\frac{l}{s}\right)\left(86400\frac{s}{d}\right)\left(\frac{kg}{10^6\ mg}\right)$$

$$W_{Lodo} = 5\,981\ kg\ \ d^{-1}$$

Considerando una remoción de 80 por ciento SST en el sedimentador secundario, la producción de lodos es:

(5 981) (0.8)=4 785 kg d^{-1}

Producción total de lodos

4 044+4 785=8 830 kg d^{-1}

Aumento de la concentración de sólidos por adicion de cal para control de olor, 10 por ciento ST.

Producción total de lodo en base seca

4 044+4 785+883=9 712 kg d^{-1}=9.7 ton m^{-3}

Deshidratación de lodo

Después de la deshidratación el lodo tendrá 20 por ciento ST y 80 por ciento agua

Densidad aparente 1.00 ton m^{-3}

Cantidad de lodo para el composteo

(9.7 ton d^{-1})(100/20)=48.5 ton d^{-1} de lodo con 20 por ciento de ST.

V_{Lodo}= (48.5 ton d^{-1})(m^3/1.0 ton)= 48.5= 50 m^3 d^{-1}

Selección de materiales acondicionadores

Por la disponibilidad de materiales en los alrededores de la planta de tratamiento, de hojas y pedaceria de madera, se pretende utilizar estos materiales como materiales acondiconadores para la composta.

Las caracteristas del lodo y de los materiales acondiconadores se muestran en la Tabla 9.13 y Tabla 9.14 respectivamente.

Tabla 9.13 Características de los materiales para el composteo

Material	Densidad aparente ton m^{-3}	Sólidos totales (ST) por ciento	Sólidos volátiles (SV) por ciento	Biodegradabilidad (BD) por ciento
Lodo	0.98	20	60	50
Hojas de jardín	0.3	60	70	20
Madera	0.25	60	90	30

Tabla 9.14 Capacidad calorífica y relación C/N

Material	Capacidad calorífica kJ kg^{-1}	por ciento C	por ciento N	C/N
Lodo	**23 926**	**30**	**3**	**10**
Hojas de jardín	**5 600**	**50**	**1.95**	**22.8**
Madera	**16 250**	**80**	**0.5**	**160**

Balance de masa

Cálculo para el lodo.

- Base de cálculo 1 kg de lodo
- Sólidos totales (por ciento) ST_L =0.2
- Sólidos volátiles (por ciento) SV_L = 0.6
- Fracción biodegradable (por ciento) BD_L = 0.5
- W_L = peso de lodo = 1 kg
- Cálculo de sólidos volátiles biodegradables en el lodo ($SVB_{L)}$
- $SVB_L = (W_L)(ST_L)(SV_L)(BD_L)$
- SVB_L =(1)(0.2)(0.6)(0.5)=0.06 kg
- Cálculo de sólidos volátiles no biodegradables ($SVNB_L$)
- $SVNB_L = (W_L)(ST_L)(SV_L)(1- BD_L)$
- $SVNB_L$ =(1)(0.2)(0.6)(1-0.5) = 0.06 kg
- Cálculo de la cantidad de sólidos fijos o cenizas en el lodo.
- $SF_L = (W)(ST_L)(1- SV_L)= (1)(0.2)(1-0.6)= 0.08$ kg
- Cantidad de agua en el lodo
- Agua= $(W_L) - (ST_L)(W_L)= 1 - (0,2)(1.0) = =0.8$ kg

1 kilogramo de lodo proporciona:

Tabla 9.15 Proporción de agua y sólidos en 1 kilo de lodo

Agua	0.8 kg
SVB	0.06 kg
SVNB	0.06 kg
SF o Ceniza	0.08 kg

De igual forma se realiza el cálculo para los materiales acondicionadores.

Hojas

Base de cálculo 1 kilo de hojas

- Sólidos totales (por ciento) ST_H =0.6
- Sólidos volátiles (por ciento) SV_H = 0.7
- Fracción biodegradable (por ciento) BD_H = 0.2
- W_H = peso de las hojas = 1 kg
- Cálculo de sólidos volátiles biodegradables en las hojas.
- $SVB_H = (W_H)(ST_H)(SV_H)(BD_H)$
- SVB_H =(1)(0.6)(0.7)(0.2)=0.084 kg
- Cálculo de los sólidos volátiles no biodegradables en las hojas.
- $SVNB_H = (WT_H)(ST_H)(SV_H)(1- BD_H)$
- $SVNB_H$ =(1)(0.6)(0.7)(1-0.2) = 0.336 kg
- Cálculo de la cantidad de sólidos fijos o cenizas en las hojas.
- $SF_H = (W)(ST_H)(1- SV_H)= (1)(0.6)(1-0.7)= 0.18$ kg
- Cálculo de la cantidad de agua en las hojas.

- Agua= (W_H)–$(ST_H)(W_H)$= 1–(0.6)(1)= 0.40kg

1 kilogramo de hojas proporciona:

Tabla 9.16 Proporción de agua y sólidos en 1 kilo de hojas

Agua	0.4 kg
SVB	0.084 kg
SVNB	0.33 kg
SF ó Ceniza	0.15 kg

Madera

Base de cálculo 1 kilo de madera

- Sólidos totales (por ciento) ST_M =0.60
- Sólidos volátiles (por ciento)SV_M = 0.9
- Fracción biodegradable (por ciento) BD_M = 0.3
- W_M = peso de la madera = 1 kg
- Cálculo de sólidos volátiles biodegradables en la madera.
- $SVB_M = (W_M)(ST_M)(SV_M)(BD_M)$
- SVB_M =(1)(0.60)(0.9)(0.3)=0.162 kg
- Cálculo de sólidos volátiles no biodegradables en la madera.
- $SVNB_M = (W_M)(ST_M)(SV_M)(1- BD_M)$
- $SVNB_M$ =(1)(0.6)(0.9)(1-0.3) = 0.378 kg
- Cálculo de los sólidos fijos o cenizas en la madera
- SF_M= $(W_M)(ST_M)(1-SV_M)$= (1)(0.6)(1-0.9)= 0.06 kg
- Cálculo de la cantidad de agua en la madera
- Agua= (W_M)–$(ST_M)(W_M)$= 1–(0.6)(1)= 0.40kg

1 kilogramo de madera proporciona:

Tabla 9.17 Proporción de agua y sólidos en 1 kilo de madera

Agua	0.4 kg
SVB	0.162 kg
SVNB	0.378 kg
SF o Ceniza	0.06 kg

De acuerdo a las características de los materiales se realizará el balance de masa para tener en la mezcla un porcentaje de sólidos totales del 40 por ciento

Materiales requeridos para tratar 50 Toneladas por día de lodo con 20 por ciento de ST.

Se considera inicialmente utilizar las 50 toneladas de lodo y 5 toneladas de madera por dia y se calcula la cantidad de hojas de jardín que se requieren para tener una mezcla con 40 por ciento de ST

Cálculo de la cantidad de materiales por día

Lodo residual 50 ton
Pedacería de madera 5 toneladas por día.

Se realiza el balance de masa para calcular la cantidad hojas requeridas

Tabla 9.18 Cálculo de materiales requeridos por día

Materiales	Peso humedo (t)	%ST	Material seco (t)
Lodo	50	20	10
Hojas	X	60	0.6 X
Madera	5	60	3
Mezcla con 40 por ciento ST (∑)	55 +X	40	13 +0.5X

Cálculo de la cantidad de hojas para obtener una mezcla con 40 por ciento ST.

$$0.4\ (55+X) = 13 + 0.6\ X$$

Despejando X se obtiene la cantidad diaria de hojas.

X = 45 Toneladas de hojas por día.

Con esta cantidad de materiales se verifica si esta mezcla es suficiente para cumplir con la energía necesaria para elevar la temperatura del sistema al rango termofílico y evaporar el agua.

Balance de masa sin considerar reciclo

Para realizar el balance se hacen las siguientes suposiciones:

- La composta tendrá 60 por ciento de sólidos totales
- Durante el composteo, la mezcla tendrá una reducción del 100 por ciento de los sólidos volátiles biodegradables
- Se considera que las hojas tendrán el 83 por ciento de los SVB disponibles inicialmente. Es decir 0.07 toneladas por tonelada de hojas 45 × 0.07=3.15 ton SVB
- Cantidad de composta como material seco = Material seco en la mezcla – reducción SVB
- Cantidad de composta como material seco = 40 – 6.96 = 33.04 t
- Cantidad de composta húmeda (60 por ciento de sólidos totales) = 33.04 X 100/60 = 55 t
- Cantidad de agua en la composta = 55 – 33 = 22 t
- Cantidad de agua que debe evaporarse en el proceso = 60 – 22 = 38 t

Balance de energía:

1° Método

La energía del sistema o energía disponible la proporcionan los sólidos volátiles biodegradables presentes en la mezcla multiplicada por la capacidad calorífica de cada componente.

- Energía requerida para evaporar el agua
- Cantidad de agua evaporada X calor latente de vaporización del agua a 50°C
- Calor latente de vaporización del agua Ha= 2 675 kJ kg^{-1}
- Energía requerida = 38 t × 2 675 kJ kg^{-1} ×10^3 kg ton^{-1} = 101 650 × 10^3 kJ

La energía disponible es suficiente en el sistema ya que es mayor que la energía requerida para evaporar el agua.

Tabla 9.19 Balance de masa por día

Materiales	Material Húmedo (t)	Densidad aparente (t m^{-3})	Volumen (m^3)	Sólidos Totales %	Material seco (t d^{-1})	SVB (t d^{-1})	Agua (t d^{-1})
Lodo	50	1.0	50	20	10	3	40
Hojas	45	0.3	150	50	22.5	3.15	22.5
Madera	5	0.25	20	60	3	0.81	2
Mezcla en composteo	100	0.45	220	40	40	6.96	64.5
Composta	55			60	33.04	------	22
Agua evaporada en el proceso							42.5

2do Método:

W = Peso del agua/ SVB = 38/ 6.96 = 5.5 como esta relación es menor de 10 se considera satisfactoria

Relación de energía

E=Calor liberado/ Peso del agua = 112 008 × 10^3 kJ/38 000 kg de agua = 2 947 kJ kg^{-1}. Esta relación es mayor de 542 kJ kg^{-1}. La relación se puede considerar satisfactoria ya que contiene la energía requerida por el sistema para elevar la temperatura y evaporar el agua.

Relación carbón/nitrógeno

La relación carbono/nitrógeno se calcula de acuerdo a la Ecuación 9.8 y considerando la cantidad de nitrógeno y fósforo de cada uno de los materiales que aparecen en la (Tabla 9.14).

C/N mezcla = (50) (0.2) (30) + 45(0.5) (50)+5(0.60)(80)/(50)(0.2)(3)+(45) (0.5)(1.95) + (5(60)(0.5)

C/N mezcla = 300+1125+240/ 30+43.8+1.5 = 1 665/ 75.3

C/N mezcla = 22.1

La relación carbón/nitrógeno se encuentra dentro de la relación recomendada. Se puede considerar que esta mezcla es adecuada para el composteo.

Ya definidos los materiales y la proporción en que van a mezclarse, se realiza el balance diario de manejo de materiales. Para este ejemplo, el balance se muestra en la Tabla 9.21.

Tabla 9.20 Energía disponible en el sistema

Material	SVB (t)	Capacidad calorífica (kJ kg^{-1})	Energía disponible (kJ)
Lodo	3	23926	71778 $X10^3$
Hojas	3.15	7500	23625 $x10^3$
Madera	0.81	20500	16605 $x10^3$
Total			112008 $x10^3$

Tabla 9.21 Manejo diario de materiales

N° Corriente	Materiales	Material Húmedo ton	Densidad aparente ton·m^{-3}	Sólidos Totales %	Material seco ton·d^{-1}	SVB ton·d^{-1}	Agua ton·d^{-1}	Volumen m^3
1	Lodo	50	1	20	10	3	40	50
2	Hojas	45	0.3	60	27	3.15	18	150
3	Madera	5	0.25	60	3	0.81	2	20
4	Mezclado	100	0.45	40	40	6.96	60	220
5	Cubierta	8.1	0.3	60	4.86			27
6	Base	10.8	0.3	60	6.48			36
7	Composteo (Mezcla +cubierta+base)	118.9				6.96	60	283
8	Pérdidas en composteo					6.96	25.3	
9	Composta a Curado	67.7	0.36	60	33	------	34.7	187.7
10	Pérdidas en curado						12.7	
11	Cribado o tamizado	55	0.314	60	33		22	175
12	Composta tamizada	37	0.32	60	22.2		14.8	115
13	Material grueso para cubierta y base	18	0.30	60	10.8		7.2	60
14	Composta para cubierta y base	0.96	0.32	60	0.576			3
15	Composta a almacén	35.84	0.32	60	21.5			112

9.5.2. Áreas de un sistema de composteo

9.5.2.1. Cálculo del área para composteo

Tabla 9.22 Cálculo del área de composteo

Tiempo requerido para el composteo será de 24 dias y se tendrán 24 pilas. Cada una manejara la producción diaria de lodos.

Peso = 100 t

V = 220 m^3

Dimensiones.

h = alto = 2.5 m

b = base = 6.0 m

L= largo= 30 m

Tabla 9.22 Cálculo del área de composteo (continuación)

$$V = \frac{b \times h}{2} \times largo$$

$$V = \frac{6.0 \times 2.5}{2} \times largo$$

$$L = \frac{220}{7.5} = 29.3 = 30\ m$$

Corrección de volumen

$$V = \frac{2.5 \times 6}{2} \times 30 = 225\ m^3$$

Volumen de materiales para cubierta y base de 30 cm a 20 cm

Volumen base = 6 x 30 x 0.30 =36 m^3

Volumen cubierta = $\frac{H1}{H2} = \frac{V1}{V2}$

$$\frac{2.5}{0.30} = \frac{225}{V_2}$$

$$V_2 = \frac{225 \times 0.30}{2.5} = 27 m^3$$

Área de composteo

24 pilas con las siguientes dimensiones

h= 2.5 m

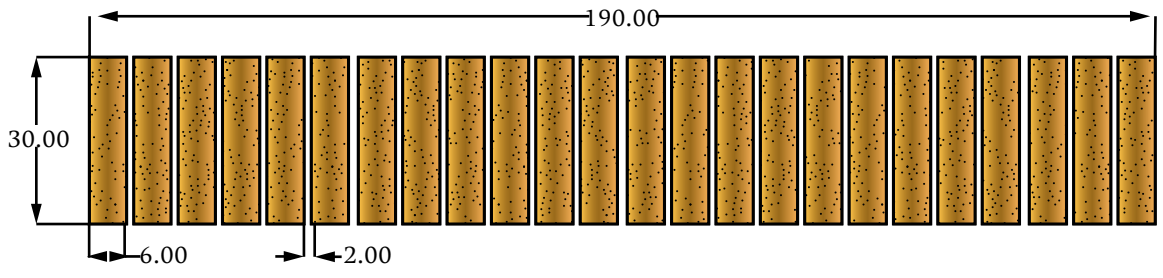
b=6.00 m

L= 30 m

Area requerida de las pilas = 24 (6m × 30 m) = 4320 m^2

Area calculada de las pilas con separación de 2 m entre ellas = (24)(6 ×30)+ 24 (2 × 30)= 5760 m^2

Ilustración 9.18 Esquema del área requerida para pilas de composteo



9.5.2.2. Cálculo del área de curado

Tabla 9.23 Cálculo del área de curado

Tiempo requerido para el curado será de 30 días y se tendrán 30 pilas, cada pila manejará la producción diaria de lodos.

Peso = 67.7 t

V = 187.7 m^3

Dimensiones.

h = alto = 2.5 m

b = base = 6.0 m

$$V = \frac{h \times b}{2} \times largo$$

$$L = \frac{187.7}{7.5} = 25$$

$$V = \frac{2.5 \times 6}{2} \times 25 = 187.5$$

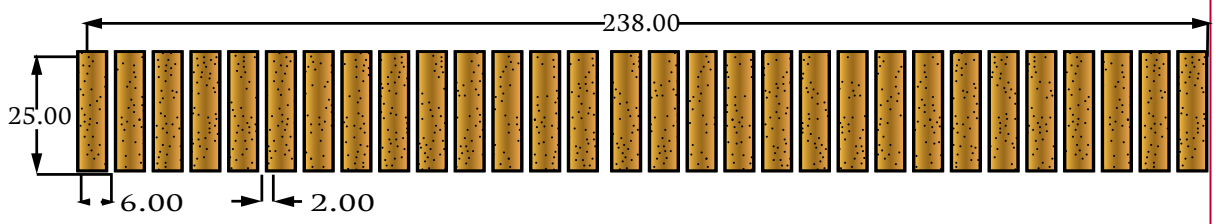
Área de las pilas con separación de 2 m. entre ellas

$$Area\ de\ pilas\ requerida = (6\ m \times 25\ \ m)(30\ pilas) = 4\ 500$$

$$Área\ de\ separación\ entre\ pila\ y\ pila = (2\ m \times 25\ m)(30) = 1\ 500$$

Area total calculada = 4500 + 1500 = 6000 m^2

Ilustración 9.19 Esquema del área requerida para pilas de curado



9.5.2.3. Cálculo del área de almacenamiento de composta

Tabla 9.24 Cálculo para el área de almacenamiento de la composta

Tiempo requerido para el almacenamiento de la composta será de 7 dias y se tendrán 2 pilas. Cada una manejará la producción diaria de composta

Peso = 35.84 t

V = 112 m^3

Dimensiones.

h = alto = 2.5 m

b = base = 6.0 m

L= largo= 15 m

$$V = \frac{b \times h}{2} \times largo$$

$$V = \frac{6.0 \times 2.5}{2} \times largo$$

$$L = \frac{112}{7.5} = 15$$

Corrección de volumen

$$V = \frac{2.5 \times 6}{2} \times 15 = 112.5\, m^3$$

Área de almacenamiento de la composta

2 pilas con las siguientes dimensiones

h= 2.5 m

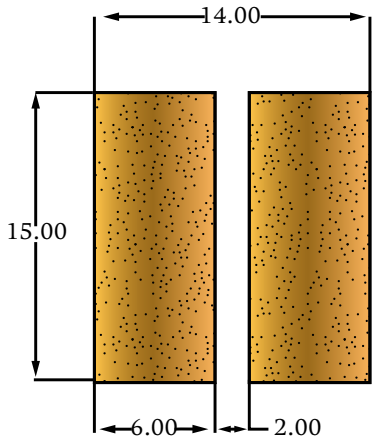
b=6.00 m

L= 15 m

Área requerida de las pilas = 2 (6m × 15 m) = 180 m^2

Área calculada de las pilas con separación de 2 m entre ellas = (2)(6 ×15)+ 2 (2 × 15)= 240 m^2

Ilustración 9.20 Esquema del área requerida para el almacenamiento de la composta



9.5.2.4. Cálculo de área para almacenamiento de materiales acondicionadores

Tabla 9.25 Cálculo del área de materiales acondicionadores para 7 dias

Hojas de jardín

Tiempo de almacenamiento de materiales acondicionadores será de 7 días y serán 4 pilas cónicas de 13 m de base y 3 m de altura.

Dimensiones

h= alto= 3 m

b= base= 13 m

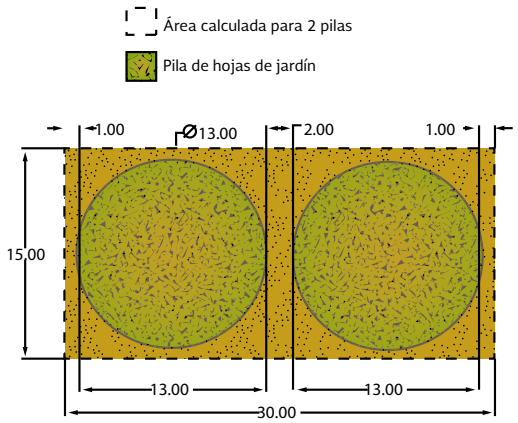
Área requerida por pila = Pi r^2

Área requerida por pila = (3.1416) $(6.5)^2$ = 132.8m^2

Área requerida por 4 pilas = (132.8)(4)=531.2 m^2

Área total calculada= (30 m × 15 m)(2) =900 m^2

Ilustración 9.21 Esquema del área requerida para 2 pilas de hoja de jardín



Pedacería de madera para 7 días

(20 m^3 d^{-1})(7 días) = 140 m^3

b= Base = 6 m

h=Altura = 2.5 m

$$A = \frac{b \times h}{2} = \frac{6 \times 2.5}{2} = 7.5\ m^2$$

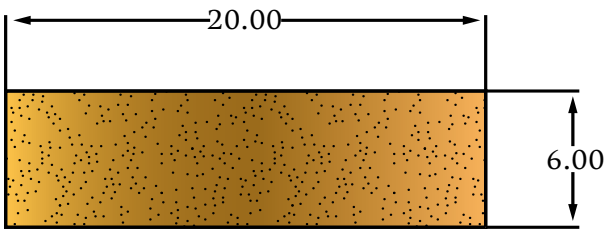
Longitud.

$$L = \frac{V}{A} = \frac{140\ m^3}{7.5\ m^2} = 18.7 m$$

Area requerida para pedaceria de madera = (20 m) (6 m)= 120 m^2

Tabla 9.25 Cálculo del área de materiales acondicionadores para 7 dias (continuación)

Ilustración 9.22 Esquema del área requerida para pedaceria de madera



Área total calculada para almacenamiento de materiales = 900 m² +120 m² = 1 020 m²

Tabla 9.26 Áreas requeridas para el sistema de composteo

Etapas de composteo	Área requerida (m²)	Área calculada(m²)
Mezclado	50	50
Composteo	4 320	5 760
Curado	4 500	6 000
Cribado	25	25
Almacenamiento de lodos de composta	180	240
Materiales acondicionadores	1 020	1 020
Área total	10 095	13 095

Distribución de las áreas del sistema

El sistema de composteo requiere un área neta de 13 095 m². Además de estas áreas se deben considerar vías de acceso, oficinas, áreas verdes, etcétera.

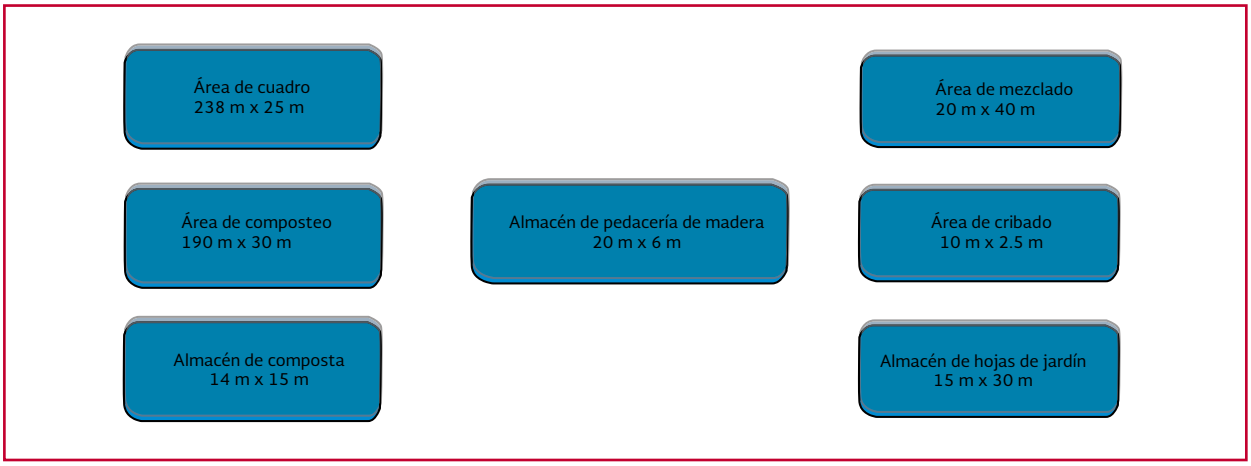
La distribución de las áreas se debe hacer para minimizar los tiempos y movimientos de la maquinaria. Las operaciones que requieren del cargador frontal se encuentran una a continuación de otra y en forma secuencial. Las áreas de almacenamiento de hojas de jardín, pedacería de madera y composta se encuentran en los extremos para facilitar el acceso del camión y la carga o descarga del mismo. En la Ilustración 9.23 se puede apreciar la distribución.

Sistema de aeración

El sistema de aeración estará formado por ventiladores que inyectarán el aire a una serie de canales de concreto o tuberías de PVC. Se recomienda utilizar tuberías de PVC de 150 mm de diámetro (6”), sobre los cuales se colocarán las mezclas en composteo. En las Ilustraciones 9.24 a 9.27 se muestra la forma de colocar las tuberías o los canales de concreto y en la Tabla 9.10 las recomendaciones para las perforaciones de las tuberías y canales.

Los cálculos de la capacidad de los ventiladores y del área transversal requerida para la inyección de aire se muestran a continuación:

Ilustración 9.23 Dimensiones de las áreas del sistema de composteo



Capacidad del equipo de ventilación

Para un sistema de composteo se requiere:

100 m^3 de aire / h / t de lodo seco
(3 500 pies cúbicos / h / t)

Número de tonelada / día

10 toneladas de sólidos secos / d

Cada ventilador proporciona aire a una pila que contiene el lodo producido en un día

10 t / d × 100 m^3 / h / t = 1000 m^3 h^{-1} a condiciones estándar. Se debe hacer la corrección dependiendo del lugar donde estará situado el sistema de composteo.

Se requieren 1 000 m^3 de aire a condiciones estándar por hora para cada pila en composteo. El número de ventiladores por pila dependerá del diseño del sistema de inyección de aire.

Cálculo del área transversal requerida para la inyección de aire a la pila.

Para la inyección del aire a la pila se recomienda una velocidad de
2 250 m h^{-1}, (1 500 pies min^{-1})

Cálculo del Área Transversal

Volumen de aire = 1000 m^3 h^{-1}.
Velocidad del aire = 2250 m h^{-1}
= 42.5 m min^{-1}
Flujo de aire = Área × velocidad
Área transversal para la inyección
= Volumen/velocidad
= 1 000 m^3 h^{-1} / 2 250 m h^{-1} = 0.44 m^2

Para la inyección de aire se requiere tener un área transversal de 0.44 m^2. Esta área puede obtenerse utilizando tuberías de PVC o canales de concreto como se observa en las ilustraciones 9.25, 9.26 y 9.27. El largo del canal o de la tubería es igual al largo de la pila de composteo.

Ilustración 9.24 Tubería enterrada en el fondo de la zanja con difusores para la inyección de aire

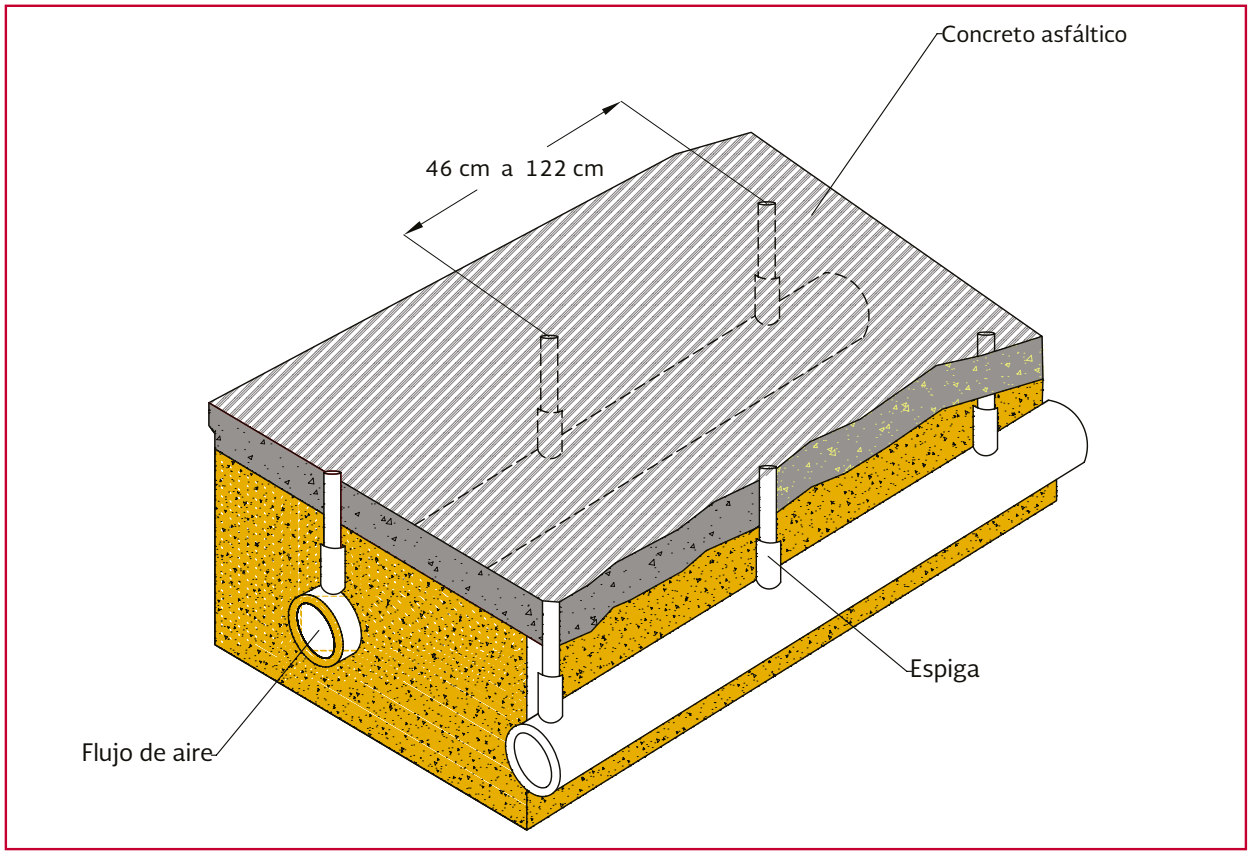


Ilustración 9.25 Tuberías perforadas sobre la base de concreto

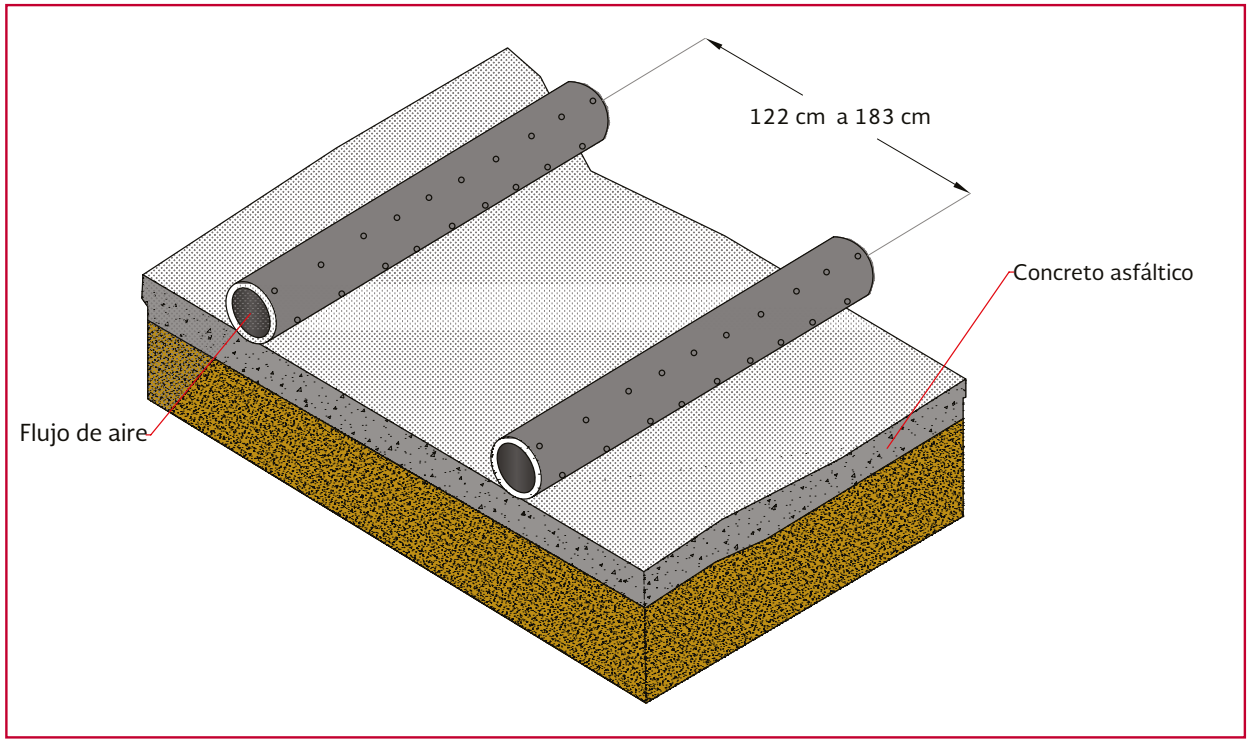


Ilustración 9.26 Tuberías enterradas y perforadas en la base de concreto

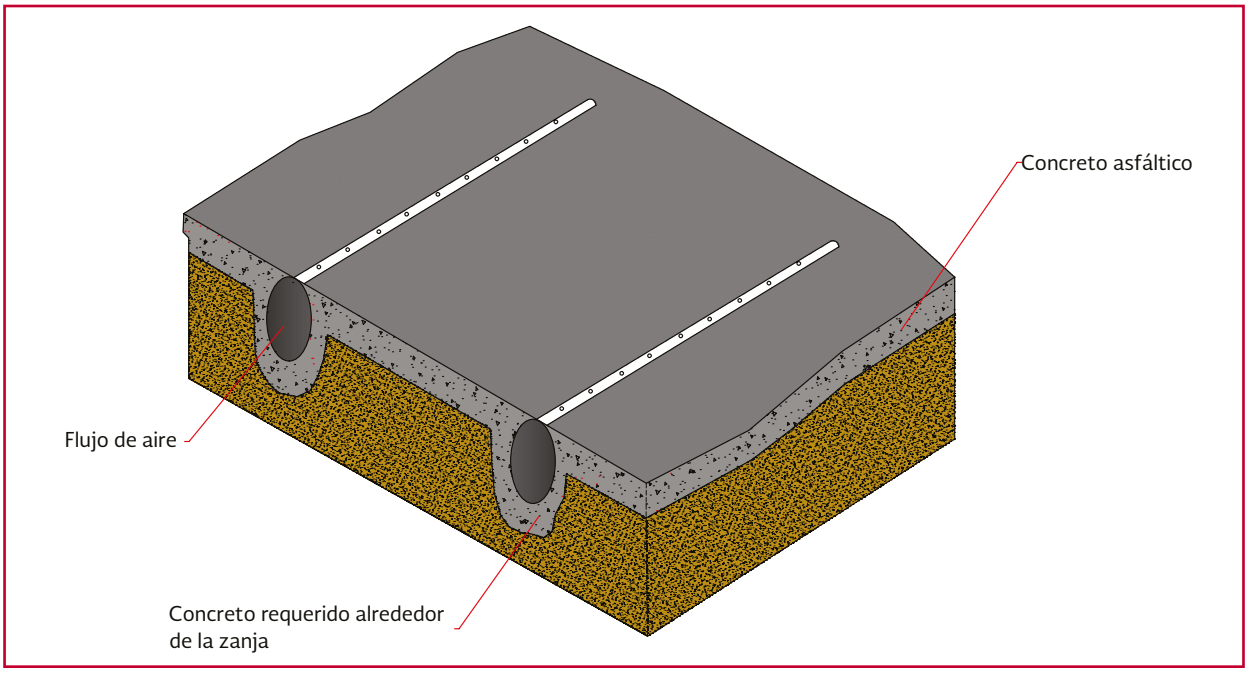
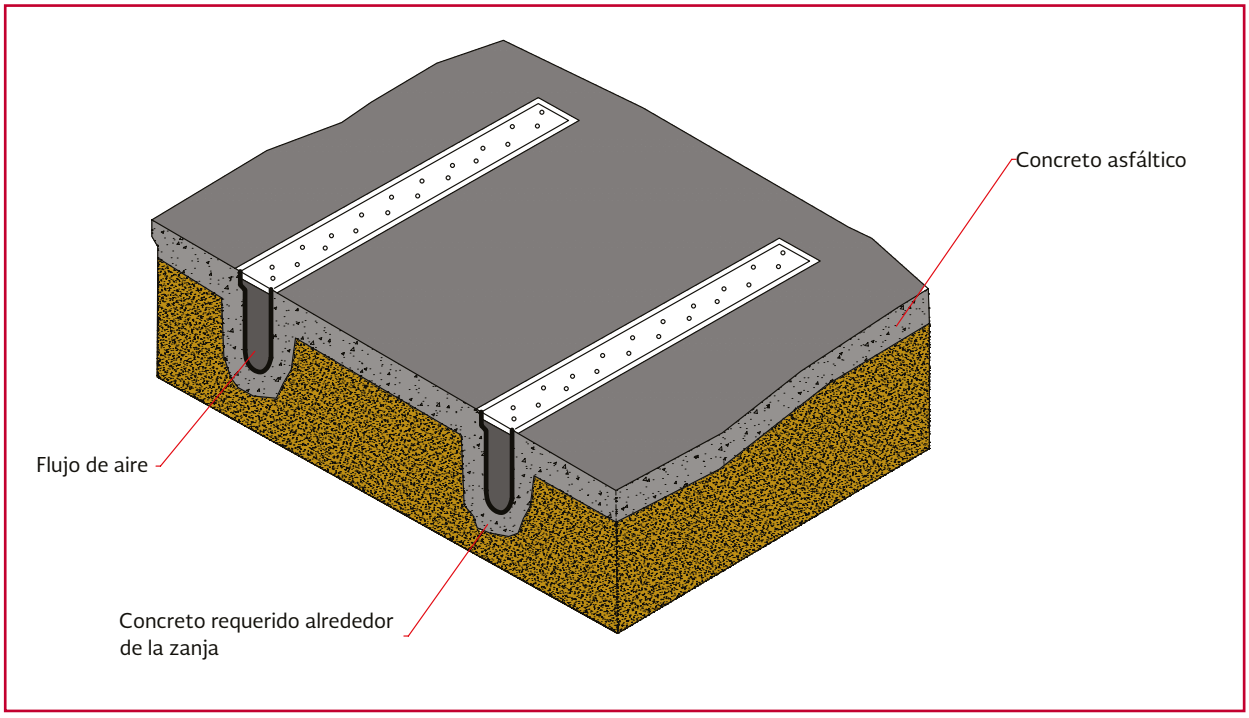


Ilustración 9.27 Canales perforados



10

Estabilización de lodos por Vermicomposteo

10.1. Introducción

En México, los principales sistemas de tratamiento de agua residual son convencionales. Estos sistemas tienen como residuo un lodo en el que se concentran los contaminantes removidos como patógenos, metales pesados y tóxicos orgánicos. En muchas plantas pequeñas de tratamiento no se cuenta con los recursos financieros para resolver el problema de estabilización y reducción de contaminantes simultáneamente en estos lodos, para lograr una disposición segura, por lo que se requiere de una tecnología sencilla y económica.

Para resolver simultáneamente el problema de una estabilización adicional del lodo y reducción de patógenos se ha desarrollado una tecnología innovativa y ecológica que es el vermicomposteo para la biodegradación de los residuos sólidos municipales. El vermicomposteo consiste en la estabilización de la materia orgánica por medio de lombrices y microorganismos, mediante este proceso se generan biosólidos estabilizados con gran valor como acondicionadores de suelo, que contienen nutrientes y micro nutrimentos. Las lombrices que permanecen trabajando en los lechos no requieren de una operación y mantenimiento continuos, la población se mantiene auto regulada y se incrementa en la medida de que hay espacio y alimento disponible. El vermicomposteo no demanda una labor intensiva en el registro de parámetros de control del proceso como son temperatura, humedad y pH.

Por otra parte, la necesidad de abonos para la agricultura y el cultivo de plantas de ornato se incrementan. La vermicomposta se caracteriza por un elevado contenido de materia orgánica, su aprovechamiento ayudaría a sustituir el uso de los suelos forestales que actualmente son explotados.

Este capítulo pretende dar una panorámica general de esta tecnología por lo que se inicia por los antecedentes históricos de la tecnología; una perspectiva ecológica de las lombrices como formadoras del suelo y transformadoras de residuos orgánicos; información de la biología de una de las especies de lombrices más usada; la descripción del proceso de vermicomposteo desde un punto de vista tecnológico: etapas del proceso, áreas requeridas, equipo, criterios de diseño, parámetros de control del proceso, alimentación, cosecha de lombriz, instalaciones; características y aprovechamiento; control de las enfermedades de las lombrices; estudios de caso de sistemas de vermicomposteo y conclusiones.

10.2. Objetivos de la tecnología

Alcanzar la reducción de patógenos y producir un biosólido con calidad agrícola para ser usado como abono orgánico.

Proporcionar una alternativa tecnológica para la estabilización y reducción de patógenos en lodos de plantas pequeñas de tratamiento de aguas residuales.

10.3. Historia del vermicomposteo de lodos residuales

10.3.1. Las lombrices de tierra a través de la historia de la humanidad

Históricamente se ha reconocido el papel de la lombriz en la fertilidad de los suelos. Los sumerios 3 500 A. C. eran expertos agricultores y relacionaban la calidad de los suelos agrícolas por la densidad de la población de lombrices que encontraban al hacer un foso en la tierra, Cueva y Salazar, 2000. Los egipcios y los romanos consideraban a las lombrices como el animal ecológico por excelencia y utilizaban el compuesto generado por las lombrices. Un edicto promulgado por un faraón del antiguo Egipto, protegía a las lombrices, previendo penas muy graves para las personas que intentaran llevárselas para utilizarlas en otros territorios. Se consideraba que la fertilidad del valle del río Nilo se debía, en parte, a la actividad de las lombrices, que reciclaban los nutrientes y los dejaban disponibles para los cultivos anuales, Salazar, 2001. Los Incas en el antiguo Perú, apreciaban la importancia de la lombriz con respecto a los cultivos; uno de los valles más sagrados para los Incas fue Urumba que significa Urur lombriz y bamba valle, Valle de la Lombriz, Pineda, 2006. En la antigua Grecia, Aristóteles (384-322 a. C.), en su estudio Historia Animalum, la cual constituye la primera clasificación taxonómica de los seres vivos, escribe que las lombrices son los intestinos de la tierra y que contribuían con su actividad a su productividad, (Cueva & Salazar, 2000).

Carlos Linneo (1700 a 1778), habla acerca de las lombrices en su obra Lumbricus terrestris, desde un punto de vista taxonómico. Sir Gilbert White, estudio las lombrices y dijo acerca de éstas que aun cuando en apariencia eran pequeñas dentro de la cadena alimenticia, sino existieran, habría un lamentable pérdida. Las lombrices son grandes promotoras de la vegetación, (1770). En 1775, Sir Gilbert White, demostró que en 4 o 5 años estos animales eran capaces de pasar por sus intestinos la mayor parte de la capa arable de la tierra, (Cueva & Salazar, 2000). En Charles Darwin (1809-1882) además de sus estudios sobre la evolución de las especias, se interesó por las lombrices por lo que escribió el libro "The formation of vegetable mould, through the action of worms, with observations on their habits. Darwin indica: "el arado es una de las más antiguas y útiles invenciones del hombre, pero mucho antes de que él existiera, la tierra era arada regular y continuamente por las lombrices. Probablemente el hombre; reconocerá un día la gigantesca obra que realiza estos anélidos". La importancia de los conocimientos de Darwin radica en el estudio profundo de la biología de la lombriz, sus hábitos y hábitat, además del método de investigación llevado a cabo. Todo lo anterior le ha merecido al famoso sabio ser considerado como el padre de la lombricultura, (Salazar, 2001).

George Sheffield en 1 900 continúo los estudios científicos de Charles Darwin. Logró relacionar la fertilidad de un huerto con la presencia de las lombrices y describió sus conocimientos en su libro: Nuestra amiga la lombriz. En 1930 Tomas Barret en California, en Estados Unidos de América, inició los primeros trabajos para domesticar lombrices de tierra, llegando a cifras de 3 000 por m^2.

Posteriormente a estos esfuerzos se ha conseguido llegar a poblaciones de más de 30 000 individuos por metro cuadrado, (Cueva & Salazar, 2000).

10.3.2. Historia del vermicomposteo de lodos residuales

Los primeros estudios acerca de la conversión de lodos a vermicomposta fueron llevados a cabo por (Mitchell, *et al.*, 1977) y (Mitchell, S.G., & B.I., 1980), investigaron el papel de Eisenia foetida, en la descomposición del lodo residual en los lechos de secado. Mediante un índice del consumo de oxígeno y la evolución del dióxido de carbono y metano, asimismo para saber cómo E. foetida puede alterar la forma y porcentaje de descomposición y la relación entre la biota específica y los componentes abióticos de la descomposición. En las dos plantas muestreadas las bacterias aerobias y anaerobias fueron abundantes y las bacterias dominantes no fueron entéricas, esto significa que se redujo la contaminación fecal, no se menciona el tipo de bacterias no entéricas encontradas. Se utilizó un modelo de simulación para evaluar el papel de la descomposición de macro - invertebrados en la descomposición del suelo.

En 1979, Hartenstein, reportó los parámetros metabólicos de E. foetida en relación con la temperatura y el uso potencial del manejo del estiércol como una fuente de proteínas.

En agosto de 1980, Camp, Dresser and McKee, Inc., Boston, MA, USA, llevaron a cabo un estudio para demostrar la factibilidad técnica y económica del proceso de vermiestabilización en varios estudios piloto. El estudio económico fue basado en el examen de las plantas de tratamiento y los costos para la operación de estas plantas que tratan el efluente de 50 mil personas y una comunidad de cerca de 500 mil personas. La vermiestabilización se comparó con otros tres métodos de lodos: relleno sanitario, composteo en camellón e incineración. Se estimó que el costo de la vermiestabilización era de $24.0 a $32.0 dólares americanos por tonelada de residuo procesado.

En 1981, Hornor y Mitchell, estudiaron los efectos de Eisenia foetida en los flujos del carbono volátil y de los compuestos de sulfuro de los lodos residuales, y Hartenstein, 1981, sugirió el uso de las lombrices como una solución para el manejo de lodos residuales. En sus estudios se seleccionaron dos especies E. eugeniae y E. foetida, debido a su alta tasa de reproducción y fácil manejo en condiciones de explotación a gran escala. Las principales observaciones del estudio fueron las siguientes: 1) la toxicidad de las heces fecales de las lombrices para ellas mismas significa la necesidad de retener E. foetida en la capa de lodo tanto tiempo como el requerido para convertir el lodo en vermicomposta, 2) el conocimiento de la cantidad del material que pasa a través del tubo digestivo de la lombriz por unidad de tiempo, para un determinado tipo de lodo, permite la predicción de la cantidad de lodo que se puede tratar por unidad de tiempo, y 3) E. foetida pierde y gana peso rápidamente, sobre un ilimitado suministro de materiales orgánicos.

En 1982, Collier y Livingstone, llevaron un estudio de factibilidad en las plantas de San José y Santa Clara de California, USA, utilizaron E. foetida. Se produjeron noventa toneladas de vermicomposta en un periodo de cinco años. Se instalaron camellones de diferente tamaño con diferentes densidades de lombriz. La vermicomposta se recogió mediante una cribadora rotatoria

que ayudaba a separar la lombriz del sustrato. El análisis de costo demostró que el sistema tiene un costo de $29.45 USD por tonelada seca con una producción de 10 toneladas de vermicomposta.

En 1983, Chosson y Dupuy, concluyeron sus estudios sobre la actividad celulolítica de bacterias aerobias presentes en el tubo digestivo de las lombrices.

(Hartenstein, D.L., & E.F., 1984), estudió en filtros biológicos la aplicación potencial de lombrices acuáticas de la especie Lumbrículus variegatus para la reducción y estabilización de sólidos en el tratamiento de agua y lodos residuales.

En 1984, Loehr et al, presentaron los resultados de una investigación del proceso de vermiestabilización en los que se había utilizado lodos residuales estabilizados y no estabilizados. Se evaluaron cuatro especies de lombriz: E. foetida, E. eugeniae, P. hawaiana y P. excavatus. La especie E. foetida resultó con la mayor capacidad reproductiva. El mejor crecimiento de E. foetida, en cuanto a peso ganado ocurrió al utilizar un lodo que tuvo un contenido total de sólidos, con una base húmeda entre 9 y 17 por ciento. El mejor crecimiento y producción de huevos para las especies de lombrices ocurrió con una temperatura de 20 a 25 ºC. Con lodos líquidos y deshidratados, la vermiestabilización fue exitosa por largos periodos de tiempo: más de un año para lodo deshidratado y por lo menos seis meses para lodos líquidos. Los costos estimados indican que los costos de inversión y anuales de la vermiestabilización de lodo líquido son competitivos con respecto a otros sistemas de manejo de lodo.

En 1985, Loehr et al., evaluaron diferentes factores fundamentales que afectan el proceso de vermiestabilización tales como la temperatura, contenido de humedad y el uso combinado de diferentes especies de lombrices (policultivo). Se usaron las siguientes especies: Dendrobaena veneta, E. foetida, Eudrilus eugeniae, Perionyx excavatus y Pheretima hawaiana. El mejor crecimiento y reproducción ocurrió a temperaturas de 20 a 25 ºC. El crecimiento de todas las especies se redujo a 30 ºC y la muerte ocurrió a 35 ºC. De las cinco especies, E. foetida produjo el mayor número de individuos juveniles en veinte semanas del estudio. El crecimiento de E. foetida ocurrió de manera óptima con un lodo con un contenido total de sólidos, base húmeda, de 9 a 16 por ciento. El policultivo no tuvo ninguna ventaja sobre el monocultivo.

Loehr et al, 1985, llevaron a cabo más estudios para identificar los factores fundamentales que afectan el proceso y determinar la relación entre el diseño y manejo del sistema. Las lombrices fueron el factor clave en la estabilización del lodo líquido. La estabilización no se llevaba a cabo en los reactores que no contenían lombrices. La oxidación del nitrógeno en el drenaje de los reactores indicó que las condiciones aerobias se mantuvieron. Concluyeron que el proceso de vermiestabilización se puede lograr en el lodo líquido primario y el lodo deshidratado. Los balances de humedad indicaron que hubo una pérdida de humedad de 4 por ciento a 20 por ciento. El lodo primario se estabilizó en la misma forma que el lodo líquido aerobio. El contenido total de sólidos en los reactores de vermiestabilización tuvo un incremento del 0.6 por ciento al 1.3 por ciento. Por lo tanto el proceso de vermiestabilización es a la vez útil para la deshidratación y la estabilización de lodos. El análisis de costos que se incluyó en el estudio indica que el proceso de vermiestabilización es un proceso económicamente factible para su manejo.

En 1986, Stafford y Edwards, de la Estación Experimental de Rothamsted, en Inglaterra usa-

ron lombrices para indicar el nivel de contaminación de los suelos en condiciones de campo y laboratorio.

Por otra parte E. foetida es conocida por contener enzimas bactericidas. (Amaravadi, M.S., & R.F. , 1990), probaron la actividad viricida de E. foetida usando los virus Cowpea (CPMV) y del tabaco (TMV). Las lombrices fueron alimentadas con celulosa saturada con una suspensión de virus y sus excretas fueron analizadas para determinar las proteínas intactas del virus usando el método de ELISA y la infectividad del virus por medio de ensayos locales. Los resultados indicaron una considerable reducción en la infectividad de ambos virus. La actividad viricida fue también observada cuando la suspensión de virus fue incubada con el extracto de enzima de las lombrices y analizada mediante el método de lesión local. La reducción observada en la infectividad de los virus sugiere que E. foetida podría poseer un sistema enzimático viricida, lo que puede contribuir a la inactivación de virus patogénicos asociados potencialmente con la aplicación de lodos residuales y estiércoles en suelos agrícolas.

(Eastman, 1999) y (Eastman Bruce, *et al.*, 2001), llevaron a cabo un estudio de campo para demostrar la factibilidad del vermicomposteo como un método para la eliminación de patógenos para obtener biosólidos de Clase A de acuerdo a la normatividad americana (USEPA, 1994, CFR, 1). El sitio experimental estuvo ubicado en las instalaciones de la planta de tratamiento de la Ciudad de Ocoee en Florida. La metodología experimental consistió en inocular dos camellones de 6 m de largo, en los cuales se inocularon con cuatro indicadores de patógenos humanos: coliformes fecales, Salmonella, sp., virus entéricos y huevos de helminto. Uno de los camellones se sembraron con lombrices de la especie Eisenia foetida, con una relación de densidad de 1:1.5 de peso húmedo de biomasa por lodo, para permitir el consumo y estabilización del lodo. Los resultados indicaron que todos los indicadores de patógenos en el camellón con lombrices disminuyeron más que el camellón control en un periodo de 144 horas (6.4 log en coliformes fecales, 8.6 log en Salmonella, spp., 4.6 log en virus entéricos y 1.9 log en huevos de helminto. De acuerdo a los criterios establecidos por la USEPA de una reducción de tres a cuatro partes de organismos indicadores podría ser suficiente para garantizar al vermicomposteo como una metodología de estabilización. Estos resultados indican que el vermicomposteo es un método que puede ser usado como una alternativa para obtener biosólidos estabilizados de Clase A. En la Tabla 10.1 se observa la reducción de patógenos durante el proceso de vermicomposteo.

En la Ilustración 10.1, se observa la inspección de un sistema de vermicomposteo por el Dr. Eastman.

Tabla 10.1 Reducción de patógenos durante el vermicomposteo en un sistema a escala real. Eastman, (1999)

Patógenos	Tiempo	Tratamiento 1		Tratamiento 2	
		Concentración inicial	Porcentaje de reducción	Concentración inicial	Porcentaje de reducción
Coliformes fecales	24	8.5×10^9 NMP/1 g	98.7	8.3×10^9 NMP/1 g	20.0
Huevos de helminto viables	144	8.26×10^5 huevos	98.87	8.41×10^5 huevos	74.24
Virus entéricos	24	1.97×10^5 UFC/4 g	98.92	1.73 × 105 UFC/4 g	53.8
Salmonella, sp.	24	4.6×10^9 células/25 ml	99.99	8.5×10^9 células/25 ml	93.18

Ilustración 10.1 Inspección sistema de vermicomposteo

En julio de 2004, se pusieron en operación las primeras instalaciones a escala real de vermicomposteo en una planta de una población pequeña de Estados Unidos en Granville Township Sewer y Water, Pensilvania. Esta planta daba servicio a 4 895 habitantes. En esta planta el lodo era dispuesto en un relleno sanitario, el cual fue cerrado después de un tiempo, por lo que buscaron una alternativa que les permitiera solucionar su problema de disposición y reciclar los Biosólidos. Los objetivos de esta nueva tecnología involucraron el deseo de la población de reciclar, elaborar un producto con valor comercial, usar una tecnología con bajo impacto ambiental, de bajo costo, que no produjera ruidos, ni olores, que fuera innovativa, que sirviera de ejemplo a otras comunidades, que difundiera entre la comunidad, principalmente en los jóvenes los conceptos de reciclo mediante las visitas a sus instalaciones, que fomentara la unidad entre autoridades y pobladores al tener objetivos en común, por lo que seleccionaron el vermicomposteo de los lodos, cerca de 500 toneladas al año, de lodo estabilizado aeróbicamente. La ciudad de Granville logró vender la vermicomposta a $100 USD por tonelada, a la fecha logran vender 20 toneladas de producto como corrector de suelos. El sistema de vermicomposteo cumple con los requerimientos para obtener un lodo de Calidad Excepcional (Clase A). El costo directo del proyecto fue igual a otras tecnologías, sin embargo ellos esperan que los costos de tratamiento se compensen con la venta del producto y además se crearon fuentes de trabajo. No obstante los beneficios ecológicos son más grandes ya que les permitió procesar el 100 por ciento del lodo, evitando problemas de contaminación; el consumo de energía eléctrica del vermicomposteo es mínimo; estudios universitarios les mostraron que el proceso redujo las emisiones de gases con efecto invernadero arriba de 45 por ciento sobre las prácticas anteriores de relleno sanitario; no se producen olores, polvo, ruido o lixiviado, no requieren el transporte del lodo. El proceso reduce el volumen del material en 40 por ciento. Las lecciones aprendidas para esta

comunidad fueron: oportunidad de hacer la diferencia en el interés en la comunidad sobre el ambiente, ser un ejemplo de cómo las soluciones locales pueden resolver problemas locales, saber que los sistemas naturales, con base a tecnología sencilla y de bajo impacto ofrecen soluciones para la comunidad, más específicamente los residentes de Granville obtuvieron un tratamiento y reciclo para sus Biosólidos y los costos se compensaran parcialmente con la venta del producto final, su intención es reducir los costos permanentemente, (USEPA, 2006).

10.4. Bases teóricas

10.4.1. Las lombrices como transformadoras de suelo y transformadoras de residuos orgánicos

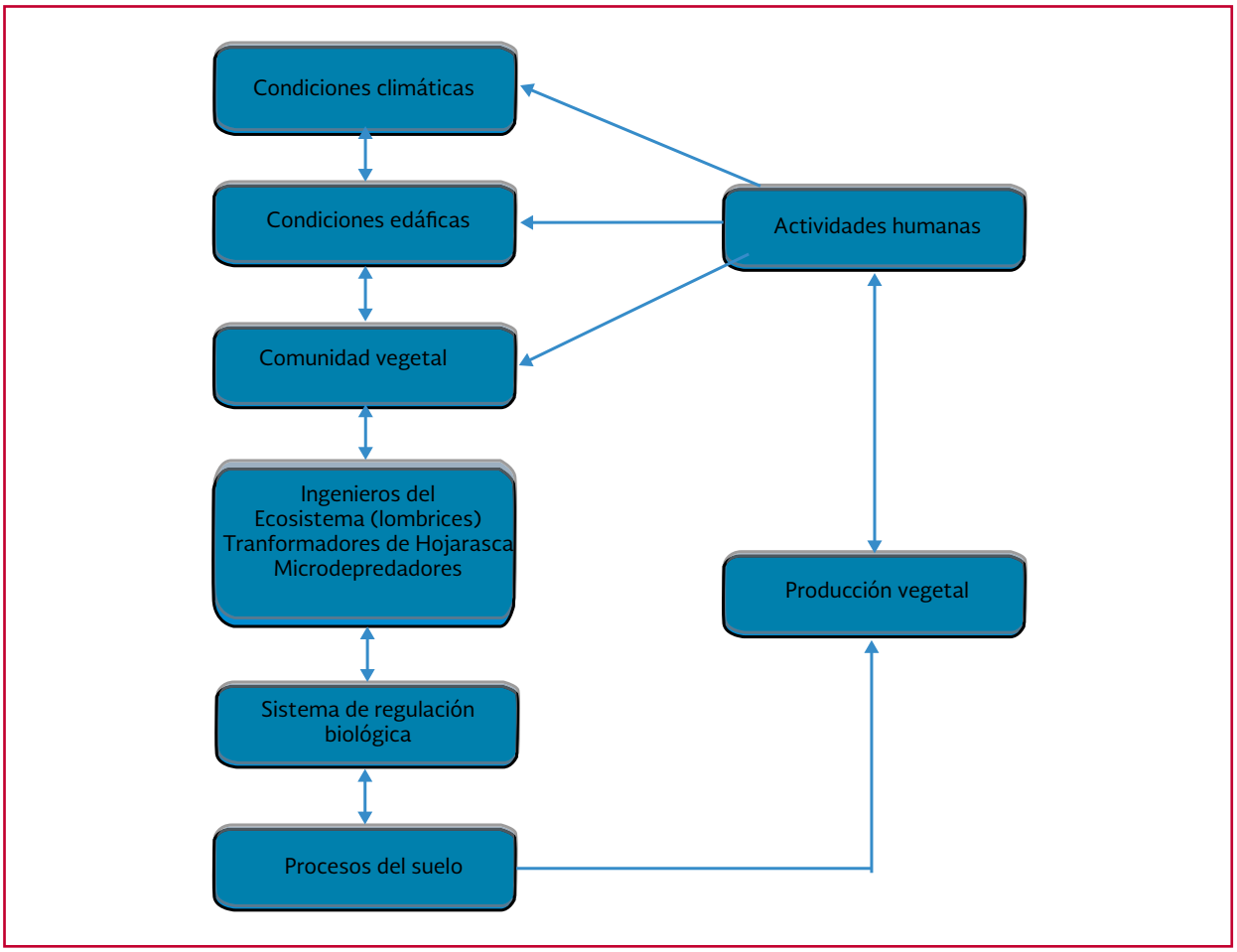
10.4.1.1. Las lombrices como ingenieras del ecosistema

Las especies consideradas como ingenieras del ecosistema pueden alterar la distribución y abundancia de muchas plantas y animales grandes, y modificar significativamente la biodiversidad (Jones, Lawton , & Shachak , 1994); (Jones , Lawton , & Shachak , 1997); (Wright, Jones , & Flecker , 2002); (Lill JT, 2003). Una de las especies considerada como ingeniera del ecosistema es la lombriz de tierra, ya que son organismos que crean, modifican o mantienen los hábitats (o micro-hábitats) causando un cambio en el estado físico de los materiales bióticos y abióticos y que modulan, directa o indirectamente, la disponibilidad de recursos para otras especies (Lawton & Shachak, 1994), Lawton & Shachak, 1997). Las lombrices de tierra son consideradas ingenieras (Lawton & Shachak, 1994), ya que intervienen en la aireación e infiltración del suelo, y proporcionan materia orgánica disponible para otros organismos del suelo. En la Ilustración 10.2 se representa un modelo jerárquico con los principales factores determinantes en la formación del suelo. El modelo muestra el funcionamiento de los procesos del suelo mediante una serie de factores determinados, dentro de la jerarquía por escalas de espacio y tiempo. Los factores que operan a una escala espacio temporal más alta controlan a los que operan a escala más baja, aunque no tiene rigidez jerárquica, ya que los agentes que influyen en una gran variedad de procesos pueden actuar en diferentes escalas y en estas pueden variar la importancia relativa de los factores relevantes, Jiménez, *et al*. 2003. Como puede observarse las lombrices estarían ocupando un lugar clave como, en el acondicionamiento y la transformación del sustrato orgánico y mineral y en el florecimiento de la masa microbiana del suelo y la producción vegetal.

Las funciones de los invertebrados del suelo están relacionadas con la eficacia de su sistema digestivo que depende del tipo de interacciones que mantienen con la microflora del suelo y de la naturaleza y abundancia de las estructuras biológicas que esos invertebrados producen en el suelo, (Lavelle, 1996) y (Lavelle, 1997) citado en Jiménez, *et al.* 2003). De acuerdo a estos criterios Jiménez *et al*. 2003 clasifica a los invertebrados del suelo en tres grupos funcionales:

Microdepredadores.-Incluye a los invertebrados más pequeños, los protozoos y los nemátodos. No producen ninguna estructura órgano-mineral (Lavelle, 1996) y (Lavelle, 1997), su efecto principal es mineralizar la materia orgánica (Couteux, *et al*., 1991); (Ingham, *et al*., 1985), citados en Jiménez, *et al*. 2003).

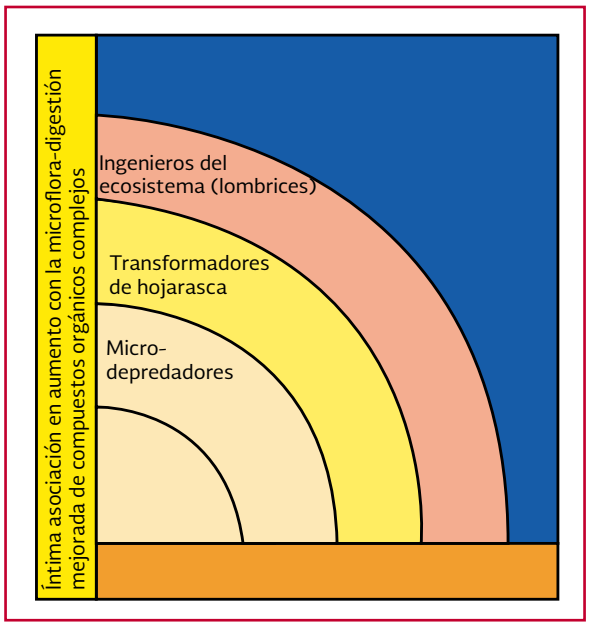
Ilustración 10.2 Modelo jerárquico de los principales factores determinantes de los procesos del suelo, Lavelle et al. 1993 adaptado por Jiménez et al. 2003



Transformadores de la hojarasca.-Representantes de la mesofauna y parte de la macrofauna (Lavelle, 1996). Estos invertebrados reingieren sus deyecciones, que sirven de incubadoras de la microflora y así asimilan los metabolitos liberados por la acción microbiana, Jiménez *et al.*, 2003.

Ingenieros del ecosistema.-Organismos que construyen estructuras físicas con las cuales modifican la disponibilidad de un recurso para otros organismos. Su actividad y la producción de estructuras biogénicas pueden modificar la abundancia o la estructura de otras comunidades de organismos, (Lawton & Shachak, 1994), (Lawton & Shachak , 1997), citado por Jiménez *et al.* 2003). En la Ilustración 10.3, observamos las relaciones de interacción entre los microorganismos y macroorganismos del suelo. Las lombrices como ingenieros del ecosistema forman estructuras biogénicas (galerías) que ayudan a la penetración de aire y agua. Las lombrices pueden desarrollarse sólo bajo condiciones aerobias, que son provocadas por la porosidad de los materiales donde subsisten y por la misma aeración que estos animales provocan por su desplazamiento a través del material, esto ayuda al florecimiento de microorganismos aerobios, que conjuntamente con las lombrices degradan los desechos y ponen a disposición de los vegetales los nutrientes lo que ayuda al desarrollo de la vegetación.

Ilustración 10.3 Relaciones de interacción entre los microorganismos y los macroorganismos del suelo



10.4.1.2. Las lombrices como aereadores y biodigestores

La lombriz en su papel ecológico tiene dos funciones una como aereadores y la otra como biodigestores:

Las lombrices como aereadores

Transformación física-aeredores y mezcladores:

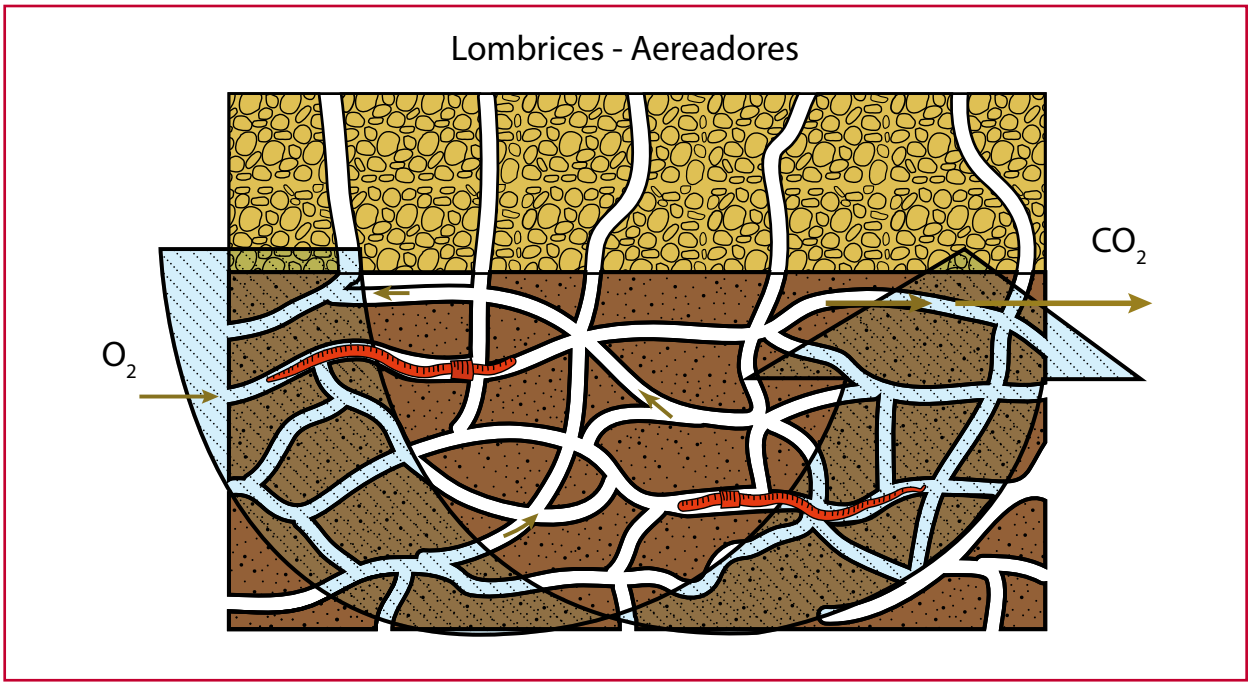
- Al movilizar partículas
- Triturar
- Mezclar
- Propiciar condiciones aerobias

Transformación biológica en el aparato digestivo de la lombriz, papel como bioreactores:

- Fraccionamiento
- Desdoblamiento
- Síntesis
- Enriquecimiento enzimático y microbiano

En la Ilustración 10.4 se observa la función de las lombrices como aeradores del sistema. Al excavar galerías las lombrices permiten la aeración, y que el agua, los nutrientes y el oxígeno se filtren. Las galerías favorecen la circulación del

Ilustración 10.4 Modelo jerárquico de los principales factores determinantes de los procesos del suelo, Lavelle et al. 1993 adaptado por Jiménez et al. 2003



oxígeno y la ventilación del sistema. Promueven la degradación aerobia, disminuyendo olores ofensivos. Por otra parte las lombrices secretan a través de todo su cuerpo un moco gelatinoso, que las protege del medio ambiente, y que queda pegado en las paredes de las galerías, lo que favorece el crecimiento microbiano.

Las lombrices como biodigestores

El alimento es succionado por la boca de la lombriz gracias a la bomba succionadora que se encuentra ubicada en la faringe. Desde la entrada del alimento a la boca se le suministran enzimas como la amilasa. En el esófago existen las glándulas de Morren, que secretan carbonato de calcio lo que ayuda a neutralizar la acidez del alimento. En la molleja el material es finamente molido antes de ser estabilizado, aquí se pueden encontrar enzimas como la mucina. En el estómago se lleva a cabo una acción enzimática exógena producto de la actividad bacteriana y una acción endógena producto de los jugos digestivos que son ricos en hormonas, enzimas y otras sustancias fermentativas que ayudan al proceso de rompimiento de las partículas. Al intestino llega el alimento completamente molido y químicamente modificado, estructurándose las micelas que son las moléculas base del humus.

Las excretas o turrículos se forman como pelets cubiertos de una membrana peritrófica, que es una mucoproteína, que proporciona cohesión y soporte a la materia orgánica, además debido a su alto contenido de nutrientes, favorece el crecimiento microbiano. Las excretas o turrículos están constituidas de un material de granulometría fina con un gran contenido de bacterias, hongos, actinomicetes, material orgánico y nitrógeno disponible, calcio, magnesio, fósforo y potasio, (Rodale, *et al*., 1971). Contienen también sustancias que pueden ser aprovechadas en la agricultura orgánica como, antibióticos, enzimas, vitaminas y hormonas.

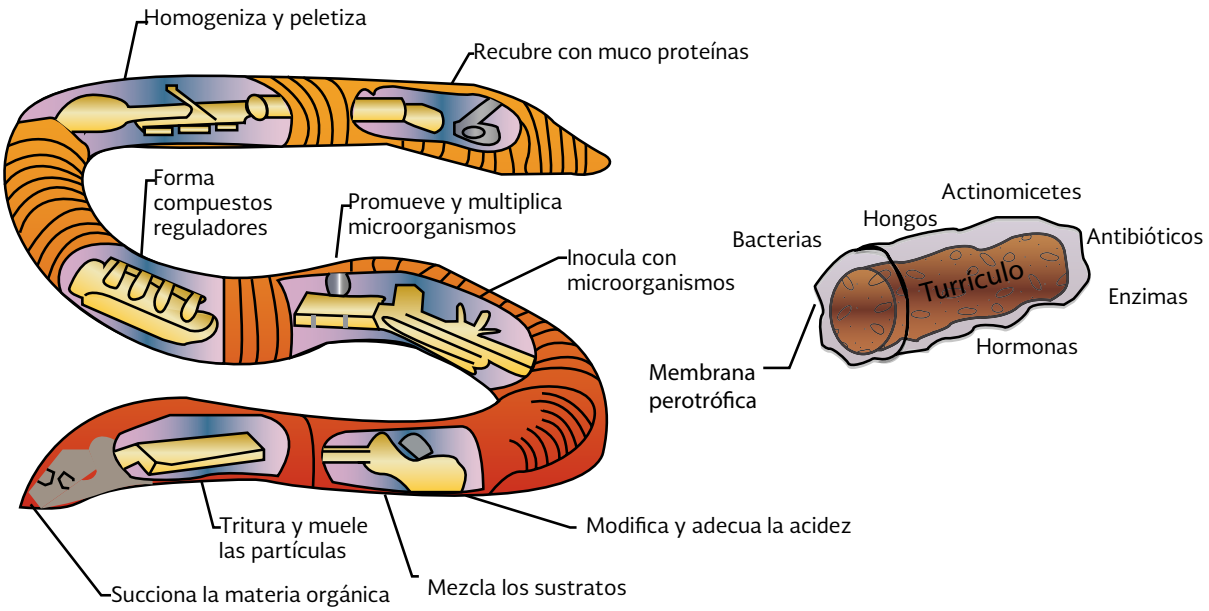
De acuerdo a Camp, Dresser & Mckee, 1980, los efectos del paso a través del tracto digestivo son:

- Las partículas se rompen incrementando su área superficial
- Los compuestos de sulfuro se oxidan
- La respiración microbiana se acelera por un factor de tres
- Las bacterias de Salmonella, sp., se destruyen

En la Ilustración 10.5 se observan las funciones del tracto digestivo de la lombriz como un Biodigestor con las siguientes funciones: 1) Succiona la materia orgánica; 2) Tritura y muele las partículas; 3) Mezcla los sustratos; 4) Modifica y adecua la acidez; 5) Inocula microorganismos; 6) Promueve y multiplica los microorganismos; 7) Forma compuestos reguladores; 8) Homogeniza o peletiza; 9) Recubre con mucoproteínas; y 10) Excreta abono orgánico, (Capistran, 2001). En la ilustración 10.5, también se presenta una imagen de un turriculo o excreta, rodeado de una membrana peritrófica la cual está compuesta de bacterias, hongos, actinomicetos, enzimas, antibióticos, hormonas y vitaminas.

El vermicomposteo es un proceso de descomposición natural, similar al composteo termofílico, pero en este el material orgánico, además de ser atacado por los microorganismos (hongos, bacterias, actinomicetos y levaduras.) existentes en el medio natural, también lo es por el complejo sistema digestivo de la lombriz y a diferencia del composteo termofílico se lleva a cabo a temperatura ambiente.

Ilustración 10.5 Función de las lombrices como bioreactores, Capistran, ***et al***. 2001



Esto tiene como consecuencia un aumento significativo en la velocidad de degradación y mineralización del residuo, obteniendo un producto de alta calidad. Dicha transformación hace que los niveles de pérdida de nutrientes como nitrógeno y potasio, sean mínimos con relación a los sistemas tradicionales de composteo. El resultado son dos productos de alta calidad: El humus y las lombrices y otros sub-productos como son te de vermicomposta, harina de lombriz.

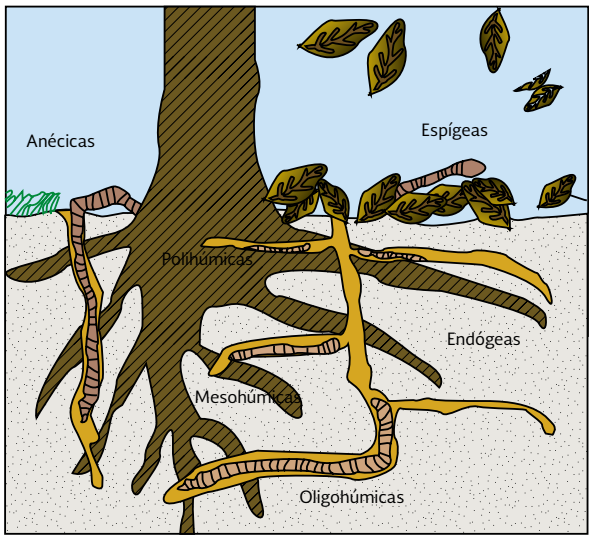
10.4.1.3. Tipos de lombrices

Las lombrices de tierra se distribuyen en el área del suelo denominada drilosfera, que es el micrositio en donde convergen con los microorganismos (Lavelle, *et al.*, 1989). En relación a su distribución en el suelo, las lombrices se clasifican funcionalmente en tres categorías ecológicas: epigeas, endógeas y anécicas (Bouche, 1972); (Bouche, 1977); (Lavelle, *et al.*, 1989), Ilustración 10.6.

Las lombrices endógeas se clasifican en polihúmicas, mesohúmicas y oligohúmicas de acuerdo a la cantidad de materia orgánica que ingieren (Lavelle, *et a*l., 1993); (Lavelle, *et al.*, 1989). Endógeas: del griego endo = dentro y geo = tierra, es decir aquellas que viven dentro del suelo, cavan galerías horizontales, comen tierra y defecan tierra. Dentro de este grupo tenemos a la Lumbricus terrestris. Epígeas: del griego epi = sobre y geo = tierra, viven sobre la superficie del suelo, comen materia orgánica y defecan humus. Nuestra lombriz, Eisenia foetida, es una de ellas. Bajo condiciones de estrés penetran en la tierra, pero al no ser este su hábitat natural, regresarán a la superficie una vez que la situación se normalice. Anécicas: viven bajo la superficie del suelo, cavan galerías verticales y durante la noche suben al nivel de la tierra para alimentarse de materia orgánica y regresan allí durante el día donde digieren lo comido, (Bollo, 2001).

En los siguientes incisos se presentan dos diferentes tipos de lombrices:

Ilustración 10.6 Clasificación ecológica de las lombrices de la tierra. (Lavelle, 1981, tomado de Capistrán, 2001)



- Lombrices formadoras de suelo
- Lombrices composteadoras

10.4.1.4. Lombrices formadoras de suelo

Las especies formadoras de suelo facilitan la penetración de aire y agua. Ayudan además al transporte de materiales en los diferentes estratos, estabilizan los agregados y solubilizan los nutrimentos lo que favorece el crecimiento vegetal. Las lombrices de tierra son de una gran importancia económica, porque con su actividad cavadora de tierra, en su estado natural, participan en la fertilización, aireación y formación del suelo, por su efecto marcado sobre la estructuración del mismo, debido a la mezcla permanente y el reciclaje de bases totales, como

Ilustración 10.7 Lombrices formadoras de suelo

Lombriz de tierra construyendo una galería, David M. Dannis, (2014)

Lombriz de tierra anécica, Lumbricus terrestris, Earthworm society of Britain. (2014)

Lombriz de tierra endógea, Allolobophora chlorotica, Earthworm society of Britain. (2014)

Lombriz de tierra endógea, Apporrectodea, sp. Storey Malcolm. (2011)

el calcio, el cual sustraen de las capas más profundas del suelo hacia la superficie.

Entre las especies representativas de este grupo encontramos: *Lumbricus terrestris*, *Allolobophora chlorotica y Apporrectodea, sp.* Ilustración 10.7.

Las lombrices de tierra también pueden encontrarse en depósitos de lodo residual consumiéndolo, sin embargo no pueden ser cultivadas porque escapan de los lechos.

10.4.1.5. Lombrices transformadoras de residuos orgánicos

Las especies de anélidos que se utilizan en el vermicomposteo difieren de las especies que se encuentran comúnmente en el suelo, (Appelhof, *et al.*, 1996).

Las especies composteadoras (Ilustración 10.8), además de realizar las actividades descritas por las lombrices formadoras de suelo, sobreviven en condiciones de alta carga orgánica de material sin estabilizar, por lo que pueden ser utilizadas

Ilustración 10.8 Lombrices composteadoras, del género Eisenia, sp., alimentadas con lodo residual

para transformar residuos orgánicos en humus. Entre las especies más representativas de este grupo tenemos: *Eisenia foetida, Eisenia andrei, Perionyx excavatus, Eudrilus eugeniae y Metaphire californica.* En este documento trataremos a la especie Eisenia foetida (Ilustración 10.9) debido a su importancia en el vermicomposteo.

Las lombrices del género *Eisenia foetida* son consumidoras de grandes concentraciones de materia orgánica, tienen una gran capacidad de de vivir en grupos densamente poblados, tienen una

Ilustración 10.9 Lombrices composteadoras, del género Eisenia, sp., alimentadas con lodo residual

gran capacidad reproductiva, un metabolismo muy rápido, presentan una resistencia a rangos variantes de oxígeno, dióxido de carbono y pH. Debido a que son epígeas se pueden alimentar por capas de residuos, lo que facilita un menor manejo en su alimentación. Las especies más conocidas son: *Eisenia foetida y Eisenia andrei.*

10.4.1.6. Descripción de Eisenia foetida

La lombriz roja Eisenia foetida, es una de las lombrices que más se utilizan en el vermicomposteo, vive normalmente en zonas con un clima templado. Su temperatura corporal oscila entre los 19 y 20 °C. Desde el momento de su nacimiento, las lombrices son autosuficientes; comen solas y sólo necesitan para sobrevivir que el sustrato donde se encuentran sea lo suficientemente húmedo, poroso y tierno para ser perforado por su minúscula boca. Enseguida se describe su morfología, anatomía, forma de vida, reproducción y ciclo hidrológico, potencial reproductor.

Taxonomía

El nombre común de la lombriz Eisenia foetida es roja californiana, este nombre se deriva de su color y de la zona geográfica donde se inició el proceso de domesticación de la especie. E. foetida esta clasificada dentro del reino animal, Phylum Annélida en el que se consideran los gusanos que están constituidos por metámeros (anillos). Reciben este nombre debido a que su cuerpo se encuentra constituido por metámeros o segmentos en forma de anillos. Está incluida en la Clase Oligoqueta sus características son: Prostomio (lóbulo anterior a la boca) sin apéndices sensoriales, cerdas en cada segmento escasas. Oligoqueta significa pocas quetas. Son estructuras formadas por la pared del cuerpo en el interior de un folículo; presentan musculatura propia por lo que presentan un cierto movimiento. Se localizan en cada segmento, (Santaelises Soriano , 2010). Del orden Opistofora que se distinguen por los poros ubicados en cada segmento. La familia Lumbricidae que se distinguen por la ubicación del clitelo desde el segmento 18 tiene como representante el Genero Eisenia, la especie más usada en el vermicomposteo es la E. foetida. En la Tabla 10.2 se presenta resumida la clasificación taxonómica y en las imágenes de Eisenia foetida.

Tabla 10.2 Clasificación taxonómica de Eisenia foetida, Fauna Europea, 2013

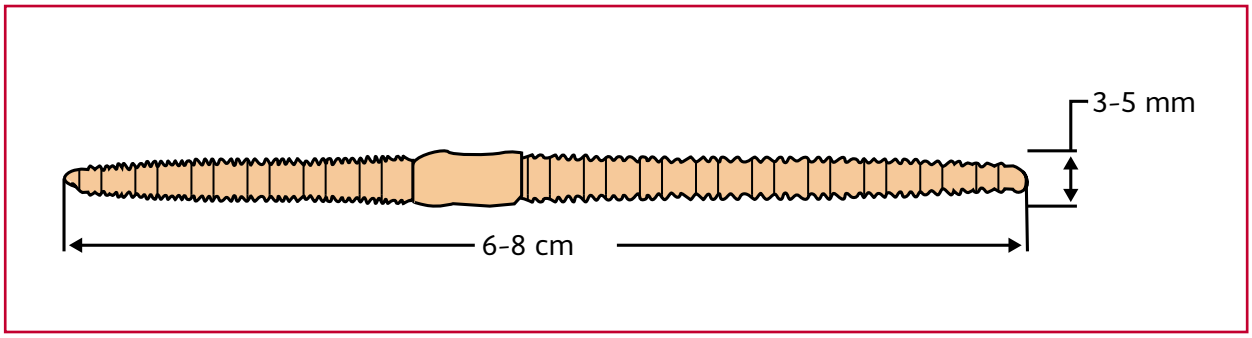
Rango	Nombre
Reino:	Animalia
Filo:	Annelida
Clase:	Clitellata
Subclase:	Oligochaeta
Orden:	Haplotaxida
Familia:	Lumbricidae
Género:	Eisenia
Especie	E. foetida Savigny, 1826

Caracteres generales

Eisenia foetida es una especie de animales invertebrados, pluricelulares, con simetría bilateral, con la presencia de una cavidad general verdadera o celoma, son animales con prostomio y metámeros, (Moreno, *et al*., 2002.).

El cuerpo de estos animales es alargado, cilíndrico, con una fina cutícula, segregada por las células de la epidermis, por donde estos animales efectúan la respiración. Las lombrices se mueven por medio de movimientos ondulatorios de su cuerpo, Ilustración 10.10. Algunas características generales de este espécimen, son:

Ilustración 10.10 Características morfológicas generales



- Cuerpo alargado, segmentado y con simetría bilateral
- Mide de 6 a 8 cm de longitud
- Su diámetro oscila entre los 3 y los 5 mm
- Al nacer son blancas, después de unos días cambian a un color rosado y de adultas tienen un color rojo oscuro
- Prostomio.-Es el segmento preoral donde se hallan los ganglios cerebrales
- Cutícula.-Es una lámina muy delgada de color marrón brillante, quitinosa, fina y transparente
- Epidermis.-Situada debajo de la cutícula, es un epitelio simple con células glandulares que producen una secreción mucosa. Es la responsable de la formación de la cutícula y del mantenimiento de la humedad y flexibilidad de la misma
- Capas musculares.-Son dos, una circular externa y otra longitudinal interna
- Peritoneo.-Es una capa más interna y limita exteriormente con el celoma de la lombriz
- Celoma.-Es una cavidad que contiene líquido celómico y se extiende a lo largo del animal, dividida por los septos, actuando como esqueleto hidrostático
- Aparato circulatorio.-Formado por vasos sanguíneos. Las lombrices tienen dos vasos sanguíneos, uno dorsal y otro ventral. Posee también otros vasos y capilares que llevan la sangre a todo el cuerpo. La sangre circula por un sistema cerrado constituido por cinco pares de corazones
- Aparato respiratorio.-Es primitivo, el intercambio de oxígeno se produce a través de la pared del cuerpo
- Sistema digestivo.-En la parte superior de la apertura bucal se sitúa el prostomio con forma de labio. “Las células del paladar son las encargadas de seleccionar el alimento que pasa posteriormente al esófago donde se localizan las glándulas calcíferas, glándulas de Morren que son órganos especiales de regulación de los equilibrio iónicos del medio interno. Regulan el equilibrio ácido –base, y en presencia de un exceso de anhídrido carbónico lo combinan con calcio presente en la sangre, lo que produce cristales insolubles de carbonato de calcio, los cuales son excretados en el esófago, (Santaelises, 2010). Posteriormente tenemos el buche, en el cual el alimento queda retenido para dirigirse al intestino. La lombriz californiana se alimenta de animales, vegetales y minerales. Antes de comer tejidos vegetales los humedece con un líquido parecido a la secreción del páncreas humano, lo cual constituye una pre-estabilización

- Aparato excretor.-Formado por nefridios, dos para cada anillo. Las células internas son ciliadas y sus movimientos permiten retirar los desechos del celoma. Dan salida a la urea o amoníaco a través de los conductos que desaguan en los nefridio poros, (Santaelises, 2010)
- Sistema nervioso.-Es ganglionar. Posee un par de ganglios supraesofágicos, de los que parte una cadena ganglionar, de posición dorsal que emite cordones alrededor del esófago para conectarse con masas ganglionares pequeñas que se ubican en la parte ventral del animal a lo largo de todo el cuero, (Santaelises, 2010)
- Clitelo.-Es útil en la etapa de la reproducción. Consiste en un cinturón o engrosamiento que se halla en el tercio anterior del cuerpo de las lombrices, evidenciando la madurez sexual. Provisto de glándulas que proveen el alimento y la cubierta del cocón o puesta, (Schuldt M. , 2004). El clitelo (Ilustración 10.11) se sitúa en la parte anterior del cuerpo aproximadamente a la altura de su primer tercio, si se considera la longitud total de la lombriz. El clitelo es como un anillo de mayor diámetro (espesor) que el resto del cuerpo. Este anillo contiene una glándula que segrega una sustancia alimentadora de la puesta que es la albúmina y se forma en la capa más profunda del clitelo, la capa albuminógena, líquido especial cuya finalidad es que interviene en la unión de los individuos durante el emparejamiento (mediante la secreción de moco) así como en la formación del capullo y en la elaboración de los fluidos que van a nutrir al cocón o puesta en su interior El clitelo puede perderse en condiciones de malnutrición, estos animales desarrollan el clitelo nuevamente al aportar

Ilustración 10.11 Clitelo y metámeros, (Schuldt M. , 2004)

Es útil en la etapa de reproducción Clitelo

Clitelo:Cinturón o engrosamiento que se halla en el tercio anterior del cuerpo de las lombrices, evidenciando la madurez. Provisto de glándulas que proveen el alimento y la cubierta del cocón o puesta

más nutrientes al medio de cultivo. El cocón o puesta una vez formado, saldrá por la parte anterior del animal mediante grandes ondas de contracción muscular de todo el cuerpo. Los óvulos y los espermatozoides son descargados en el interior de los capullos a su paso por cada uno de los poros genitales (poros espermatecales) en el caso de los oligoquetos, (Wikipedia, Eciclopedia Libre, 2010)

Forma de vida

La lombriz cuando es adulta pesa casi 1 g, todos los días ingiere una cantidad de comida equivalente a su peso, expidiendo, en forma de humus, el 60 por ciento de la misma. El 40 por ciento es asimilado y utilizado por la lombriz como sustento. Para comer, la lombriz chupa la comida a través de su boca. Cuando aquella llega al estómago, unas glándulas especiales se encargan de segregar carbonato cálcico, cuya finalidad es neutralizar los ácidos presentes en la comida ingerida. El sistema muscular está muy desarrollado tanto en sentido longitudinal como en sentido perimetral (circular); ello le permite a la lombriz efectuar cualquier tipo de movimiento.

La lombriz E. foetida, avanza como todas las demás arrastrándose sobre el sustrato, ya que su cuerpo está dotado de una serie de anillos que son capaces de adherirse (clavarse) en el mismo. Para avanzar, la lombriz fija los anillos anteriores en el terreno, encoge el resto del cuerpo hacia la parte anterior (hacia la boca), fija entonces, hallándose encogida los anillos posteriores; a continuación libera los anillos anteriores y, empujando con la parte posterior del cuerpo la parte anterior, inicia el movimiento de avance. En esta fase es cuando abre la boca y chupa la comida. Esta última, después de atravesar todo el aparato digestivo, es expulsada por el ano, que se encuentra en la parte terminal.

Reproducción y ciclo biológico

Cada lombriz está dotada de un aparato genital masculino y de un aparato genital femenino. El aparato genital masculino está integrado por los testículos que son glándulas secretoras de esperma. Su situación es anterior, muy cerca de la boca. El aparato genital femenino recibe el esperma y lo retiene hasta el momento de la fecundación; este aparato se encuentra en una posición relativa posterior al aparato genital masculino. Dos lombrices en fase de acoplamiento giran en sentido opuesto la una de la otra, de esta manera, puede contactar el aparato genital masculino de una con el aparato genital femenino de la otra. Así en cada acoplamiento, una lombriz recibe el esperma de la otra y lo retiene en su propio aparato genital femenino hasta la fecundación. La fecundación se efectúa a través del clitelo, cuyas glándulas (Ilustración 10.12) producen el capullo o cápsula (cocón). La cápsula tiene un color amarillo-verdoso, con unas dimensiones aproximadas de 2-3 por 2-4 mm, no siendo por lo tanto redonda sino teniendo una

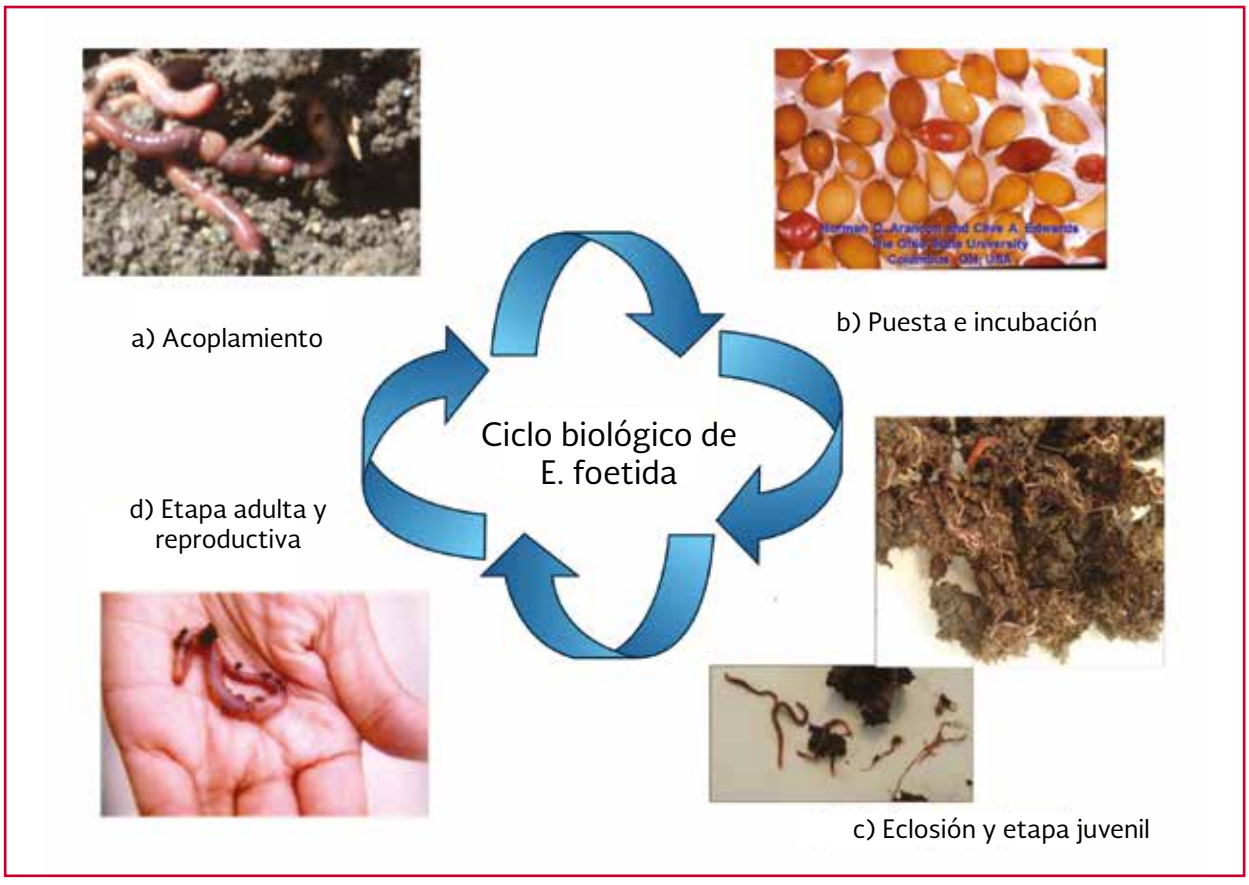
Ilustración 10.12 Cápsulas, cocones, capullos o puestas de Eisenia, sp

forma parecida a una pera muy pequeña, redondeada por una parte y acuminada por la otra. Por esta última emergen las lombrices después de 14-21 días de incubación.

En el momento del nacimiento, las crías rompen la envoltura que ha adquirido un color café más oscuro. El grupo de pequeñas lombrices, cuyo número oscila entre 2 y 21, es de color blanco. A los 5 ó 6 días se parecen fenotípicamente a sus progenitores. E. foetida vive poco más de 4 años en el laboratorio, algunos autores refieren hasta 16 años, un año en condiciones de producción intensiva y a la intemperie. Se reproduce más de una vez por semana. De cada acoplamiento resultan 2 cocones (uno de cada consorte) conteniendo por cocón de 2-4 lombrices (algunos autores mencionan que hasta 21 lombricitas por cocón). Los cocones son abandonados por los progenitores, permaneciendo en el medio de cultivo de las lombrices y librados a su suerte.

Las lombrices se reproducen prácticamente durante todo el año, Ilustración 10.13. se representa el ciclo biológico de E. foetida, que se describe con los siguientes pasos: a) Acoplamiento.-se parte de un acomplamiento semanal con fecundación cruzada; b) Puesta e incubación.- después del apareamiento las dos lombrices quedan fecundadas, cada una de ellas tiene la capacidad de poner un cocon o cápsula, el tiempo de incubación es de 14-21 días Las lombricitas permanecen en el cocón un tiempo variable, 14 a 21 días (o más si las temperaturas son inferiores), su permanencia en el cocón depende de la temperatura ambiente, el óptimo para el desarrollo está en un rango

Ilustración 10.13 Ciclo biológico de Eisenia, sp, fotos L.Cardoso



de 20-25ºC. Las lombricitas se nutren dentro del cocón, de las secreciones albuminoideas proporcionadas por el clitelo cuando tiene lugar la copulación; c) Eclosión y etapa juvenil. Las lombrices son de desarrollo directo (no proporcionan larvas como ocurre en otros invertebrados), naciendo del cocón pequeños animales parecidos a los padres, con los mismos hábitos alimentarios y similar dieta. Estos juveniles, son transparentes y de pocos milímetros de longitud, la etapa juvenil dura de 50-65 días, d) Etapa adulta y reproductiva. Con tallas de 2-3 cm, alcanzan la capacidad para reproducirse a su vez, lo que se evidencia con la aparición del clitelo; Los animales siguen creciendo hasta los 6 o 7 cm de longitud. Peso promedio 0.98 grs. (Bollo, 2001).

10.4.2. Proceso tecnológico de vermicomposteo

El vermicomposteo como proceso tecnológico es la degradación de los residuos orgánicos por medio del consumo de estos por las lombrices (EPA, 1980). En otras palabras es un proceso tecnológico de tratamiento innovativo para la biodegradación de los biosólidos y residuos sólidos municipales, por medio de lombrices y microorganismos.

Los objetivos de la tecnología de vermicomposteo son: Alcanzar la reducción de patógenos y producir un biosólido con calidad agrícola para ser usado como abono orgánico, (Donovan, 1981) y (USEPA, 2006).

10.4.2.1. Etapas del proceso de vermicomposteo de lodos residuales

Las etapas del proceso incluyen la deshidratación del lodo por medio de cualquier método convencional (lecho de secado, filtro prensa, filtro banda o centrífuga). El lodo residual por si sólo es suficiente alimento para las lombrices porque es un material suave, homogéneo y con una humedad adecuada. La humedad del lodo deshidratado mecánicamente por filtro prensa o centrífuga es el adecuado para las lombrices ya que contiene de 70 a 80 por ciento de humedad, las lombrices respiran a través de la piel el oxígeno disuelto por lo que requieren de un ambiente húmedo.

Es posible usar lodos a los que se les ha adicionado coagulantes, (Kaplan, *et al*., 1980), demostró que no se observaron efectos nocivos que fueran en detrimento en el peso de las lombrices con concentraciones de coagulante por encima de 0.1 por ciento, la cual es una concentración arriba de las utilizadas en el tratamiento del agua. Altas concentraciones de carbonato de cal no tuvieron efectos negativos, pero las lombrices se vieron afectadas en su peso con concentraciones arriba del 0.1 por ciento de $FeSO_4$, $FeCl_3$ y $Al_2 (SO_4)_3$. Una concentración de 10 por ciento de aluminio o $FeCl_3$ provocó una mortalidad del 100 por ciento.

Si se van a usar como alimento para las lombrices lodos provenientes de lechos de secado (Ilustración 10.14), se tiene que considerar que con esta tecnología de deshidratación de lodo se puede llegar a remover hasta 70 por ciento de humedad, sin embargo no se debe usar el lodo secado hasta este nivel, sino cuando todavía tiene humedad suficiente y presenta una consistencia de pasta de dientes, que puede ser paleado fácilmente pero sin llegar a tener la forma de una costra seca, aún en este estado se puede usar pero serán necesarios riegos para llegar a la humedad deseada (80 por ciento).

La (US EPA, 1979), presentó dos ejemplos de las etapas del proceso de vermicomposteo mediante dos diagramas de flujo.

Ejemplo 1. Se refiere a un lodo residual que proviene de un reactor aerobio. Ver Ilustración 10.15 en donde se encuentran representadas cinco etapas.

Las etapas que se presentan en la Ilustración 10.15 son:

- Etapa 1.-Deshidratación: El lodo aerobio pasa por una etapa de deshidratación en filtro banda hasta lograr un porcentaje de humedad cercano al 80 por ciento
- Etapa 2.-Mezclado (opcional): Esta etapa es opcional, se agregan los materiales acondicionadores y se mezclan con el lodo. Se proporciona humectación en la mezcla hasta lograr cerca de un 80 por ciento de humedad
- Etapa 3.-Proceso de vermicomposteo: El lodo o la mezcla lodo-material acondicionador entran a los lechos de vermicomposteo donde pueden aplicarse por capas o bien mediante una sola aplicación como alimento de las lombrices. Durante el proceso se debe garantizar una humedad del 80 por ciento
- Etapa 4.-Separación lombrices-vermicomposta: Se separan las lombrices colocando una capa de lodo por encima del material degradado. Las lombrices migran a esta capa y se remueven para reciclarse al proceso, de esta forma se pueden recuperar hasta el 90 por ciento de las lombrices jóvenes y adultas. La vermicomposta se retira y está lista para disponerse a granel en suelo agrícola. Si hay un excedente de lombriz se retira
- Etapa 5.-Secado y cribado (opcional). Sobre una superficie pavimentada se coloca una capa de 10 cm de vermicomposta y se deja secar a la intemperie, se voltea hasta alcanzar 40 por ciento humedad. La vermicomposta secada de esta forma se pasa a una cribadora. La vermicomposta cribada se envasa. El material retenido en la criba se recicla
- Ejemplo 2.- Se refiere a un lodo residual que proviene de un reactor anaerobio o que es tóxico para las lombrices por su origen industrial o agroindustrial. Ver Ilustración 10.16 en donde se encuentran representadas cinco etapas.

Ilustración 10.14 Lodos adecuados para vermicomposteo provenientes de lechos de secado

Las etapas presentadas en la Ilustración 10.16 son:

- Etapa 1.-Deshidratación: El lodo aerobio pasa por una etapa de deshidratación hasta lograr un porcentaje de humedad cercano al 80 por ciento
- Etapa 2.-Mezclado: Se agregan uno o varios materiales acondicionadores al lodo, se revuelven hasta lograr una mezcla homogénea con 60 por ciento de humedad
- Etapa 3.-Pre composteo: Con la mezcla se instala una pila o un camellón el cual es monitoreado durante el tiempo requerido de acuerdo a cada tipo de lodo. Puede tener una duración de 5 a 30 días antes de que pueda ser usado como alimento para las lombrices, durante este tiempo se irán desarrollando los organismos (hongos, bacterias, algas, protozoarios) que constituirán el alimento de las lombrices. Esta etapa es necesaria para aquellos desechos que por su naturaleza tóxica o difícilmente biodegradables, necesiten de una estabilización previa para después continuar con el vermicomposteo, por ejemplo, lodos: anaerobios, de curtiduría, de textileras, etc. Harris, op. cit, (1990) menciona que en algunas plantas municipales, donde ya se llevaba el composteo termofílico, se agregó una etapa de vermicomposteo para obtener un producto de mejor calidad
- Etapa 4.-Proceso de vermicomposteo: El material pre composteado entra a los lechos de vermicomposteo se aplica en capas o en una sola aplicación como alimento de las lombrices. Se requiere de riego para alcanzar la humedad requerida del 80 por ciento
- Etapa 5.-Separación lombrices-vermicomposta: Se separan las lombrices con una capa de mezcla nueva, las lombrices migran a esta capa y se remueven para reciclarse al proceso, se recupera hasta el 90 por ciento de las lombrices jóvenes y adultas. La vermicomposta se retira y se puede disponer en suelo agrícola. Si hay un excedente de lombriz se retira
- Etapa 6.-Secado y cribado (opcional). Sobre una superficie pavimentada se coloca una capa de 10 cm de vermicomposta y se deja secar a la intemperie, se voltea hasta alcanzar 40 por ciento humedad. La vermicomposta se criba y está lista para su distribución. El material retenido en la criba se recicla

Ilustración 10.15 Etapas del proceso de vermicomposteo en un lodo aerobio, (US EPA, 1979)

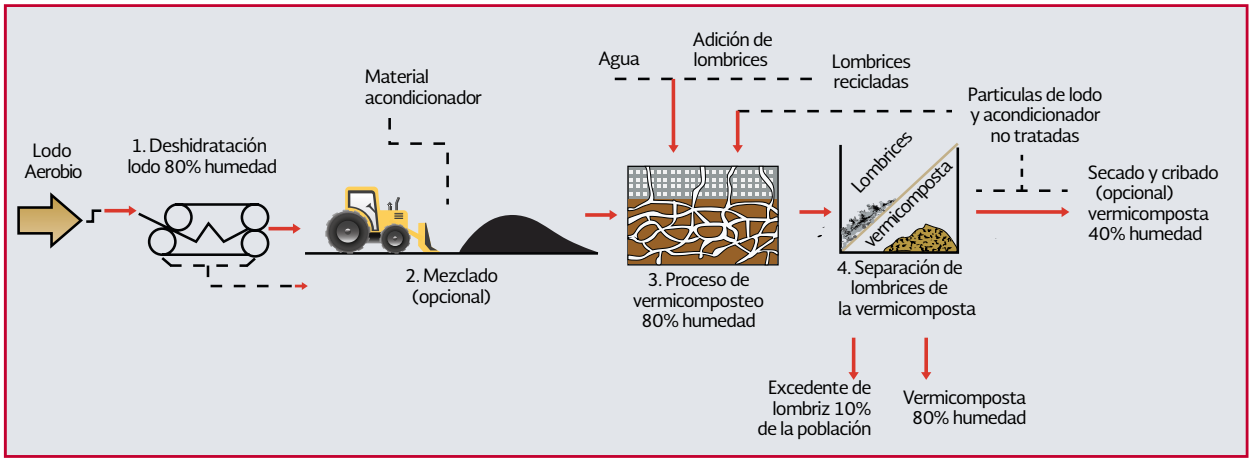
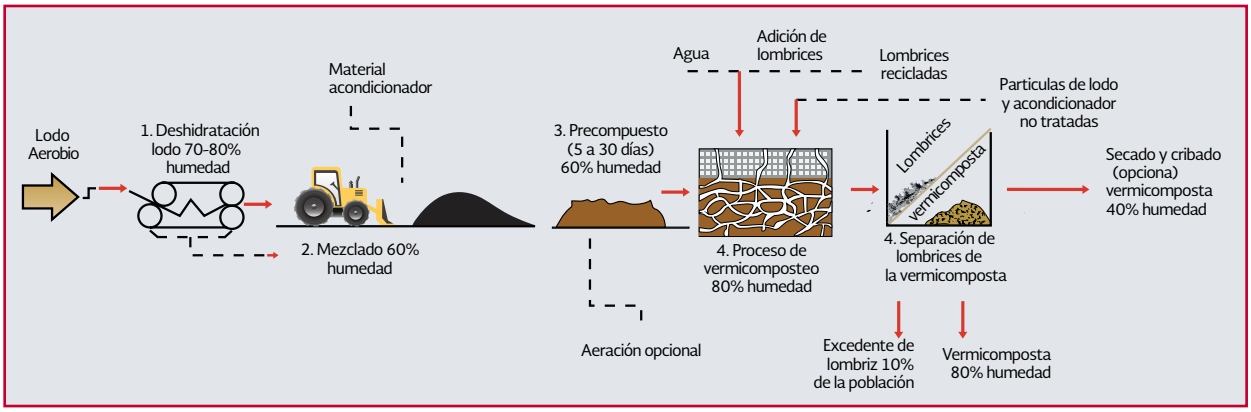


Ilustración 10.16 Etapas del proceso de vermicomposteo con un lodo anaerobio o tóxico, (US EPA, 1979)



Con respecto al uso de lodos anaerobios, de acuerdo a estudios llevados a cabo por (Mitchell, et al., 1977), se demostró que colocando E. foetida en lodo anaerobio fresco o en excretas humanas frescas el resultado fue de 100 por ciento de mortalidad en pocas horas. Las lombrices son sensibles a las condiciones anaerobias, particularmente a altas temperaturas. Pero cuando el lodo anaerobio se sometió a la presencia de aire el potencial redox (Eh) aumentó, lo que demostró que las lombrices pueden sobrevivir en el lodo anaerobio sólo si el lodo tiene un potencial redox, Eh > 250 mv. Las lombrices requieren oxígeno en el aire en cerca de 20 por ciento. Esta parámetro posiblemente determine la profundidad hasta la que penetra E. foetida en el sustrato, ya que el dióxido (anhídrido) carbónico, aún en concentraciones elevadas, no afecta a las lombrices. Consecuentemente, la compactación del sustrato puede circunscribir el accionar de los animales, si bien a la larga lo descompactan. Normalmente, las lombrices no ingresan más allá de los 40 cm de profundidad. El amoníaco y otros compuestos amoniacales gaseosos o solubles en agua pueden causarles daño en concentraciones elevadas. Estos productos son habituales en las fases de descomposición de la materia orgánica rica en proteínas (cárneos, abundante verdura de hoja, orines y algunos estiércoles de animales con mucha proteína residual, por ejemplo los cerdos).

10.4.3. Instalaciones para el vermicomposteo

El proceso de vermicomposteo tiene como unidad básica de producción (UBP), el lecho o cama. Un lecho se puede construir con ladrillo o cualquier material disponible. Las paredes del lecho, tienen como propósito delimitar el área de los lechos, estructuralmente, pueden construirse de ladrillos y cemento. Las dimensiones corresponden a criterios operativos y varían de acuerdo a los autores.

10.4.3.1. Dimensionamiento de los lechos

Un lecho típico puede tener las siguientes dimensiones de acuerdo a (Schuldt M. , 2004): 1 m de ancho, que es el límite de mantenimiento manual (alcance del brazo); 2 metros de longitud y la altura más usual es de 40 cm. De acuerdo a (Schuldt M. , 2004), un lecho puede consumir, cuando su población de lombrices se encuentra próxima al máximo apiñamiento unos 100 kg de materia orgánica en base húmeda por mes (0.1 ton mes^{-1}).

Bollo, (1999), propone lechos de 1 m × 20 m × 0.20 m, cada lecho trata 12 t de alimento, por lo que si se tienen 30 t de residuos mensuales (360 t/año), necesitamos instalar 30 lechos, que requieren de un área por lecho de 20 m^2, requerimos por lo tanto de 600 m^2, sólo para el área de vermicomposteo. Este autor propone multiplicar el área de vermicomposteo por un factor de 2.5 que de acuerdo a su experiencia proporciona un valor muy exacto del área total requerida, en este caso sería de 1 500 m^2, la cual incluye patio de residuos, calles y pasillos. También se puede partir inversamente, si se tiene la superficie de terreno disponible, por ejemplo 1 000 m^2, y se quiere saber ¿Cuántos lechos se pueden instalar en esa superficie?, se lleva a cabo una doble división:

$$1\ 000\, m^2 / 2.5 / 20\, m^2 = 20\, lechos$$

Se tiene entonces que en un área disponible de 1 000 m^2, vamos a poder instalar 20 lechos, en los que vamos a poder tratar 240 toneladas de lodo durante un año.

$$12\, t\ /año \times 20\, lechos = 240\, t\ \ lodo\ en\ 20\ \ lechos$$

10.4.3.2. Áreas para un sistema de vermicomposteo

Bollo, (1999) estableció los siguientes requerimientos para la ubicación de un vermicompostero:

1. El terreno deberá ser plano con una pendiente de hasta 3 por ciento
2. El suelo de preferencia con buen drenaje para evitar el estancamiento de agua. Lejos de lugares de inundación o deslaves
3. Sin árboles cerca porque sus raíces se van a dirigir hacía el lecho y pueden levantar el cemento y penetrar por el agua y los nutrientes del lecho
4. Los accesos deberán tener vías de paso hacia y desde el vermicompostero. Amplios y transitables durante todo el año
6. Deberá tener una instalación de agua potable, de pozo o vertiente, hay que considerar que las lombrices son seres vivos que requieren vivir en un sustrato con 80 por ciento de humedad. Se calcula un consumo de 50 L /lecho/ d
7. Deberá tener luz

Con base a los diagramas de las etapas de los sistemas de vermicomposteo presentadas (Ilustración 10.15 y Ilustración 10.16), se pueden establecer las áreas requeridas para el sistema de vermicomposteo, las cuales incluyen áreas de almacén; área de mezclado; área de producción de humus o vermicomposta y área de secado y cribado, en la Tabla 10.3, se presenta un ejemplo de las áreas y dimensiones requeridas.

10.4.4. Equipo requerido

En cuanto al equipo requerido para un sistema de vermicomposteo se requiere de un vehículo de carga para transportar el lodo y materiales acondicionadores; el movimiento de los materiales dentro del sistema puede ser manual, por medio de palas o mecanizado, cargador frontal; el riego para sustituir la pérdida de agua por evaporación se puede hacer mediante un sistema de riego automatizado o riego manual, usando mangueras o regaderas. Se debe por lo tanto considerar un área pavimentada y techada para guardar estos estos equipos y herramientas. En la Tabla 10.4, se enlistan los principales equipos requeridos y costos.

10.4.5. Tipos de Sistemas de Vermicomposteo

10.4.5.1. Sistemas abiertos

Estos sistemas se encuentran expuestos a la intemperie pueden recubrirse con paja y hojas secas para evitar el impacto del sol, lluvia o viento, Ilustración 10.17 y Ilustración 10.18, sin embargo funcionan y se pueden instalar fácilmente y con pocos recursos.

10.4.5.2. Sistemas cerrados

Los sistemas cerrados están más protegidos a los efectos del medio ambiente, son tipo invernadero, están techados y con paredes, en donde se pueden instalar otro tipo de equipos, por ejemplo focos, regaderas, que van a beneficiar al sistema, Ilustración 10.19.

Parámetros de control del proceso de vermicomposteo

Los aspectos que se deben considerar en el control del proceso y la preparación del alimento (lodo o desechos) son:

- Temperatura
- Humectación y/o secado del material
- Concentración de pH
- Tamaño de partículas, porosidad y densidad de la mezcla
- Relación carbono-nitrógeno

En la Tabla 10.5 se mencionan los parámetros y rangos óptimos para el vermicomposteo.

Tabla 10.3 Áreas y dimensiones para un sistema de vermicomposteo

Área	Propósito	Dimensiones m² / t
Equipo de deshidratación	Deshidratación del lodo.	50
Almacén de lodo residual. Almacén materiales acondicionadores.	Almacenar el equivalente de la producción de una semana de lodo. (1 tonelada). Esta área se puede considerar como la de pre composteo.	20
Área de mezclado de lodo y materiales acondicionadores.	Mezclar los materiales acondicionadores	20
Área de producción de humus o vermicomposta.	Procesamiento del lodo	2 400
Área de secado, cribado y envasado.	Secar la vermicomposta, cribarla y envasarla	20
Área de almacén de producto a granel y envasado.	Almacenar el equivalente de la producción de una tonelada de vermicomposta	20
Área para guardar equipo y herramientas.	Guardar y proteger de la intemperie equipos y herramientas	20
Equipo de deshidratación	Deshidratación del lodo.	50
Accesos	Pasillos paso peatonal y carretillas. Calles para vehículos	140
Área total		2 740

Tabla 10.4 Equipos para el sistema de vermicomposteo

Equipos	Propósito
Equipo de carga camión de volteo o Camioneta	Transporte de lodo y materiales acondicionadores
Cargador frontal	Movimiento de materiales para: Alimentación de lechos, separación o cosecha de lombrices y retiro de vermicomposta
Sistema de riego automatizado o manual Mangueras o regaderas	Riego de lechos para compensa la evaporación
Trituradora	Trituración de materiales acondicionadores
Cribadora	Cribado de vermicomposta para envasar

Ilustración 10.17 Sistema de vermicomposteo abierto para excretas de bovino, Argentina

Ilustración 10.18 Sistema abierto de vermicomposteo de excretas de bovino, Jalisco

Ilustración 10.19 Sistema cerrado de vermicomposteo con alimentación automatica, Norman Q. Arancon y Clive A. Edwards, 2007

10.4.5.3. Temperatura

E. foetida tolera temperaturas entre 0 ºC y 42 ºC, fuera de ese rango muere. La más rápida conversión del desecho se logra con temperaturas en un rango de 13 a 22 ºC, (Donovan, 1981). (Tsukanoto & Watanabe, 1977), determinaron que con temperaturas de 20 ºC a 25 ºC ocurrió un crecimiento más rápido de formas inmaduras a adultas de E. foetida. Los riegos también van a permitir el control de temperatura, sobre todo cuando es verano. Para fines productivos lo óptimo es mantenerla entre 20 ºC y 25 ºC sobre todo si se requiere una rápida expansión de la población. Esto mismo fue confirmado por (Hartenstein, 1981), quien determinó de manera experimental lo siguiente: las lombrices jóvenes sometidas a temperatura de 15 ºC no alcanzaron su madurez sexual hasta después 80 días, en comparación con las que fueron sometidas a un rango de 20ºC a 28 ºC, las cuales la mayor parte de ellas alcanzaron su madurez sexual a los 50 días. Este comportamiento disminuyo cuando fueron sometidas a temperaturas de 30 ºC. En época de frío la temperatura se puede controlar colocando capas de alimento de más de >20 cm,

Tabla 10.5 Parámetros de control del vermicomposteo

Parámetros básicos	Rangos óptimos para vermi-composteo	Lodo residual
Temperatura	13-22°C	Ambiente
Humedad	80-90 por ciento	80 por ciento Lodos de lecho de secado 10 por ciento de humedad requieren de humectación
Concentración de pH	6-8	6.5 a 8.5 El pH de los lodos municipales generalmente es neutro
Parámetros para vermicomposteo con mezclas	**Rangos óptimos para vermi-composteo**	**Lodo residual**
Tamaño de partículas	Tamaño partículas: 1.3 to 7.6 cm Gray et al. (1971)	1 t m^{-3} El lodo es denso, sin embargo, es un material homogéneo y suave, no necesita triturarse
Densidad de la mezcla	0.4 a 0.6 ton·m^{-3}	
Porosidad	30 a 35 por ciento (Haug Roger, 1979)	
Relación carbono-nitrógeno	30 o 40:1	C/N lodo = 6 a 10
Proteínas	9 a 15 por ciento de proteínas.	El lodo puede variar de 12 a 38 por ciento de proteínas Donovan, 1981.

adicionando material de covertera como paja. Se recomienda llevar un registro diario de temperatura al exterior e interior de los lechos, mediante termómetros con vástago metálico.

Experimentalmente se ha podido comprobar que al interior del lecho la temperatura siempre va a ser menor a la temperatura ambiente como se observa en la Ilustración 10.20, lo que ayuda a proteger a la población de lombrices.

10.4.5.4. Humedad

Las lombrices respiran a través de la piel el oxígeno disuelto, por lo que es necesario tener condiciones de humedad adecuadas. El rango óptimo de humedad está reportado entre 50 a 90 por ciento. El lodo procesado usualmente tiene un 80 a 98 por ciento. Una prueba rápida para medir el porcentaje de humedad en el sustrato se conoce como prueba de puño, la cual consiste en agarrar una cantidad del sustrato con el puño de una mano, posteriormente se le aplica fuerza, lo normal de un brazo y si salen de 8 a 10 gotas es que la humedad está en un 80 por ciento. Para la determinación de la humedad en laboratorio se utiliza el método gravimétrico descrito en la NMX-FF-109-SCFI-2008.

Las lombrices toleran durante horas un exceso de humedad. Cuando llueve torrencialmente las lombrices se salen del sustrato. Se debe evitar encharcamiento permanente, por lo que el proceso de vermicomposteo debe considerar la construcción de un sistema de drenaje.

Para materiales acondicionadores que están secos una forma de aumentar el contenido de humedad consiste en poner agua en la mezcla de desechos mientras estos son mezclados. Los materiales triturados se mezclan homogéneamente y se humectan para alcanzar un porcentaje de humedad entre 70 y 80 por ciento, suficiente para que las lombrices puedan deslizarse ágilmente en los residuos.

10.4.5.5. Concentración de pH

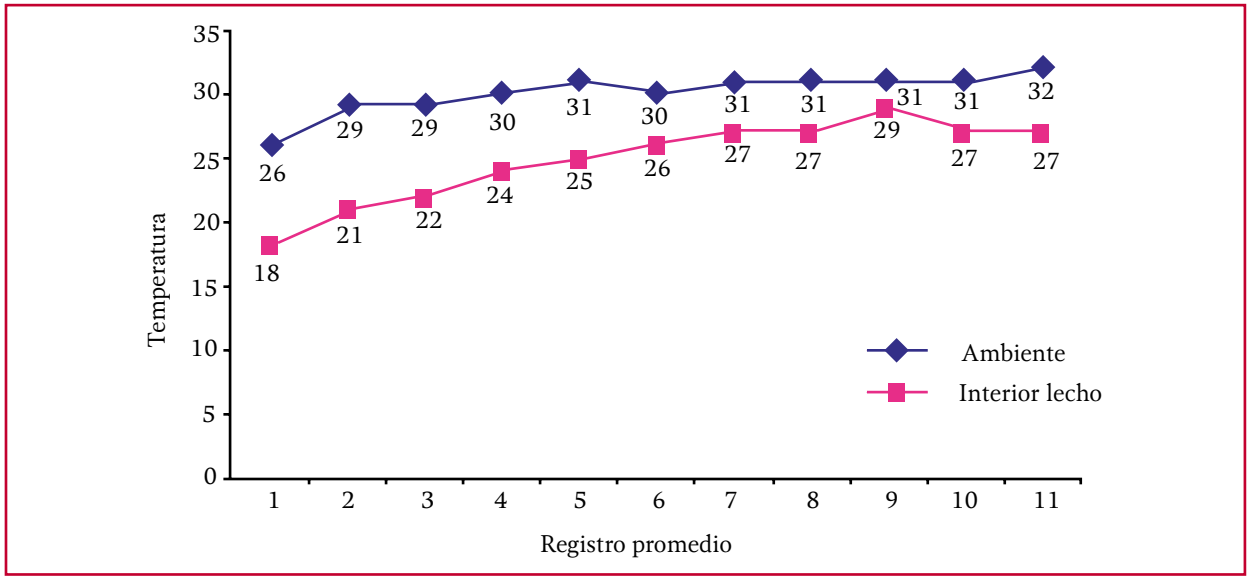
De acuerdo a estudios experimentales llevados a cabo por (Kaplan, et al.,1980), las lombrices mueren después de ser sometidas a un pH <5 o >9, pero sobreviven y ganan peso cuando están expuestas a un pH en un rango de 6 a 9. La mayoría de los lodos municipales oscilan en pH de 6.5 a 8.5. Otros materiales orgánicos con una etapa previa de descomposición (pre-compostados), como los estiércoles de herbívoros (los estiércoles/camas aviares y/o de porcinos requieren consideraciones adicionales) y restos vegetales, normalmente se hallan comprendidos entre 5 (ácido) y 9 (alcalino). Cuando existe una cantidad considerable de materia orgánica con estos valores extremos es invadida por las lombrices, evolucionando el pH gradualmente hacia valores cercanos a 7 (6.8 a 8.0) y que caracteriza a la mayoría de las vermicompostas. Estos valores se pueden medir con un peachímetro ya sea digital o bien recurrir a los que usan los floricultores, de un solo electrodo (funcionan sin pilas, cargándose con la limpieza/frotación. Existen también papeles que se presionan contra el sustrato y el color que adquieren se compara con una escala que acompaña los mismos y que permite aproximar el pH.

10.4.5.6. Parámetros de control del vermicomposteo de lodo con mezcla de materiales acondicionadores

El lodo residual debido a que es un material homogéneo y suave puede usarse como único alimento para las lombrices, se pueden agregar algunos residuos sólidos orgánicos generados en la planta de tratamiento.

Si se requiere de enriquecer el alimento que se da a las lombrices se pueden usar otros materiales acondicionadores disponibles cerca de la planta de tratamiento. El papel de los materiales acondicionadores es asegurar que el proceso aerobio se más rápido, dar mayor estructura y porosidad al lodo. Los materiales acondicionadores son orgánicos, adicionan nutrientes y carbono al lodo, proveen de energía extra al proceso. Muchos materiales agroindustriales pueden servir

Ilustración 10.20 Comportamiento de temperaturas en lechos de vermicomposteo, (Cardoso V., Ramírez C., Garzón Zúñiga, Chacón, & Paredes, 2007)



para el vermicomposteo tales como cascarilla de arroz, bagazo de caña, hojas, estiércol, etc.

En los siguientes subíndices se presentan los principales parámetros de control para llevar a cabo el proceso de vermicomposteo con la mezcla de materiales acondicionadores.

a) Tamaño de partículas

La descomposición de la materia orgánica se lleva a cabo en primer lugar sobre la superficie de las partículas, debido a que la difusión del oxígeno dentro de la película húmeda que cubre las partículas y el sustrato se encuentra disponible para el ataque de los microorganismos y de sus enzimas extracelulares. Partículas pequeñas presentan mayor área superficial por unidad de masa o volumen que las partículas grandes, si la aeración es adecuada las partículas pequeñas se degradaran más rápidamente. Se ha demostrado experimentalmente que el triturado de las partículas incrementa el factor de descomposición en dos (Gray, et al., 1971) recomendaron un tamaño de partículas de 1.3 a 7.6 cm para el composteo en camellones o pilas aereadas. Cálculos teóricos llevados a cabo por (Haug, , 1993), sugieren que en las partículas mayores de 1 mm de espesor, el oxígeno no se puede difundir hasta el centro de la partícula, esto provoca que en estos sitios haya probablemente condiciones anaerobias, y los porcentajes de descomposición sean bajos. En la Ilustración 10.21 se observa el tamaño adecuado de partículas para el composteo y vermicomposteo y el equipo utilizado para la trituración de los materiales.

b) Densidad aparente

El número y densidad de organismos que pueden vivir en un sustrato depende de su densidad. Una densidad baja, generalmente, equivale a más porosidad y mayores agregados del sustrato, cuando los valores son altos, quiere decir que el sustrato es compacto o poco poroso. Un sustrato o residuo bueno para el vermicomposteo deberá tener una densidad baja. El lodo tiene una densidad alta cercana a 1 m^3 ton^{-1}, pero es un sustrato homogéneo y suave, por lo que las lombrices se pueden desplazar sin problemas dentro de él. Cuando se trata de una mezcla la densidad debe estar en un rango de 0.5 a 0.7 g ml^{-1} para asegurar una porosidad adecuada. Si la mezcla no está dentro de este rango se tiene que ajustar adicionando materiales acondicionadores tales como estiércoles, basura de jardín, lirio acuático, residuos de café, etc.

La densidad se mide mediante el método de la probeta. El procedimiento es el siguiente: 1) Pesar una probeta de plástico de 1 000 mL; 2) Vaciar el lodo (mezcla material acondicionador) en la probeta hasta la marca de 1 000 mL; 3) Golpear levemente la probeta con el lodo (mezcla material acondicionador) sobre una superficie plana, tres veces, llenar con otro poco de lodo hasta la marca de 1 000 mL; 4) Volver a pesar; 5) Determinar la masa de suelo (peso de la probeta con suelo-peso de la probeta vacía), mediante la siguiente expresión:

$$Densidad = \frac{Peso}{Volumen}$$

Ilustración 10.21 Tamaño y trituración de partículas para composteo y vermicomposteo

c) Porosidad

La porosidad son los espacios vacíos o poros de un sustrato. La porosidad de un sustrato en el vermicomposteo debe ser alta porque va a permitir la difusión de los gases.

La porosidad puede ser expresada con la relación;

$$P = \frac{V_e}{V}$$

donde:

P = porosidad

V_e = volumen n de espacios vacíos, comprendiendo los que están ocupados por gases o líquidos

V = volumen total de la muestra, comprendiendo sólidos, líquidos y gases

La porosidad se puede medir por el método del desplazamiento del agua, mediante el siguiente procedimiento: 1) Vaciar una muestra de lodo, material acondicionador o mezcla en una probe-

ta de 100 mL hasta alcanzar la marca de 50 mL; 2) Agregar lentamente 50 mL de agua sobre la muestra y dejar reposar hasta que no haya burbujas de aire en la muestra; 3) Medir el volumen alcanzado al finalizar el vaciado, este debe ser mayor a 50 mL; 4) Determinar el volumen que corresponde a los poros del suelo; 5) Explicar los resultados.

Ejemplo:

El V de agua agregada = 50 mL y, suponiendo que el V total sea de 80 mL,

V aire = porosidad = 50 mL-30 mL= 20 mL de porosidad=20 mL (100)/50 mL = 2000/50=40.

d) Relación carbono nitrógeno

La descomposición de los materiales está limitada por la cantidad de carbono y nitrógeno, o expresada por su relación C/N. La relación que se recomienda para el inicio del vermicomposteo es de 30 a 40/1 (Gray, *et al*., 1971), (Poincelot, 1975). Esta relación se debe a que se sabe que los microorganismos necesitan de 30 o 40 partes de carbono para degradar 1 parte de nitrógeno. Con una relación C/N baja se logra desarrollar el composteo, pero éste se retarda debido a que no hay un balance adecuado entre el carbono y el nitrógeno. De acuerdo a (Richards, 1998), cuando la relación C/N es baja la cantidad de nitrógeno es elevada, la mezcla en vermicomposteo puede conducir a procesos anaerobios. Una relación alta (>50/1), también provoca entorpecimiento del proceso porque no hay suficiente cantidad de nitrógeno, lo que imposibilita sostener la masa microbiana. El lodo residual por lo general tiene relaciones C/N muy bajas 5 a 10, con esta relación baja se puede llevar a cabo el proceso de vermicomposteo usando sólo lodo residual. Pero si se quiere obtener una vermicomposta más rica y la planta de tratamiento no tiene problemas de espacio se puede hacer una mezcla con otros materiales ricos en carbono como basura de jardín, que es conveniente agregarlos para acelerar el proceso, Tabla 10.6. Estos materiales reciben el nombre de materiales acondicionadores porque le van a proporcionar al lodo estructura, porosidad, textura, nutrientes y suficiente carbono para aumentar la relación carbono nitrógeno.

Tabla 10.6 Materiales con alto contenido de carbono y nitrógeno, (Dickson, et al., 1991)

Materiales con alto contenido de carbono	C/N
Hojas	30-80:1
Paja	40-100:1
Pedacería de madera o aserrín	100-500:1
Corteza de árbol	100-130:1
Mezcla de papel	150-200:1
Periódico o papel carbón	560:1
Materiales con alto contenido de nitrógeno	**C/N**
Desperdicios vegetales	15-20:1
Granos de café	20:1
Recortes de pasto	15-25:1
Estiércol	5-25:1

Para calcular la relación carbono/nitrógeno de cada material se requiere de tener valores de nitrógeno total Kjeldhal y carbono orgánico o materia orgánica, con los datos de carbono y nitrógeno se sigue el procedimiento descrito en la Ecuación 1 de la Tabla 10.7, para calcular la relación carbono/nitrógeno de cada material.

Para la determinación de los parámetros de carbono y nitrógeno se debe seguir el procedimiento marcado por la NMX-FF-109-SCFI-2008.

Tabla 10.7 Cálculos para la determinación de la relación carbono-nitrógeno en vermicompostas, DOF, 2008

Ecuación 1. Relación carbono-nitrógeno para cada material

$$Relación\ C/N = \frac{\%\ C}{\%\ NTK}$$ Ecuación 10.9

Dónde:

C= carbono orgánico

NTK= nitrógeno total Kjeldhal

Ejemplo:

Si una muestra del lodo tiene una concentración de carbono de por ciento C=32.75 y una concentración de por cientoNTK=3.38, tenemos que la relación C/N del lodo es de: 9.7/1.0

$$Relación\ C/N = \frac{32.75\ \%}{3.38\ \%} = 9.7$$

La relación carbono nitrógeno de este lodo es baja, de acuerdo a este resultado se requiere de agregar un material acondicionador que proporcione una cantidad de carbono adicional para acelerar el proceso de vermicomposteo, que podría ser de acuerdo a la Tabla 10.6 cualquier material con alto contenido de carbono como hojas, paja, pedacería de madera, etc.

10.4.5.7. Cálculos para la determinación de la cantidad de material acondicionador y la relación carbono nitrógeno en la mezcla

Para calcular la cantidad del material acondicionador requerido, así como determinar la relación C/N de la mezcla lodo más material acondicionador se lleva a cabo el procedimiento de cálculo propuesto por Cornell, (2010).

a) Cálculo para la determinación de la cantidad de un material acondicionador
Para llevar a cabo este cálculo se usa la siguiente ecuación:

$$Q_2 = \frac{Q_1 \times N_1 \times \left(R - \frac{C_1}{N_1}\right) \times (100 - M_1)}{N_2 \times \left(\frac{C_2}{N_2} - R\right) \times (100 - M_2)} (Cornell, 2010)$$

Ecuación 10.1

dónde:

Q_2 = Cantidad de material acondicionador necesario

Q_1 = Cantidad de lodo a tratar

N_1 = por ciento N-total del lodo

R = Relación de C/N recomendada (R = 30)

C_1 = por ciento C-orgánico del lodo

M_1 = por ciento humedad del lodo

N_2 = por ciento N-total del material acondicionador

C_2 = por ciento C-orgánico del material acondicionador

M_2 = por ciento humedad del material acondicionador

Para desarrollar el procedimiento se presenta este ejemplo.

Ejemplo 1.-Se tiene una planta de tratamiento que produce una tonelada de lodos, cerca de la región hay disponible lirio acuático porque se encuentran ubicada una laguna. Con el propósito de agilizar el proceso de degradación se requiere mezclar el lodo con el lirio acuático, ¿Qué cantidad de lirio acuático necesitamos para lograr la relación carbono nitrógeno recomendada (C/N = 30). En la Tabla 10.8, se presentan los análisis efectuados al lodo y lirio acuático

Tabla 10.8 Características de lodos de curtiduría y lirio acuático

Material	Carbono orgánico	Nitrógeno Total	Humedad (M)	Relación C/N	Materiales kg (Q)
	por ciento				
Lodo curtiduría	33	3.4	80	10:1	1 000
Lirio acuático	144	6.3	70	23:1	Q_2 =

Sustituyendo las variables de la ecuación con los valores proporcionados en la Tabla 10.8 tenemos:

$$Q_1 = \frac{1000\,kg \times 3.4\,\% \times \left(30 - \frac{33\,\%}{3.4\,\%}\right) \times (100 - 80\%)}{6\,3. \times \left(30 - \frac{144\,\%}{6.3\,\%}\right) \times (100 - 70\,\%)} = 1\,028\,kg$$

Como resultado se tiene que se requieren 1 028 kg de lirio acuático para mezclar con 1 000 kg de lodo de curtiduría.

b) Cálculos para la determinación de la relación carbono nitrógeno de una mezcla de lodo residual con un material acondicionador

Si se cuenta con una mezcla de lodo residual más un material acondicionador y se quiere saber la relación carbono nitrógeno de la mezcla se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$C/N = \frac{Q_1(C/N_1) + Q_2(C/N_2)}{Q_1}\ Cornell, 2010$$

Ecuación 10.2

dónde:

C/N = Relación carbono nitrógeno de una mezcla

Q_1 = Masa o peso del lodo residual

C/N_1 = Relación carbono nitrógeno del lodo residual

Q_2 = Masa o peso del material acondicionador

C/N_2 = Relación carbono nitrógeno del lodo residual

Ejemplo 2.-Se cuenta con una mezcla de lodo residual municipal y un material acondicionador con las características descritas en la Tabla 10.9.

Tabla 10.9 Características de un lodo residual y un material acondicionador

Materiales	Masa Q	C/N
Lodo residual (LR)	Q_1 = 1 000 kg	10:1
Material acondicionador (MA)	Q_2 = 1 028 kg	23:1

Sustituyendo los valores de la ecuación con los valores proporcionados en la Tabla 10.9, se tiene:

$$C/N = \frac{1\,000\,kg_{Q_1}(10/1_{LR}) + 1\,028\,kg_{Q_2}(23/1_{MA})}{1\,000\,kg_{Q_2}} = 34$$

Como resultado se tiene que la relación carbono nitrógeno de la mezcla es de 34, dentro del rango recomendado por (Gray, *et al*., 1971) y (Poincelot, 1975) que es de 30 a 40.

c) Cálculo para la determinación de la cantidad de un segundo acondicionador

Para calcular la cantidad de un segundo material acondicionador se llevan a cabo los cálculos marcados en la siguiente ecuación:

$$Q_3 = \frac{RQ_1N_1(100 - M_1) + RQ_2N_2(100 - M_2) - Q_1C_1x(100 - M_1) - Q_2C_2x(100 - M_2)}{C_3x(100 - M_3) - RN_3(100 - M_3)}$$

Ecuación 10.3

dónde:

Q_3 = Cantidad del segundo material acondicionador

R = Relación de C/N recomendada (R = 30)
Q_1 = Masa o peso del lodo residual
N_1 = por ciento N-total del lodo
M_1= por ciento humedad del lodo
C_1 = por ciento C-orgánico del lodo
Q_2 = Masa o peso del material acondicionador
N_2 = por ciento N-total del material acondicionador
M_2 = por ciento humedad del material acondicionador
C_2 = por ciento C-orgánico del material acondicionador
N3 = por ciento N-total del segundo material acondicionador
M3 = por ciento humedad del segundo material acondicionador
C_3 = por ciento C-orgánico del segundo material acondicionador

Ejemplo 3.-Se tiene un lodo residual municipal de una planta cercana a unas poblaciones agrícolas en donde hay disponibilidad de obtener dos materiales acondicionares provenientes de dos agroindustrias, una es un ingenio de azúcar y otra es una procesadora de arroz. Se quiere saber qué cantidad de bagazo de caña y cascarilla de arroz se tiene que adicionar por cada tonelada de lodo. En la Tabla 10.10, se presentan los resultados de los análisis efectuados a los materiales.

Sustituyendo los valores de la Tabla 10.10 en las ecuaciones correspondientes, se tiene:

Ecuación para determinar la cantidad del, primer material acondicionador:

$$Q_2 = \frac{Q_1 \text{ x } N_1 \times \left(R - \frac{C_1}{N_1}\right) \times (100 - M_1)}{N_2 \times \left(\frac{C_2}{N_2} - R\right) \times (100 - M_2)} (Cornell, 2010)$$

Ecuación 10.4

Sustituyendo

$$Q_2 = \frac{1\,000\ kg \times 2\,\% \times \left(30 - \frac{30\,\%}{2\,\%}\right) \times (100 - 80\%)}{1.2\,\% \times \left(30 - \frac{29\,\%}{1.2\,\%}\right) \times (100 - 5\,\%)} = \sim 877\ kg$$

Ecuación para calcular la cantidad del segundo material acondicionador:

$$Q_3 = \frac{RQ_1N_1(100 - M_1) + RQ_2N_2(100 - M_2) - Q_1C_1 \times (100 - M_1) - Q_2C_2 \times (100 - M_2)}{C_3 \times (100 - M_3) - RN_3(100 - M_3)} Cornell, 2010$$

Ecuación 10.5

Sustituyendo con los valores de la tabla:

$$Q_3 = \frac{30(1000\,kg)_1(2\%)_1(100-80\%_1)+30(877kg)_2(1.2\%)_2(100-5\%_2)-1000kg_1 30\%_1\times(100-80\%_1)-877kg_2 29\%_2\times(100-5\%_2)}{43\%_3\times(100-9_3)-30\times 0.5\%_3(100-9\%_3)}$$
$$= \sim 935\,kg$$

d) Cálculos para la determinación de la relación carbono nitrógeno de una mezcla con dos materiales acondicionadores

Para calcular la relación C/N de la mezcla con lodo y dos materiales acondicionadores, se utiliza la siguiente ecuación:

$$C/N\ mezcla = \frac{Q_1(C_1\times(100-M_1))+Q_2(C_2\times(100-M_2))+Q_3(C_3\times(100-M_3))}{Q_1(N_1\times(100-M_1))+Q_2(N_2\times(100-M_2))+Q_3(N_3\times(100-M_3))}\ Cornell, 2010$$

Ecuación 10.6

dónde:

C/N = Es la relación carbono nitrógeno de una mezcla con lodo y dos materiales acondicionadores

Q_1 = Cantidad de lodo a tratar

C_1 = por ciento C-orgánico del lodo

M_1 = por ciento humedad del lodo

N_1 = por ciento N-total del lodo

Q_2 = Cantidad de material acondicionador necesario

C_2 = por ciento C-orgánico del material acondicionador

M_2 = por ciento humedad del material acondicionador

N_2 = por ciento N-total del material acondicionador

Q_3 = Cantidad de material acondicionador necesario

C_3 = por ciento C-orgánico del material acondicionador

M_3 = por ciento humedad del material acondicionador

N_3 = por ciento N-total del material acondicionador

Relación de C/N recomendada (R = 30)

Siguiendo el ejemplo anterior y sustituyendo la ecuación con los valores de la Tabla 10.10 tenemos que la relación carbono nitrógeno de la mezcla es:

$$C/N\ mezcla = \frac{1\,000\ kg_1\ (30\%_1\times(100-80\%_1))+877kg_2\ (29\%_2\times(100-5\%_2))+935kg_3(43\%_3\times(100-9\%_3))}{1\,000\,kg_1\ (2\%_1\times(100-80\%_1))+877kg_2\ (1.2\%_2\times(100-5\%_2))+935kg_3(0.5\%_3\times(100-9\%_3))}$$
$$= 37$$

Esta mezcla también alcanzó la relación carbono nitrógeno dentro del rango de 30 a 40, recomendado por (Gray, *et al*., 1971) y (Poincelot, 1975).

En síntesis la relación C/N es un importante parámetro de control para el proceso de vermicomposteo cuando se mezcla el lodo con otros materiales acondicionadores. Para calcularlo es

necesario conocer el contenido de nitrógeno, carbono y humedad de las muestras. Es indispensable también contar con materiales acondicionadores disponibles y de bajo costo que representen fuentes adicionales de carbono para el lodo.

10.4.6. Alimentación del sistema de vermicomposteo

10.4.6.1. Prueba de aceptación de alimento

Antes de la puesta en marcha del sistema es necesario llevar a cabo una prueba, llamada Prueba de 50 Lombrices (P50L). Se mide la sobrevivencia de Eisenia foetida después de 48 horas sometida a la temperatura y condiciones ambientales del sitio. Se usan unidades experimentales de forma rectangular con las siguientes medidas que son opcionales: Altura 0.13 m x ancho 0.27 m x largo 0.34 m. En cada unidad experimental se colocan 50 lombrices adultas (cliteladas). Después de 48 horas se verifica si las 50 lombrices se encuentran en condiciones óptimas de salud. La prueba se hace por triplicado (Ilustración 10.22). Para la prueba de 50 lombrices (P50L) es aceptable durante el conteo encontrar 48 lombrices vivas porque puede ser que se mueran 2 debido a la manipulación. Si mueren más de 2 quiere decir que el alimento no reúne las condiciones adecuadas. Por el contrario si todas las lombrices están vivas o al menos 48 se han distribuido en el medio, el alimento ha sido correctamente preparado y se puede proceder a la inoculación de las lombrices en el alimento (Legall, *et al*., 2004).

Los materiales para cubrir los lechos deben ser porosos como, paja, pasto o sintéticas del tipo malla de invernadero y descartarse todo material no poroso que pudiera entorpecer la libre difusión de los gases. Los desechos que se pueden procesar a través del vermicomposteo mezclados con el lodo y que constituyen el alimento de las lombrices pueden ser materiales orgánicos de diverso origen, Tabla 10.11. Estos materiales se puede usar solos o en forma combinada, dependiendo del costo y disponibilidad.

10.4.6.2. Tipo de alimentación

La alimentación del sistema puede ser periódica, cada semana una nueva mezcla de alimento se coloca encima del lecho, las lombrices por sí solas suben a buscar el alimento fresco. La alimen-

Ilustración 10.22 Pruebas de aceptación de alimento

Tabla 10.10 Materiales para alimentación de las lombrices

Residuos caseros
Desperdicios de comida, papel de baño, servilletas, residuos de jardín, papel, cartón, etc.
Residuos municipales
Basura orgánica municipal, basura orgánica de mercados y centros comerciales.
Lodo residual de plantas de tratamiento municipal.
Lodos de azolve.
Residuos orgánicos de rastros municipales.
Residuos de jardinería municipal.
Residuos cloacales.
Residuos agroindustriales
Desperdicios agrícolas o agroindustriales: residuos de cultivos de cebollas y de café.
Estiércoles: gallinaza, vacuno y ovino.
Residuos vitivinícolas.
Plantas frutales.
Residuos industriales
Residuos orgánicos de curtidurías.
Lodos residuales de plantas de tratamiento de la industria textil.

tación puede ser manual o mediante un cargador frontal. Las capas de alimento que se coloquen no deben ser muy gruesas (<15 cm), para evitar que se formen condiciones termofílicas. Es necesario llevar una bitácora con los registros de alimentación, Ilustración 10.23.

Otro tipo de alimentación es la autosiembra que consiste en que las lombrices son alimentadas con una dosis de alimento única, una vez que el alimento se termina se aplica una nueva dosis a un lado, las lombrices migrarán hasta esta nueva fuente de alimento por sí solas. En la Ilustración 10.24, se observa esquemáticamente la dirección de la alimentación en un vermicultivo por autosiembra.

10.4.6.3. Degradación del alimento

La degradación del material orgánico se lleva a cabo mediante la simbiosis que se forma entre Eisenia foetida y microorganismos aeróbios. La degradación de la materia orgánica se lleva a cabo por todos los organismos de la población, incluidos los cocones. Muchos estudios se han llevado a cabo para demostrarlo, entre los cuales destacan los realizados por (Dante & Haggblom., 1999), los cuales inocularon en un suelo estéril la bacteria Ralstonia eutropha y los cocones de Eisenia foetida, se demostró que los cocones tuvieron la capacidad de adquirir estas bacterias degradadoras en una concentración de

Ilustración 10.23 Alimentación y riegos periódicos del sistema de vermicomposteo de San Nicolás de Ibarra, Jalisco.

Ilustración 10.24 Sistema de vermicomposteo con alimentación en auto siembra

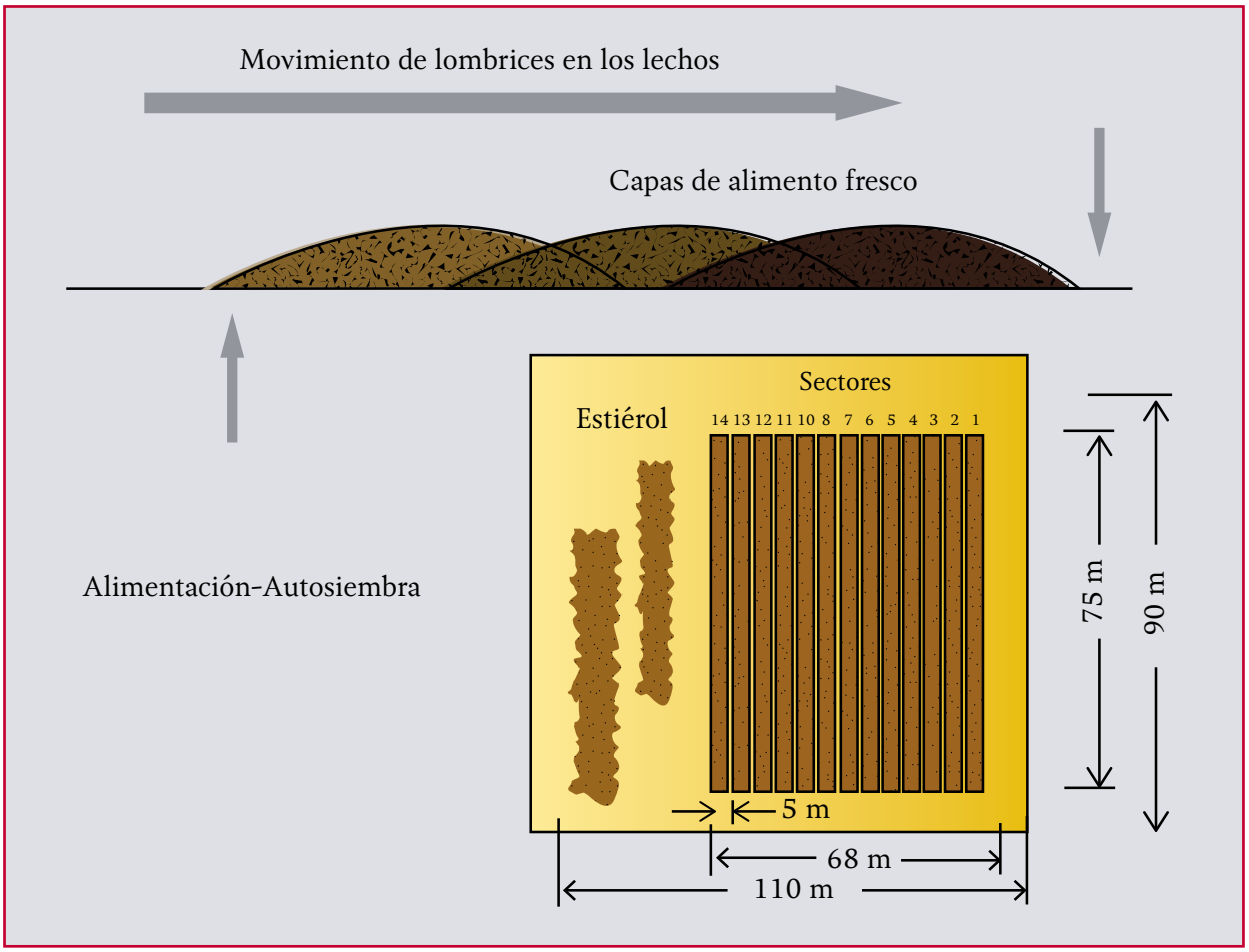
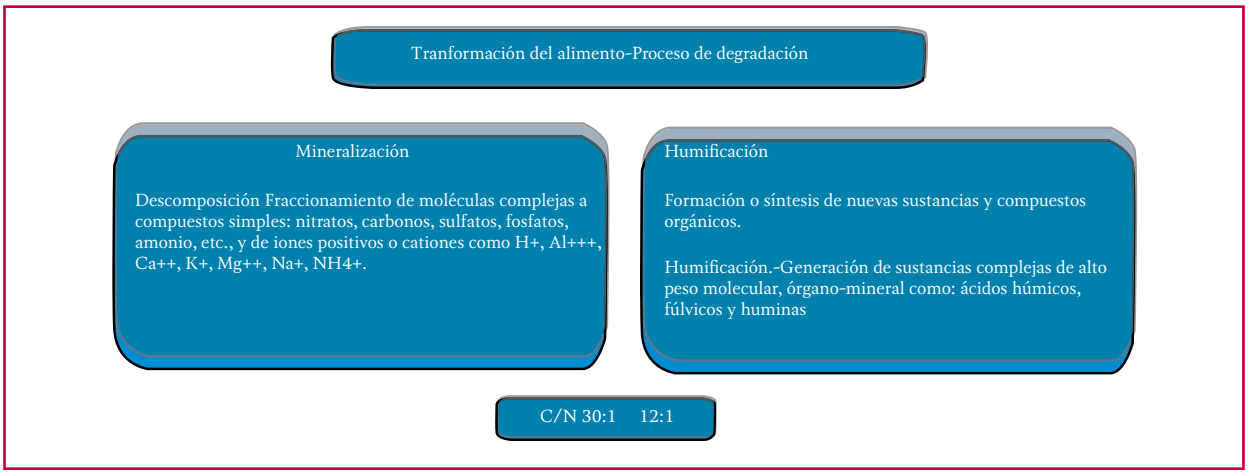


Ilustración 10.25 Proceso de transformación del alimento en el vermicomposteo



104 a 105 CFU de R. eutropha/cocon, por lo cual los autores de esta investigación concluyeron que los cocones de E. foetida tienen la capacidad de adquirir bacterias del medio ambiente en el cual se producen. La microbiota influye sobre la sobrevivencia de los cocones que es expuesta a químicos tóxicos. Los cocones pueden ser usados como inoculantes de bacterias benéficas con capacidades de biodegradación.

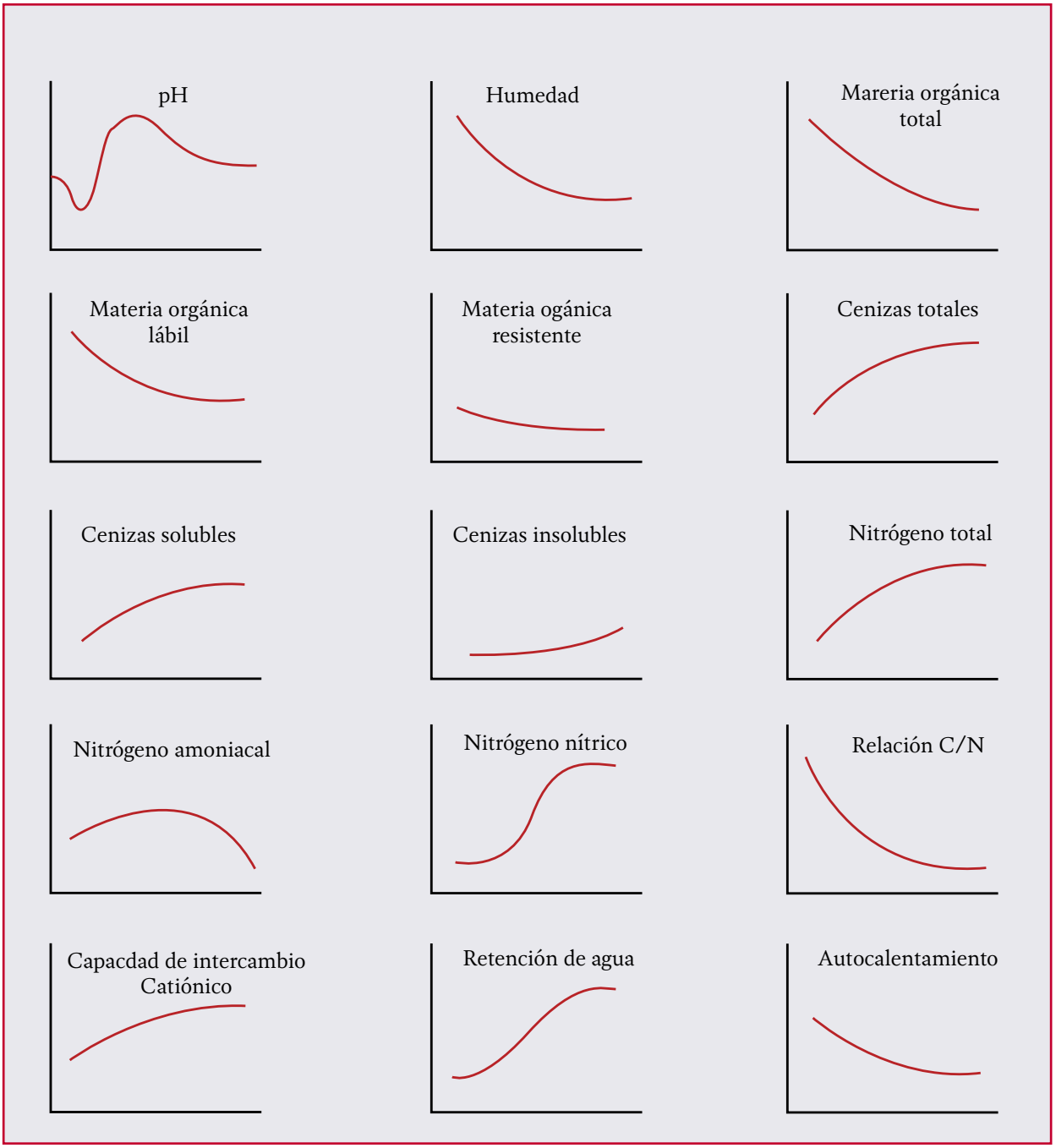
El proceso de transformación que se llevan a cabo durante el vermicomposteo se resumen en la Ilustración 10.25, el cual está comprendido en dos etapas: la mineralización que es la degradación de las moléculas complejas a compuestos simples y la humificación que es la formación o síntesis de sustancias complejas y estables. Ambos procesos se llevan a cabo secuencialmente y permiten al final tener un material estable.

La degradación de un residuo orgánico por las lombrices se puede apreciar a simple vista el residuo de un material heterogéneo se va a convertir en un material homogéneo y granular, como se puede apreciar en la ilustración Ilustración 10.26, donde, se observa la transformación del lodo residual en un biosólido con pequeños gránulos.

Durante la degradación de la materia orgánica el volumen del residuo disminuye debido en parte a su transformación biológica a biomasa de lombriz y biomasa microbiana y a su transformación química la cual involucra reducción de solidos, por perdida de CO_2 durante la respiración y

Ilustración 10.26 Transformación del lodo residual a un biosólido granular

Ilustración 10.27 Cambios en parámetros fisicoquímicos de la materia orgánica durante el vermicomposteo (ejes verticales) durante el transcurso del proceso (eje horizontal), Khiel, 1985, modificado por Capistran, ***et al.***, 2001)



agua por evaporación. Capistran, et al. (2001), mencionan que durante la transformación del residuo inicial hasta quedar como abono, se da una reducción de volumen de 70 por ciento, quedando sólo un 30 por ciento como biosólido.

La medición de la degradación de la materia orgánica en el proceso de vermicomposteo se puede llevar a cabo con diferentes parámetros. De acuerdo a la norma NMX-FF-109-SCFI-2008 relativa a las especificaciones de calidad del hu-

mus de lombriz, la madurez es el grado de estabilización orgánica resultante en el producto terminado de un humus de lombriz, y puede verificarse con los parámetros de relación de carbono nítrogeno (≥20) y capacidad de intercambio catiónica (0.40 cmol kg^{-1}). En la Ilustración 10.27, se pueden observar las tendencias de aumento o disminución de diferentes parámetros indicativos con relación al tiempo, en los ejes verticales se aprecian las transformaciones de los valores de los parámetros y en los ejes horizantales el tiempo transcurrido durante el proceso. En los primeros días los cambios son intensos y van disminuyendo a medida que la materia orgánica se va estabilizando. Estos cambios tienen valores diferentes de acuerdo al residuo que se trate, (Capistran, *et al*., 2001).

En un estudio sobre la degradación de lodo durante el vermicomposteo se midió el comportamiento de la reducción en la relación de STV/ST. En la Ilustración 10.28, se observa como con el bioensayo 1 se logró obtener una reducción del 35 por ciento en esta relación y en el bioensayo 2 se logró obtener una reducción de 31 por ciento. La evaluación se llevó a cabo mediante el análisis durante una semana de 6 muestras y se demostró que las lombrices son capaces de degradar semanalmente una carga de alimento (Cardoso, *et al*., 2010).

10.4.6.4. Cosecha de lombrices

Después de un periodo de tiempo en el cual las lombrices han tenido la oportunidad de transformar todas las capas del residuo en humus se procede a recuperar la vermicomposta de la siguiente forma: Se coloca una capa de residuos frescos encima del sustrato superior, las lombrices migrarán de las capas inferiores hasta la nueva capa y de esta forma pueden separarse del humus, que se encuentra en las capas inferiores. Las lombrices junto con los residuos que sirvieron de trampa se colocan en el mismo lecho o en uno nuevo (cuando se está en etapa de expansión del sistema), donde cada semana se agregará más material, continuándose así el ciclo de producción.

Ilustración 10.28 Comportamiento de la relación STV/ST

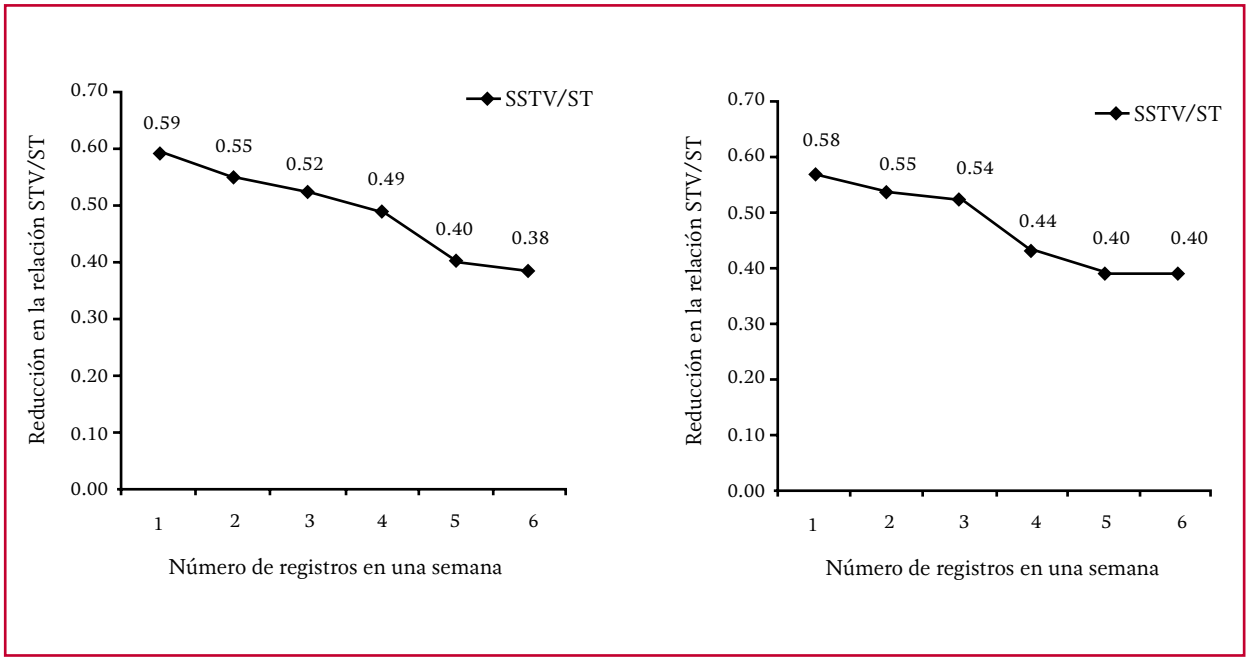


Tabla 10.11 Pronostico de producción de lombrices y humus, Arancon y Clive, 2007

c	3 meses	6 meses	9 meses	12 meses
Población inicial de lombrices	1ª Generación	2ª Generación	3ª Generación	4ª Generación
1000	10.000	100.000	1.000.000	10.000.000
Lombrices 1 kg	10	100	1.000	10.000
Alimento 1 kg d^{-1}	10	100	1.000	10.000
Lombricompuesto 0.6 kg d^{-1}	6	60	600	6.000
Proteína 0.04 kg d^{-1}	0.4	4	40	400

Algunos autores recomiendan dividir la población original por lo menos tres veces al año. Las divisiones se realizarán durante la cosecha, efectuando una primera división en marzo, otra en septiembre y una tercera en diciembre. Siendo en la primavera y verano en el que la lombriz se reproduce con mayor frecuencia. La cosecha se puede llevar a cabo de forma manual o mediante un cargador frontal.

10.4.6.5. Preparación de la vermicomposta para envasar

La vermicomposta que ha sido separada de las lombrices se traslada al área de secado y cribado. La preparación del humus consiste en secar el material a la intemperie hasta que se reduzca de 10 o 20 por ciento la humedad original. La vermicomposta se puede disponer formando una pila cónica y almacenar de esta forma o bien cribarla. El propósito de cribarla es obtener un producto de una granulometría más fina y homogénea, un material de esta calidad puede envasarse más fácilmente en recipientes de 1 hasta 50 kg, en la Tabla 10.12 se observa la posible producción de biomasa y humus durante el transcurso de un año, esto varía de acuerdo a las condiciones de operación y el tipo de alimento.

10.4.7. Características y aprovechamiento de la vermicomposta

La vermicomposta de lodo es de color oscuro, granulado, homogéneo y con un olor agradable a tierra húmeda. Contiene un elevado porcentaje de materia orgánica estabilizada producto del proceso digestivo de la lombriz y de la actividad microbiana. Posee una elevada carga microbiana del orden de millones de unidades formadoras de colonias, contribuyendo así al incremento de la flora microbiana del suelo. Es un mejorador de suelos, ya que renueva las características físico-químicas del suelo, por ejemplo mejora la estructura haciéndola más permeable al agua y al aire; aumenta la retención hídrica; regula el incremento y la actividad de los nutrimentos del suelo; neutraliza la presencia de contaminantes (insecticidas, herbicidas) debido a su capacidad de absorción. Evita y combate la clorosis férrica, facilita la eficacia del trabajo mecánico en el campo, aumenta la resistencia a las heladas y favorece la formación de micorrizas. La actividad residual de la vermicomposta se mantiene en el suelo hasta cinco años. Al tener un pH neutro no presenta problemas de dosificación ni de fitotoxicidad, aún en aquellos casos en que se utiliza pura. Puede almacenarse durante mucho tiempo sin que sus propiedades se vean alteradas,

Tabla 10.12 Especificaciones Fisicoquímicas del Humus de Lombriz (vermicomposta)

Característica Valor	Valor NMX-FF-109-SCFI-2008*	Vermicomposta**
Nitrógeno total	De 1 a 4 por ciento (base seca)	1.27 por ciento
Materia orgánica	De 20 por ciento a 50 por ciento(base seca)	55.1 por ciento
Relación C/N (Parámetro de madurez)	≤20	25.15
Capacidad de intercambio catiónico (Parámetro de madurez)	> 40 cmol kg^{-1}	122 cmol kg^{-1}
Humedad	De 20 a 40 por ciento (sobre materia húmeda)1	57.4 por ciento
pH	de 5.5 a 8.52	4.51
Conductividad eléctrica***	≤ 4 dS m^{-1}	1.266 dS m^{-1}
Densidad aparente sobre materia seca (peso volumétrico)	0.40 a 0.90 g mL^{-1}	0.4168 g mL^{-1}

*DOF, 2008

**Cardoso, 2010

***dS m^{-1} = decisiemens X metro

pero es necesario mantenerla bajo condiciones óptimas de humedad (40 por ciento). La vermicomposta de lodo debe analizarse bajo los parámetros de la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, porque el lodo está regido por esta norma.

Para la determinación de las características agronómicas de la vermicomposta de lodo, se puede hacer uso de los parámetros que determina la Norma Mexicana NMX-FF-109-SCFI-2008, que establece las especificaciones de calidad que debe cumplir el humus de lombriz que se produce o se comercializa en territorio nacional. En la Tabla 10.13 se muestra la composición agronómica de la vermicomposta de lodo residual.

Si la vermicomposta cumple con los objetivos del proceso y de la normatividad vigente que es la reducción de patógenos (Lodo Clase A), la presencia de metales pesados dentro de las concentraciones límites (Lodo de Tipo Excelente), la estabilidad del producto (>38 por ciento STV, relación C/N ≤20 y CIC> 40 cmol kg-1), y la presencia de materia orgánica (De 20 por ciento a 50 por ciento(base seca), nutrientes (Nitrógeno total de 1 a 4 por ciento base seca), entonces puede ser usada sin restricciones.

Enfermedades de las lombrices

Las lombrices tienen pocos enemigos, entre los cuales se encuentran: roedores, aves, hormigas, planarias y ácaros rojos. Como recomendaciones generales es necesario limpiar el área de los lechos, no dejar que crezcan plantas donde se pueden alojar estos animales. Evitar acumular materiales innecesarios para la operación del sistema. El drenaje y la ventilación deben ser suficientes. Los riegos y alimentación deben estar debidamente programados. Y se debe procurar estar dentro de los rangos de los parámetros básicos de operación como son: Humedad (80-90 por ciento), Temperatura (20-25 °C); y pH (6-8).

10.5. Criterios de diseño

De acuerdo a (Donovan, 1981), la velocidad de degradación que se puede alcanzar durante el vermicomposteo se controla mediante dos variables:

1. Tasa de alimentación individual de los organismos
2. Densidad de población de lombrices

De acuerdo a este autor el producto de estos dos valores provee los criterios de diseño para estimar la tasa de degradación del lodo por unidad de volumen o por unidad de área.

1) Tasa de alimentación o relación Lodo/ Lombriz

La expresión lógica para la tasa de alimentación en el vermicomposteo sería el lodo consumido por día entre el peso húmedo de las lombrices entre los días totales de conversión, lo que se demuestra en la siguiente ecuación:

$$Realacion\ Lodo/Lombriz = \frac{\frac{PSL(Lodo)}{PHL(lombrices)}}{dia}$$

Ecuación 10.7

dónde:

L/L = relación de alimentación lodo/ lombriz

PSL = Peso seco del lodo

PHL = Peso húmedo de las lombrices

De acuerdo a Donovan el término relación lodo-lombriz (L:L) puede ser aplicado a cualquier operación de vermicomposteo, a pesar del contenido de humedad del lodo o de la profundidad a la que el lodo es aplicado. Esta puede servir como principal criterio en el diseño de futuros sistemas de vermicomposteo de lodo y está relacionada directamente a los requerimientos del proceso. Cabe hacer mención que la relación L:L depende mucho de la definición de "conversión total" que es el punto en el cual la conversión del lodo a humus es completa (Camp, 1981). Con el conocimiento de los días de conversión total, de la cantidad de material que pasa a través del tubo digestivo de la lombriz por unidad de tiempo, para determinado tipo de lodo, se permite la predicción de la cantidad de lodo que se puede tratar por unidad de tiempo. En este estudio propuesto por Donovan, se evaluaron las tasas de alimentación de seis sitios de vermicomposteo de lodos con diferentes condiciones de operación y se demostró un rango en la relación de alimentación L/L de 120 a 275 g de lodo (peso seco) por kilogramo de lombrices/día.

Densidad de población de lombrices

La segunda variable importante que menciona este autor es la densidad de lombrices por área (lombrices/m^2 o lombrices/m^3). Con el propósito de llevar un registro del comportamiento y crecimiento de la población de lombrices, se requiere de extraer varias muestras del lecho de vermicomposteo, mediante un extractor que puede ser elaborado con varillas o clavos y un marco de madera, el número de muestras dependerá de la precisión que se quiera obtener. En la ilustración 10.29, se presenta una secuencia de extracción de la muestra. Una vez obtenida la muestra se separan las lombrices del sólido y se cuentan manualmente.

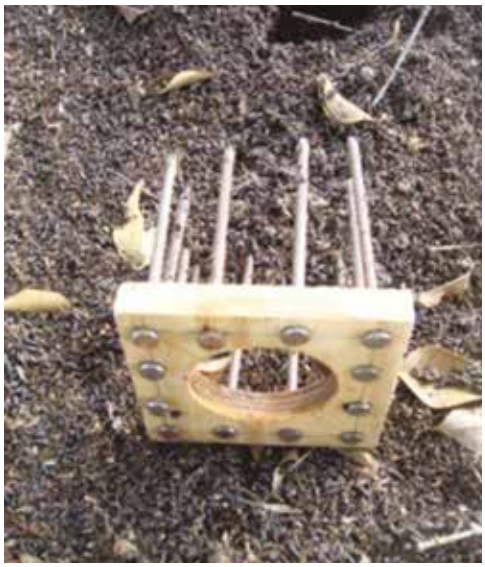
Para los cálculos se debe tener el registro del área o volumen del extractor y del área del lecho de vermicomposteo. Se cuentan por separado las lombrices adultas (cliteladas), las jóvenes y cocones (cada cocón se registra como una lombriz). El número total de lombrices se divide entre el área o volumen del lecho para obtener la densidad nominal de la población. Con la Ecuación 10.9 se procede a llevar el cálculo.

$$Numero\ de\ lombrices = \frac{Numero\ de\ lombrices\ x\ area\ del\ lecho}{Area\ del\ extractor\ m^2}$$

Ecuación 10.8

Para ejemplificar la aplicación de estas variables Donovan proporciona un estudio de caso con una

Ilustración 10.29 Secuencia de muestreo para determinar la densidad de población de lombrices



Extractor de muestras

Muestreo

Muestreo

Conteo de lombrices

planta de vermicomposteo ubicada en Lufkin, Texas. Es una planta de vermicomposteo de lodos primarios espesados y lodos activados asperjados sobre lechos empacados con aserrín. Esta planta contaba en 1 979 con 175 m^2 de lechos de vermicomposteo capaces de recibir 1 200 L d^{-1} de lodo líquido con 3.5 a 4.0 por ciento de sólidos. El lodo era asperjado sobre lechos empacados con aserrín que era utilizado como material base y lombrices. La altura de la capa de aserrín era de 15 a 20 cm. Cada dos meses era agregada una nueva capa de aserrín de 2.5 a 5.0 cm. Cada seis a doce meses se retiraba la vermicomposta junto con las lombrices y se instalaban camas o lechos nuevos. Las lombrices eran separadas de la vermicomposta por una técnica de migración que consistía en colocar encima del camellón y al lado mezcla sin procesar, de esta forma se esperaba la migración de las lombrices a la mezcla nueva de alimento, quedando separadas la vermicomposta y las lombrices que serán recicladas al sistema. La densidad estimada de lombrices era de 2 000 g m^{-2}, valor dentro del rango usado por varios vermicultores de la región. El producto de la relación L/L y la densidad real

Tabla 10.13 Costos de inversión y operación para un sitio de vermicomposteo de 1 tonelada de lodo líquido por día, (Donovan, 1981)

Costos de inversión	Costos		Costos anuales	
	USD	MN[1]	USD	MN
Construcción	60,000	789,924		
Lombrices[2]	25,000	329,135		
Cargador frontal (Bobcat)	40,000	526,616		
Subtotal	125,000	1,645,675	15,625	205,781
Costos de operación				
Mano de obra			7,500	98,741
Servicios			5,000	65,827
Mantenimiento			2,900	38,180
Otros			4,700	61,877
Subtotal			20,100	264,625
Total	125,000	1,645,675	38,100	501,602

Tipo de cambio $13.17 por dólar (10/09/2013).

$5.80 USD por kilogramo. México $500 a $1,000.

Se pueden iniciar con menos lombrices porque el número de lombrices se puede triplicar en tres meses. Se asume que las lombrices se deben comprar sólo una vez, porque el número de lombrices se debe mantener o incrementar.

de una población de lombrices provee una relación de carga en términos de peso de lodo convertido a humus por unidad de tiempo por unidad de área, bajo condiciones constantes. En el ejemplo de Lufkin esta relación de carga era de 245 g de lodos/2 000 g lombrices /m^2 /d = 0.123 g m^2 d^{-1}.

Otro ejemplo proporcionado por este autor es la planta de Keysville, Maryland. Esta planta de vermicomposteo en lechos cubiertos, trataba lodo estabilizado aerobicamente y secado al aire, la carga es de 1 750 g m^2 d^{-1}, que sugiere que es posible operar con cargas altas bajo las condiciones apropiadas.

Donovan proporciona otro ejemplo para el análisis de los requerimientos y costos de una planta a escala real que sirve a una población de 10 000 a 15 000 personas. La planta genera 1 ton de lodo (en base húmeda) por día. La tasa promedio de conversión es de 400 g m^2 d^{-1}, se requiere cerca de 2 400 m^2 de área de lechos, lo que se suma a un área adicional para equipo de bombeo de lodo y accesos de 300 m^2. En la Tabla 10.14 se presentan los costos de inversión que incluyen construcción, pies de cría y equipo, estos costos están dados en dólares y actualizados a moneda nacional al tipo de cambio actual, no incluye el costo del terreno y acondicionamiento. Puede haber variaciones en los costos de acuerdo a las condiciones locales de la planta. Conforme con Donovan se requieren 4 540 kg de lombrices para la puesta en marcha del sistema.

10.6. Estudios de caso

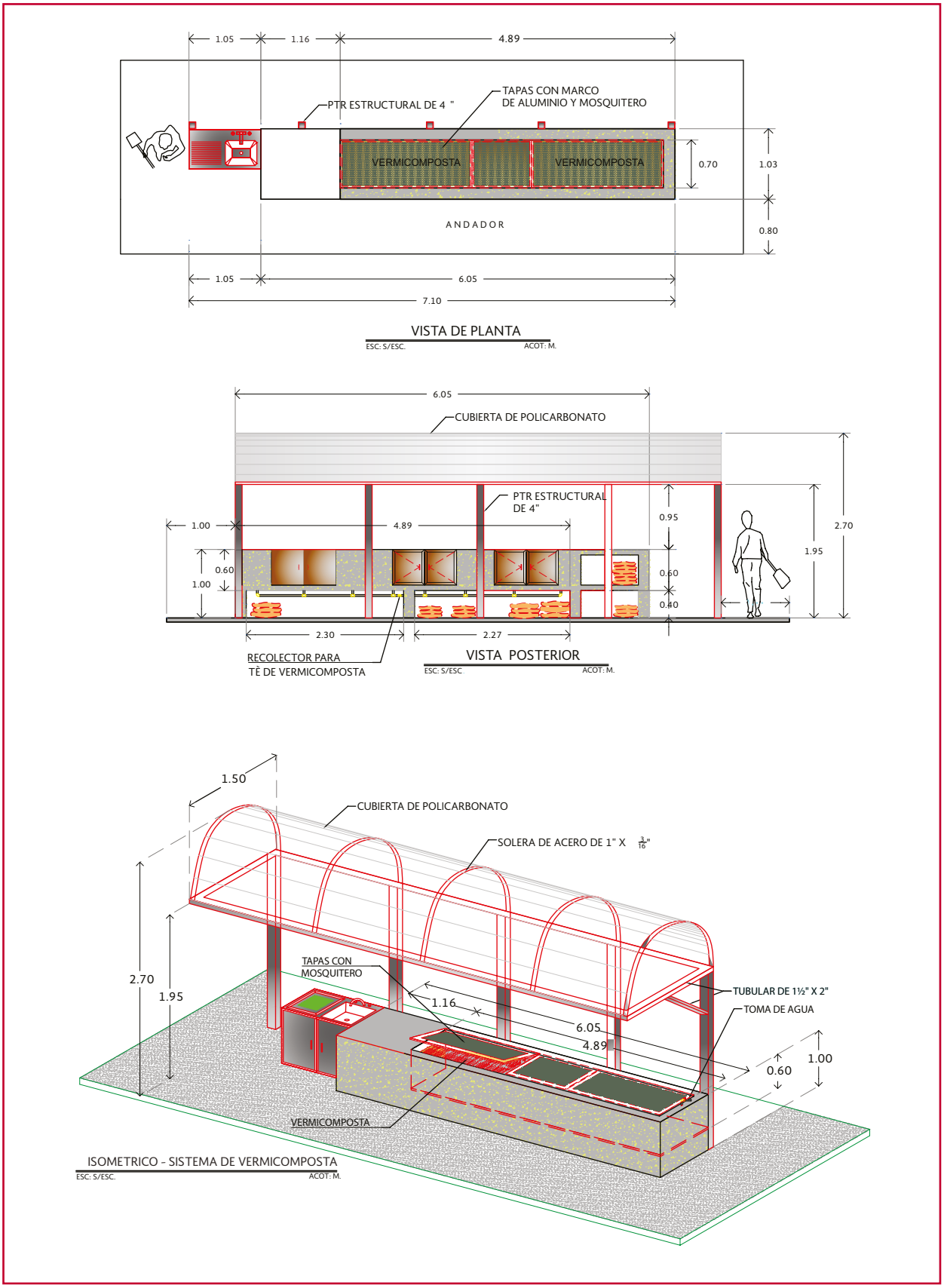
En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) se desarrolló tecnología para el tratamiento y aprovechamiento de lodos residuales por medio del vermicomposteo de estos residuos. La tecnología consiste en la vermicomposteo del lodo residual. El desarrollo experimental de la tecnología se inició en 1998 en las instalaciones del IMTA (laboratorio de Calidad del Agua y Planta Piloto). En 1999, la Comisión Nacional del Agua se interesó por la idea de esta nueva alternativa para el tratamiento de lodos y solicitó que se hicieran estudios más detallados

Ilustración 10.30 Estudios experimentales de vermicomposteo

sobre el vermicomposteo, por lo que como parte de un proyecto contratado por esta institución se hicieron varias pruebas experimentales, fotos 1 y 2. El objetivo de estos estudios fue desarrollar tecnología para el vermicomposteo de residuos sólidos de plantas de tratamiento, residuos industriales, agroindustriales y municipales La vermicomposta obtenida fue probada con éxito en el crecimiento de plantas ornamentales en condiciones de vivero, (Cardoso, *et al*. 1999).

Ilustración 10.31 Sistema de vermicomposteo IMTA para una planta de tratamiento de <1 $L \cdot s^{-1}$

Ilustración 10.32 Esquemas del vermicompostero del Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua



10.6.1. Vermicomposteo para una planta de menos de 1 L s^{-1}

En 1999 se instaló en el IMTA el primer módulo de vermicomposteo a escala real para el tratamiento de los lodos generados en la planta de tratamiento del Instituto (aereación extendida, Q = 1 L s^{-1}), el cual sigue operando exitosamente hasta la fecha. Este módulo sirve para dar capacitación sobre esta tecnología y además para difundirla a través de todos los grupos que visitan el Instituto, el sistema tiene las siguientes características:

- Techo de policarbonato
- Un solo lecho de forma rectangular construido con tabique y cemento
- Dimensiones son: 4.70 m largo × 0.74 m ancho × 0.50 m altura
- Densidad de población, aproximadamente 50 000 a 70 000 lombrices en un área de 3.5 metros cúbicos
- Lombrices de la especie: Eisenia foetida.
- Se alimenta con la generación del lodo residual de la planta de tratamiento (250 kg /semana), basura de jardín, lirio acuático, algas y desperdicio de comida
- Producción de anual de vermicomposta de: 2 a 3 metros cúbicos

10.6.2. Vermicomposteo para la planta de tratamiento de San Nicolás de Ibarra

En el año 2000 se seleccionó la planta de tratamiento de San Nicolás de Ibarra, en Chapala, Jalisco para instalar un sistema a escala real. El sistema de vermi-estabilización propuesto para la planta fue diseñado para el tratamiento de 1.2 m^3 de lodo deshidratado (20 por ciento de humedad), por semana. El área total del sistema es de 59.4 m^2, esta superficie incluye dos lechos de lombrices más los espacios de trabajo. Mediante la operación sencilla y económica del sistema, que sólo incluye la alimentación semanal, se logró cambiar la categoría del lodo de un residuo peligroso a un producto de alta calidad agrosanitaria, con contenido de nutrimentos (nitrógeno, fósforo y potasio) y micro nutrientes. Además se logró obtener un biosólido estabilizado libre de olores y vectores, ya que se obtuvo un 38 por ciento de reducción de sólidos volátiles. Actualmente sigue funcionando. En las siguientes ilustraciones se observa el sistema, el diseño del sistema, así como las diferentes etapas constructivas.

En el año 2000 se seleccionó la planta de tratamiento de San Nicolás de Ibarra, en Chapala, Jalisco para instalar un sistema a escala real. El sistema de vermi-estabilización propuesto para la planta fue diseñado para el tratamiento de 1.2 m^3 de lodo deshidratado (20 por ciento de humedad), por semana. El área total del sistema es de 59.4 m^2, esta superficie incluye dos lechos de lombrices más los espacios de trabajo. Mediante la operación sencilla y económica del sistema, que sólo incluye la alimentación semanal, se logró cambiar la categoría del lodo de un residuo peligroso a un producto de alta calidad agro sanitaria, con contenido de nutrimentos (nitrógeno, fósforo y potasio) y micro nutrientes. Además se logró obtener un biosólido estabilizado libre de olores y vectores, ya que se obtuvo un 38 por ciento de reducción de sólidos volátiles, fotos seis a ocho.

Ilustración 10.33 Vermicompostero de San Nicolás de Ibarra, Chapala, Jalisco

Ilustración 10.34 Vermicompostero de Chapala, Jalisco

10.6.3. Vermicompostero para la planta de tratamiento de Chapala

Después de trece años de operación, el sistema de vermicomposteo de San Nicolás de Ibarra sigue trabajando eficientemente. Ante estos resultados las autoridades de la Comisión Estatal de Jalisco (CEA) se propusieron como meta la expansión de esta tecnología a otras plantas de tratamiento por lo que contrataron al IMTA en la asesoría para la instalación del sistema de vermicomposteo de lodos en la planta de tratamiento de Chapala.

La CEA, ya tenía programas de aprovechamiento de los lodos generados en la planta de Chapala, de los cuales un porcentaje es repartido entre los agricultores de la región, con buenos resultados en la producción agrícola (Marin & Oses, 2013). El propósito de introducir esta tecnología en la Planta de Chapala fue instalar un sistema demostrativo de vermicomposteo, donde se tratara una parte del lodo generado, en Ilustración 10.35, se muestran imágenes del vermicompostero de Chapala.

Otro de los propósitos del CEA Jalisco, para el establecimiento del vermicompostero fue la capacitación en la planta de técnicos y estudiantes de la región sobre esta tecnología.

Ilustración 10.35 Capacitación por parte del personal del CEA a estudiantes de la región sobre vermicomposteo de lodos

11

Estabilización alcalina

11.1. Introducción

El tratamiento de los lodos de aguas residuales con productos alcalinos es frecuentemente utilizado. La adición de productos alcalinos al lodo, cumpliendo con los criterios de diseño, permite una estabilización parcial del lodo, la reducción de olores y la atracción de vectores. También disminuye la concentración de microorganismos patógenos como bacterias y virus.

Diferentes materiales pueden utilizarse para realizar la estabilización alcalina, la cal es la más utilizada $Ca(OH)_2$. Este producto también se utiliza para la reducción de olor, para incrementar el pH en los reactores y para la remoción de fósforo en el tratamiento avanzado de las aguas residuales. Actualmente el uso más común de la cal en el tratamiento de aguas residuales es para el acondicionamiento del lodo antes del desaguado.

11.2. Objetivos

Los principales objetivos de esta tecnología son:

- Estabilización parcial del lodo
- Reducción de microorganismos patógenos
- La producción de un biosólido tipo B, que puede usarse como acondicionador de suelos ácidos, en usos forestales y agrícolas
- La producción de un biosólido tipo A, utilizando procesos de estabilización alcalina avanzada

11.3. Bases teóricas

El proceso de estabilización alcalina, consiste en adicionar cal u otro material alcalino al lodo para elevar el pH y requiere un tiempo de contacto específico. A un pH superior a 12 y con suficiente tiempo de contacto, los patógenos y microorganismos pueden ser inactivados o destruidos. Las características físicas y químicas del lodo también se alteran por las reacciones que ocurren. Durante el contacto del lodo con la cal las moléculas complejas se transforman por medio de reacciones de hidrólisis y saponificación. Algunas de estas reacciones son:

Inicialmente, la adición de cal eleva el pH del lodo. Entonces las reacciones anteriores ocurren. Si la cal que se adiciona no es suficiente, el pH disminuye al ocurrir estas reacciones. Por lo tanto se requiere un exceso de cal.

La actividad biológica produce compuestos, tales como dióxido de carbono y ácidos orgánicos que reaccionan con la cal. Si la cal que se adiciona no es suficiente para detener la actividad biológica se producen estos compuestos que reducen el pH, producen malos olores impidiendo la estabilización del lodo.

Tabla 11.1 Reacciones con constituyentes inorgánicos

Calcio	
$Ca^{+2} + 2HCO_3^- + CaO \rightarrow CaCO_3 + H_2O$	Ecuación 11.1
Fósforo	
$2PO_4^{-3} + 6H^+ + 3CaO \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 + 3H_2O$	Ecuación 11.2
Dióxido de carbono	
$CO_2 + CaO \rightarrow CaCO_3$	Ecuación 11.3
Ácidos	
$RCOOH + CaO \rightarrow RCOOCaOH$	Ecuación 11.4
Grasas	
Grasa + CaO → ácidos grasos.	Ecuación 11.5

En este proceso no hay reducción directa de materia orgánica lo que causa dos importantes impactos:

- La adición de cal hace al lodo químicamente estable. Si el pH cae por debajo de 11, la descomposición biológica se reanuda, produciendo olores nocivos
- No hay reducción en la cantidad de lodo para disposición, como ocurre con los métodos de estabilización biológica. Por el contrario, la masa del lodo seco aumenta por la adición de cal y por la precipitación química que se deriva del proceso

11.3.1. Eficiencia del proceso

Un sistema de encalado o post-encalado reduce el olor y la producción potencial de olor en el lodo, reduce los niveles de patógenos y mejora las características de desaguado del lodo.

11.3.1.1. Reducción de olor

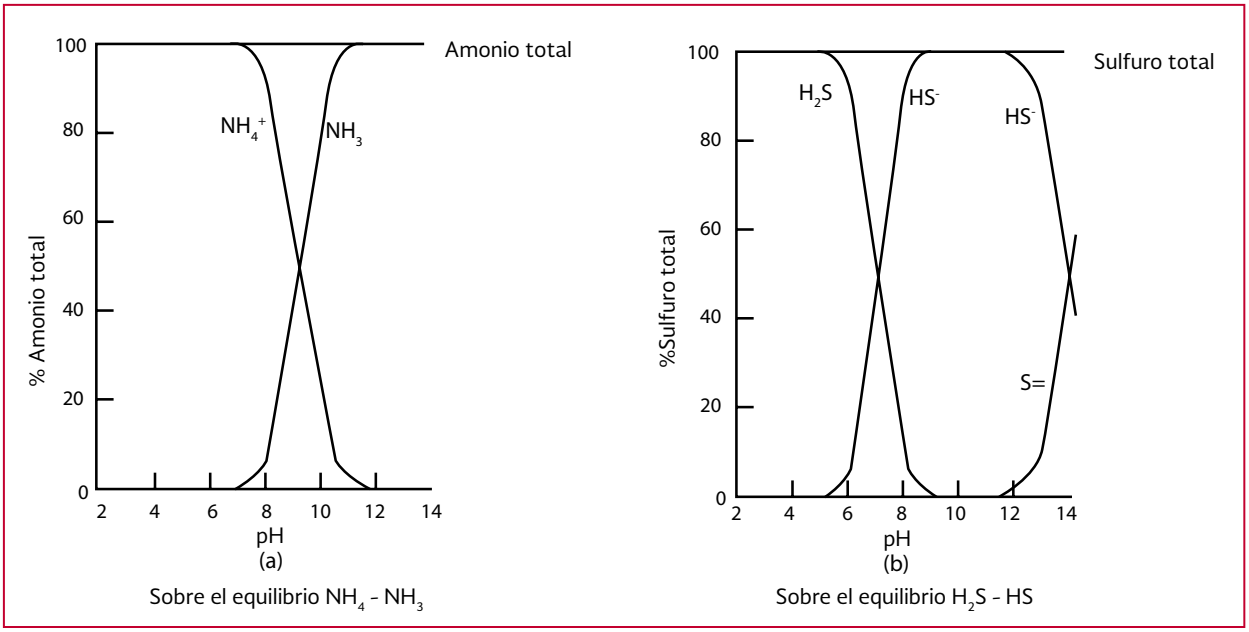
La estabilización con cal reduce los olores. Cuando se usan sistemas de mezclado con aire los olores amoniacales se incrementan debido a la desorción de amoníaco. Después de este proceso los olores de reducen por un factor de 104. Otro de los mayores problemas de olor en los sistemas de tratamiento de lodo lo constituye el sulfuro de hidrógeno, este es eliminado en el proceso de encalado cuando el pH se eleva por encima de 9 ya que a estos valores de pH se convierte en formas ionizadas no volátiles (HS-, S=).

11.3.1.2. Reducción de patógenos

La pre- estabilización con cal o post- estabilización alcanzan reducciones significativas de patógenos si se mantiene el pH arriba de doce. Las investigaciones demuestran que la estabilización con cal reduce los coliformes totales, coliformes fecales y estreptococos fecales en concentraciones mayores al 99.9 por ciento Las concentraciones de Salmonella y Pseudomonas aeruginosa se redujeron por debajo de los límites de detección en experimentos realizados en la planta de Lebanon, Ohio.

(Westphal Patricia & Lee Christensen., 1983), investigaron la eficiencia de la cal en el proceso de post-encalado con dosis de 13 a 40 por ciento como $Ca(OH)_2$. Los resultados indican que la post-estabilización con cal proporciona una reducción de patógenos de por lo menos 2 órde-

Ilustración 11.1 Efectos del pH



nes de magnitud. También reportaron que este proceso tiene la misma eficiencia en reducción de microorganismos patógenos como la estabilización aerobia mesofílica, estabilización anaerobia y el composteo mesofílico.

Existe poca información acerca de la reducción de virus y de huevos de helmintos durante este proceso. Análisis cualitativos realizados con microscopio indican una alta supervivencia de organismos superiores tales como quistes y huevos de Ascaris, así como huevecillos de helmintos, etc. después de 24 horas de encalado con pH superior a doce. Tampoco se ha estudiado si mayores tiempos de contacto podrían destruir estos organismos.

11.3.1.3. Mejora las características de sedimentación y desaguado

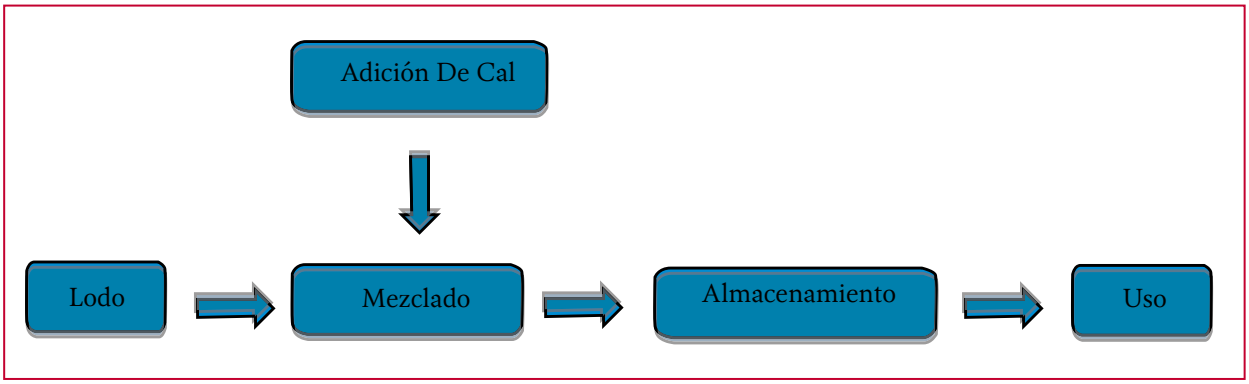
La cal mejora las propiedades de sedimentación y desaguado del lodo por la formación de precipitados asociados con el exceso de la cal, los cuales son principalmente carbonatos e hidróxidos de calcio que no reaccionan y que actúan dando volumen, incrementando la porosidad y disminuyendo la resistencia a la compresión.

11.3.2. Aplicaciones

El proceso de estabilización con cal es reconocido en la estabilización de lodo residual antes de aplicación en suelo o relleno sanitario. Tradicionalmente, se ha considerado en las siguientes situaciones:

- Plantas de tratamiento de aguas residuales pequeñas. En estas plantas es baja la producción de lodo y éste puede utilizarse fácilmente en el suelo o cuando se adiciona cal para almacenarse y posteriormente transportarse a otro lugar para continuar el proceso de estabilización y/o disposición final
- Tratamiento alternativo en plantas de tratamiento existentes

Ilustración 11.2 Estabilización convencional con cal (Clase B)



- Este proceso puede iniciarse o suspenderse rápidamente. Por lo tanto en muchas plantas de tratamiento se usa como un complemento de los sistemas de tratamiento existentes por ejemplo cuando se excede la producción de lodos, se exceden los niveles de diseño o puede reemplazar la incineración y el secado durante alguna falla en el combustible o también cuando los sistemas de tratamiento tiene que sacarse de servicio para limpieza o reparación
- Manejo de lodos en forma discontinua. Es un sistema de tratamiento efectivo en relación con su costo para que operan en periodos cortos o en forma discontinua

11.3.3. Evolución del tratamiento

La cal ha sido tradicionalmente utilizada en la remoción de malos olores principalmente en el manejo de desechos de animales de granja. En el tratamiento de los lodos residuales se empezó a utilizar para bajar el pH en los reactores anaerobios y para acondicionar el lodo antes de la filtración al vacío. El objetivo original del acondicionamiento del lodo con cal fue disminuir el tiempo de desaguado y se observó que durante este tratamiento se reducían los olores y los microorganismos patógenos.

En 1954, T.R. Komline (US EPA, 1979), patentó un proceso para el tratamiento de lodo crudo con altas dosis de cal hidratada (6 a 12 por ciento de los sólidos totales secos), con el propósito de eliminar olores. Sólo a partir de los años 60, la adición se cal se ha considerado como una alternativa para la estabilización del lodo.

Muchos estudios describen la eficiencia de la cal para reducir microorganismos patógenos en agua y aguas residuales, pero el valor bactericida de la cal se continúa estudiando. Reportes de la operación de varias plantas de tratamiento en Estados Unidos establecen que el acondicionamiento con cal de lodos estabilizados anaeróbicamente a pH de 10.2 a 11, seguido de filtración al vacío y almacenamiento del lodo seco, destruye todas las bacterias patógenas entéricas y los olores. Berg, G. *et al* (1968).

Evans,S.C.(1961) reporta que la adición de cal al lodo libera amoníaco y destruye las bacterias coliformes, y que el lodo resultante es una buena fuente de nitrógeno y cal para suelos ácidos.

La estabilización con cal de lodos crudos se ha realizado en el laboratorio y en plantas de tratamien-

to. (Farrell, *et al*., 1974) Reportaron que la estabilización de lodos primarios con cal reduce las bacterias patógenas a valores despreciables, ayuda a la filtración al vacío, y es una forma adecuada estabilizar el lodo para una disposición final.

Paulsrud & Eikum (1975) determinaron la dosis de cal requerida para prevenir la producción de olor durante el almacenamiento de lodos residuales. En este estudio se utilizaron lodos biológicos primarios, lodos de fosas sépticas, y diferentes tipos de lodos químicos. Una importante contribución de este estudio fue que se determinó que para prevenir el decaimiento del pH y la generación de olores durante el almacenamiento del lodo, se requieren dosis de cal más elevadas que las que inicialmente se adicionan para elevar el potencial de hidrogeno.

Investigaciones a nivel laboratorio y planta piloto realizadas por Counts & Shuckrow (1975) sobre estabilización con cal mostraron reducciones significativas en la población de patógenos y generación de olor, cuando el pH fue elevado a valores mayores 12. Counts realizó estudios en invernaderos y parcelas a cielo abierto que indican que la aplicación de lodo doméstico estabilizado con cal no causa un efecto adverso sobre el crecimiento de la planta y las características del suelo.

En 1978, se empezó a usar la estabilización con cal en 27 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales con una capacidad promedio de 0.1 a 31 MGD (4.4 a 1358 L s^{-1}). (US EPA, 1979).

El relleno sanitario es el método más común de disposición de los lodos estabilizados con cal. Sin embargo, en algunos sistemas de tratamiento se aplica al suelo, o se somete a un proceso de composteo, para posteriormente utilizarse en suelo o como cubierta final de los rellenos sanitarios.

11.3.4. Modificaciones al proceso

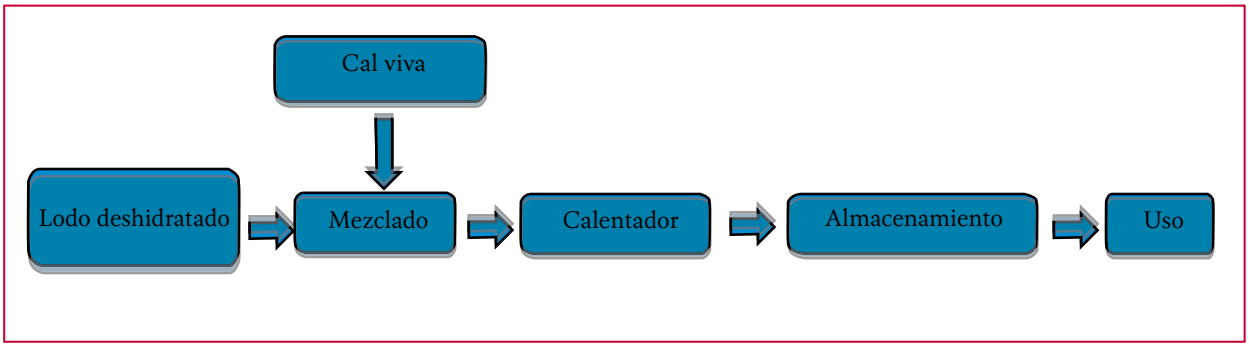
Existen modificaciones al proceso básico de estabilización con cal. Algunas de estas alternativas se desarrollaron usando otros procesos en la planta de tratamiento. Otras modificaciones solo utilizan la estabilización con cal.

Una alternativa asociada estrictamente con el proceso de estabilización con cal es aquella que realiza el proceso en dos etapas: un reactor para elevar el pH a un valor mayor de 12, y otro reactor para proporcionar el tiempo de contacto adecuado y permitir la adición de un exceso de cal para mantener el pH dentro del rango deseado.

Otras tecnologías de estabilización alcalina avanzada consideran altas dosis de reactivos alcalinos y mayor tiempos de retención para alcanzar lodos tipo A. Además de la cal se pueden utilizar otros materiales alcalinos tales como cementos portland, polvo provenientes del horno de cementos, cal viva (CaO) o cenizas las cuales pueden usarse si contienen suficiente cal libre para que al reaccionar con el agua se produzcan los iones OH y se eleve el pH a valores mayores de doce.

La mayoría de las modificaciones incluyen al proceso convencional de encalado adicionando el uso de diferentes sustancias químicas, altas dosis y sistemas de secado. Algunos de estos procesos son patentados y se venden por medio de compañías comerciales. A continuación se describen algunos procesos se hace uso de las siglas B y A para indicar la calidad del lodo obtenido.

Ilustración 11.3 Pasteurización in-vessel (Clase A) Fuente WEF et al; 2009



11.3.4.1. Pasteurización en reactores

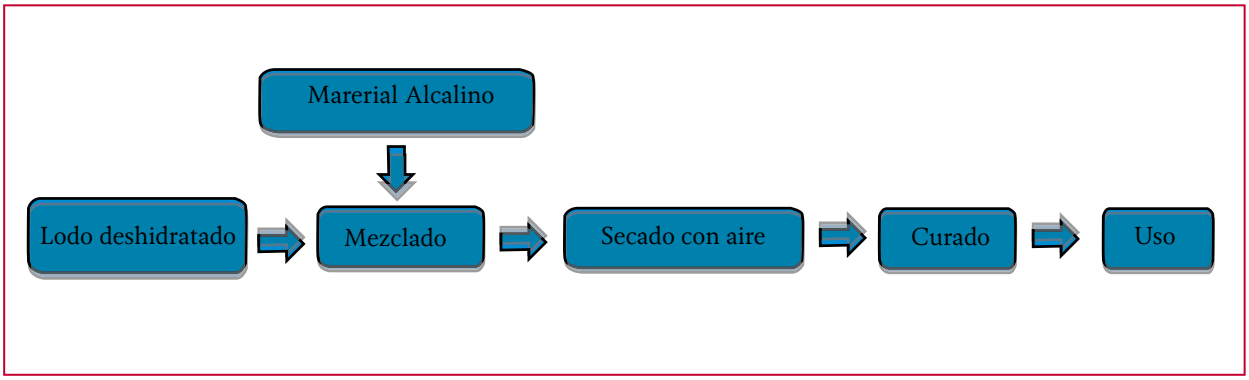
El proceso de pasteurización en reactores (Ilustración 11.3) es un proceso de estabilización alcalina patentado. En este proceso, el lodo desaguado se precalienta en un termo-alimentador, antes de transferirse a un termo-mezclador. El lodo caliente y la cal se mezclan en el termo-mezclador. Como se utiliza calor adicional para elevar la temperatura del lodo, el material alcalino debe adicionarse solamente para elevar el pH, requiriéndose bajas dosis de cal. La mezcla se traslada a un reactor cerrado aislado con una temperatura mínima de 70 ºC, donde permanece por 30 minutos. Este proceso no requiere de una etapa de secado adicional para alcanzar los requerimientos de la EPA. Se considera económicamente atractivo por su bajo consumo de reactivos y bajos costos anuales de operación y mantenimiento.

11.3.4.2. Proceso N-Viro

El proceso N-Viro, es otra tecnología patentada que cumple con los requerimientos de reducción adicional de microorganismos patógenos (Clase A). Técnicamente este proceso se define como un proceso avanzado de estabilización alcalina seguida de un secado acelerado. Se utilizan dos métodos alternativos para realizar el proceso y han sido aprobados por la EPA:

- **Opción 1 (**Ilustración 11.4)-Materiales alcalinos, tales como cemento en polvo, cal, cal pulverizado o cal hidratada se adicionan y se mezclan con el lodo en cantidad suficiente para alcanzar un pH de 12 o mayor por lo menos durante siete días. Después del mezclado el lodo se seca por lo menos 30 días hasta alcanzar una concentración

Ilustración 11.4 Proceso N-Viro. (Opción 1) (Clase A)



de sólidos de 65 por ciento. La temperatura ambiente debe estar arriba de 5 ºC para los primeros siete días

- **Opción 2** (Ilustración 11.5).- Los materiales alcalinos se adicionan y mezclan con el lodo en suficiente cantidad para alcanzar un pH mayor de 12 durante siete días. Además de de mantener el pH alto, el lodo se calienta a una temperatura de 52 °C y debe mantener esta temperatura durante 20 horas. El lodo estabilizado se seca hasta obtener una concentración de sólidos de por lo menos 50 por ciento. Esta alternativa es similar a la primera con la excepción de que incluye un tratamiento térmico y no está sujeto a las limitaciones de la temperatura ambiente

Las dos alternativas cumplen con los requerimientos de reducción adicional de patógenos establecidos por la EPA.

11.3.4.3. Tecnología PORI ST

La compañía internacional PORI ST diseñó una tecnología para producir un lodo clase A o B, dependiendo del pH y de la temperatura de calentamiento. El lodo deshidratado se mezcla con ácido sulfúrico para alcanzar un pH de 3. Después del ajuste de pH, se calienta en un reactor a una temperatura de 166ºC y una presión de 690 Pa por una hora. Posteriormente en una segunda etapa de mezclado se adiciona una mezcla de cal al lodo en forma presurizada donde alcanza un pH de 6 o mayor según su uso final. El lodo tratado pasa por un sistema de separación donde se captura el vapor del precalentamiento, luego el lodo se deshidrata en un filtro prensa de placas para adquirir la concentración de sólidos de 60 a 70 por ciento. Ver Ilustración 11.6.

11.3.4.4. Proceso chemfix

Ver Ilustración 11.7; es un proceso patentado en el que el cemento portland y un silicato de sodio y en algunos casos otro agente, se agrega a un lodo municipal. El resultado de este proceso es un lodo clase A ó Clase B, con este proceso el lodo se vuelve química, biológica y físicamente estable.

11.3.4.5. Proceso bio-fix

Es un proceso no patentado que ofrece un lodo clase A o clase B, dependiendo del número de etapas que se realicen. El proceso (Ilustración 11.8) presenta en una primera etapa control de olor por la adición de cal , en la segunda etapa es un proceso de estabilización tradicional, la tercera etapa es el mismo proceso pero en reactor y la cuarta etapa simplemente se adiciona material para incrementar la concentración de sólidos del lodo tratado de la etapa II o III.

11.3.4.6. Proceso RDP

Ver Ilustración 11.9; es un proceso patentado que da un lodo clase A y es una modificación del proceso en-Vessel (proceso anterior de pasteurización

en reactores). Aquí se consigue el pH y la temperatura requerida para la pasteurización en reactor, sin embargo, para reducir la cantidad de cal viva, se requiere de una fuente de calor adicional, lo que incrementa el costo.

El significado de lodo clase A y clase B, se puede encontrar en la (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002), cuyos límites máximos permisibles de descargas aparecen en el capítulo 2, de este libro.

Ilustración 11.5 Proceso N-Viro. (Opción 2.) (Clase A)

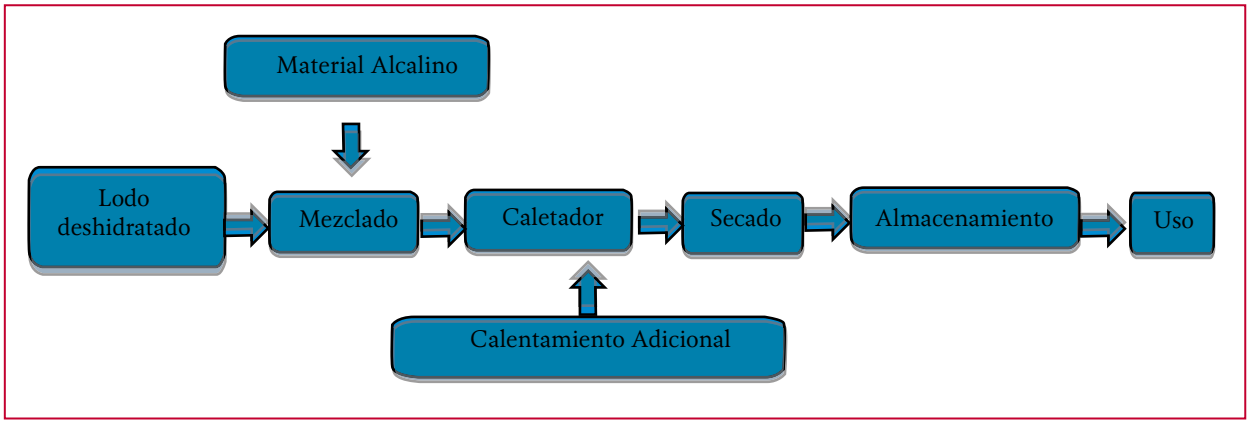


Ilustración 11.6 Tecnologia PORI ST (Clase A)

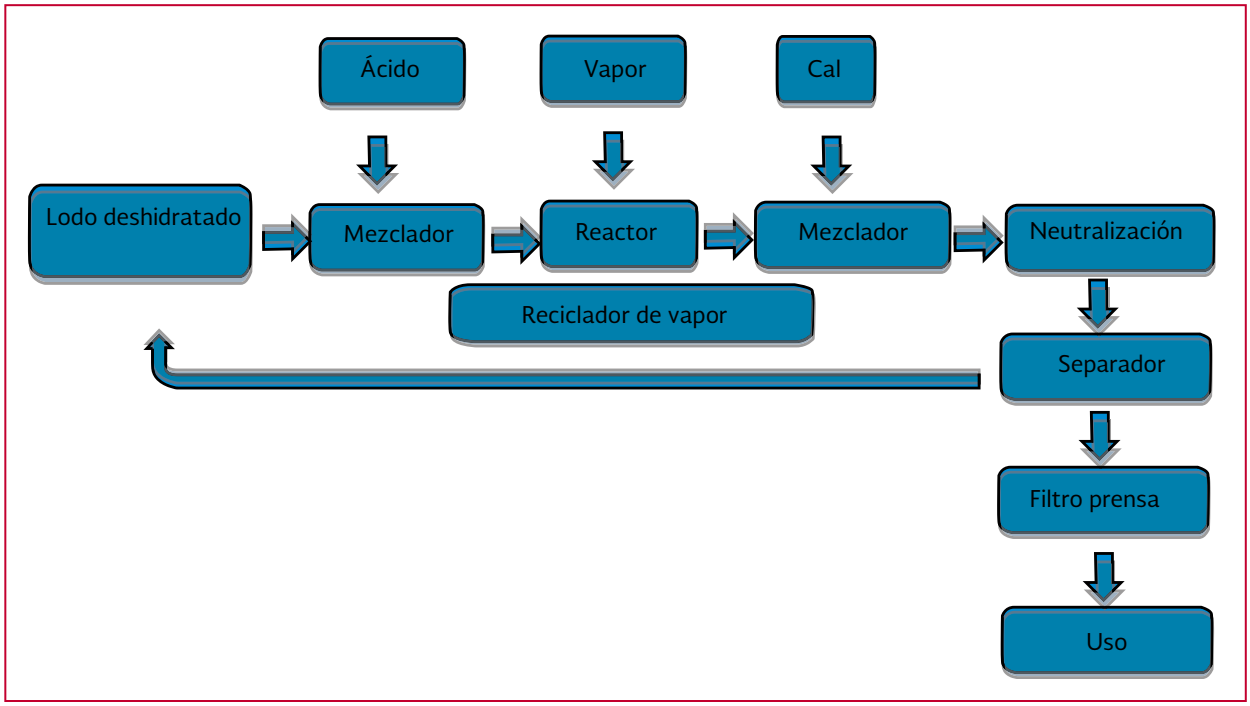


Ilustración 11.7 Proceso de fijación quimica

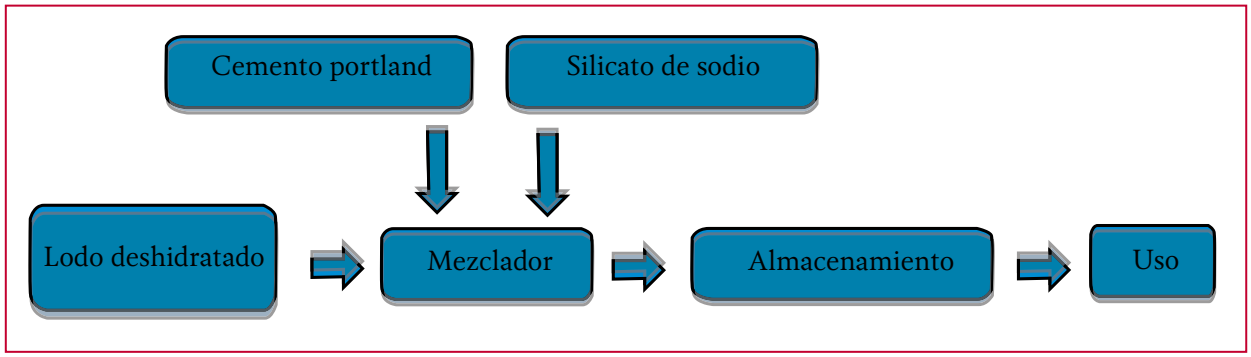


Ilustración 11.8 Ilustración 11.8 Proceso Bio-Fix

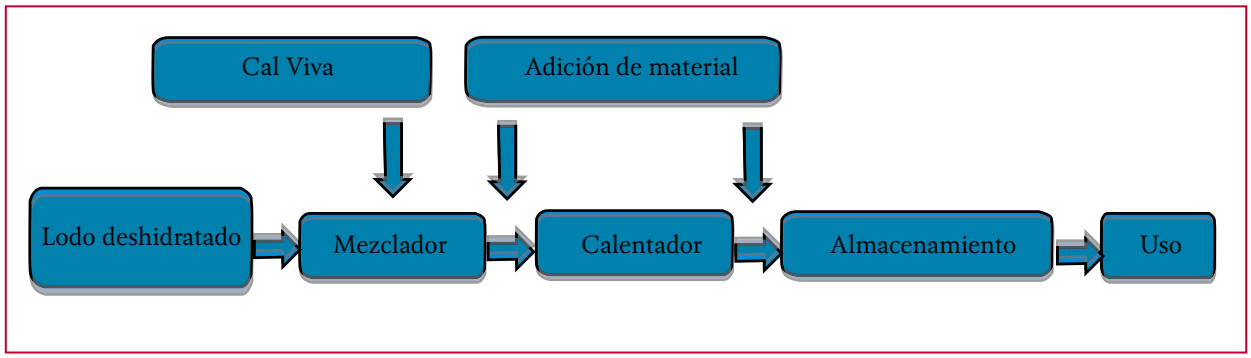
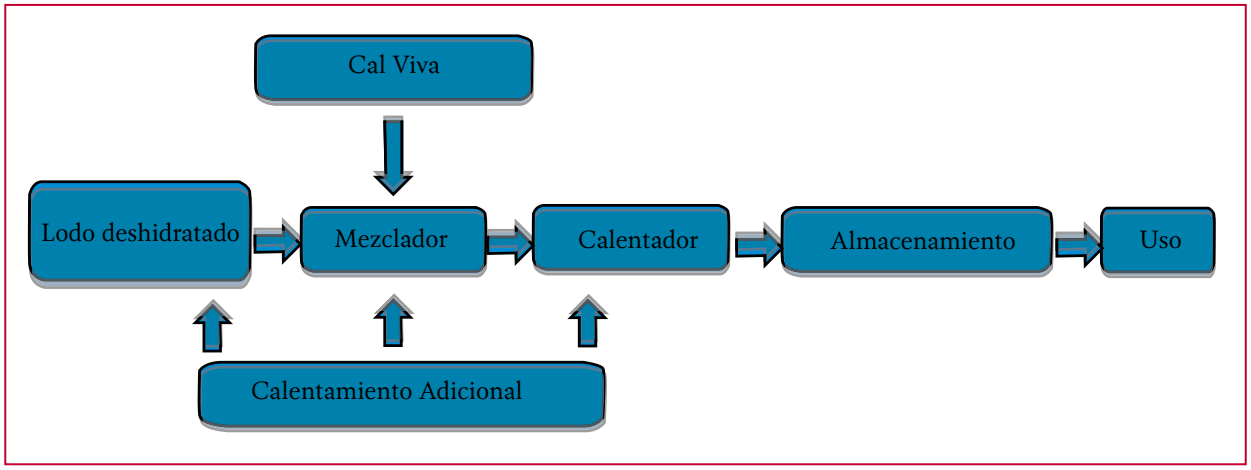


Ilustración 11.9 Proceso RDP (Clase A)



11.3.5. Ventajas y desventajas

Tanto el pre encalado como el post encalado son procesos factibles, con bajos costos de capital y más fáciles de operar que otros procesos de estabilización de lodo. El equipo utilizado incluye silos para almacenamiento de cal, equipo de mezclado y sistemas de alimentación. Muchas plantas que utilizan cal indican que los olores y los microorganismos patógenos se reducen en altas concentraciones. El lodo estabilizado con cal puede aplicarse bajo condiciones controladas en suelos agrícolas y ser una fuente de nitrógeno, calcio y materia orgánica. El lodo también puede reemplazarse parcialmente por agentes alcalinos utilizados para suelos ácidos. El proceso de estabilización con cal, fija o inmoviliza iones metálicos específicos y además disminuye la posible toma de metales por las plantas. La cal es más segura, barata y más fácil de manejar que el cloro.

Aumenta la velocidad de filtración del lodo estabilizado cuando se adicionan dosis de agentes acondicionadores tales como sales de hierro y aluminio o polímero en combinación con la cal. La facilidad con que se filtra lodo también depende del tipo de lodo que se va estabilizar; el lodo primario es más fácil de desaguar que el lodo secundario. Pero la estabilización con cal también tiene sus desventajas. La cal es menos efectiva que el cloro para convertir al lodo en un producto estable.

La cal no destruye la materia orgánica que sirve de sustrato para el crecimiento de microorganismos. Una baja dosis de cal puede traer como consecuencia una caída en el pH durante el almacenamiento y posteriores problemas de olor, así como un posible recrecimiento de microorganismos patógenos.

Otra desventaja de la estabilización con cal, comparada con otros procesos de estabilización, es que no se reduce la masa del lodo. En efecto, este se incrementa debido a la adición de cal y a los productos químicos formados. Este resulta en un incremento en los costos de transporte y de disposición final, lo cual debe analizarse en función de los ahorros de costos de capital y concluir si es mejor usar la estabilización con cal más que otros procesos.

Otra desventaja para el uso del lodo estabilizado con cal es que no es apropiado para utilizarse en suelos alcalinos. También el lodo estabilizado con cal tiene menores concentraciones de nitrógeno y fósforo soluble cuando se compara con un lodo estabilizado anaeróbicamente.

11.4. Criterios de Diseño

Varios criterios de diseño deben considerarse antes de implementar un proceso de estabilización alcalina. Los principales criterios son:

11.4.1. Tiempo de contacto y pH

El tiempo de contacto y el pH están directamente relacionados debido a que un determinado pH debe mantenerse por un determinado tiempo para garantizar la destrucción de patógenos.

La dosis de cal debe proporcionar la alcalinidad residual suficiente para mantener un alto pH por varios días antes de la disposición. Esta alcalinidad debe prevenir la caída del pH y el recrecimiento o reactivación de olores y de microorganismos patógenos.

La caída en el pH ocurre en la siguiente secuencia: El bióxido de carbono atmosférico (el cual forma

un ácido débil cuando se disuelve en agua) es absorbido y gradualmente consume la alcalinidad residual, y el pH decrece, posteriormente continua la caída de pH por la producción de ácidos orgánicos (reacciones similares a las que ocurren en la estabilización anaerobia).

Numerosos estudios se han realizado para determinar el pH y el tiempo de contacto requerido para estabilizar el lodo. Se ha llegado a un acuerdo de que una reducción significativa de patógenos y de olor ocurre cuando el pH se incrementa a valores de 12 o mayores y permanece en este valor durante dos horas. (US EPA, 1979).

11.4.2. Dosis de cal

El tercer factor de diseño es la dosis de cal requerida. Esta dosis depende de varios factores tales como:

- Características del material usado como fuente de cal. Cualquier tipo de material alcalino que se vaya utilizar ya sea cal viva, cal hidratada, cemento portland, cenizas, residuos alcalinos industriales, se debe determinar la concentración de calcio que aportan, así como también conocer sus impurezas. Materiales alcalinos contaminados deben evitarse, ya que solo
- Características químicas del lodo, que incluye los compuestos orgánicos e inorgánicos
- El tipo de lodo (primario, lodos activados, etc.)
- Las características físicas del lodo, tales como el contenido de humedad y la viscosidad que influye en el mezclado

La Tabla 11.2 muestra las dosis de cal requeridas en el proceso de encalado de lodo líquido para mantener el pH arriba de 12. Se observa que la dosis de cal requerida para lodo primario fue mucho menor que la requerida por los lodos activados.

La Tabla 11.3 muestra los resultados reportados por (Farrell, *et al*., 1974) con resultados similares. Otro factor que influye en la dosis de cal es la concentración de sólidos. Generalmente la dosis de cal se incrementa a mayores concentraciones de sólidos.

Tabla 11.2 Dosis de Cal Requerida para Estabilización de Lodo, en la Planta de Lebanon, Ohio.Fuente: Farrel (1974)

Tipo de lodo	Sólidos totales (por ciento)	*Dosis de cal* kg $Ca(OH)_2$/ kg de sólido seco	pH inicial	pH final
Lodo primario	3-6	0.12	6.7	12.7
Lodo activado	1.3	0.30	7.1	12.6
Anaerobio combinado	5.5	0.19	7.2	12.4

Tabla 11.3 Determinaciones de Dosis de Cal a Nivel Piloto para Mantener

Tipo de lodo	Dosis de cal *kg Ca(OH)2 /kg SS*
Lodo primario	**0.10 - 0.15**
Lodo activado	**0.30 - 0.50**
Lodo de fosa séptica	**0.1 - 0.30**

La dosis de cal para lodos primarios y lodos activados están en rangos de 0.1 a 0.3 kg $Ca(OH)^2$/ kg de lodo seco o entre 1 000 y 3 000 mg L^{-1} como se observa en la Ilustración 11.10 donde aparecen las dosis combinadas para todos los lodos y las dosis recomendadas para lodos primarios. Con estas dosificaciones solo se consigue un lodo clase B.

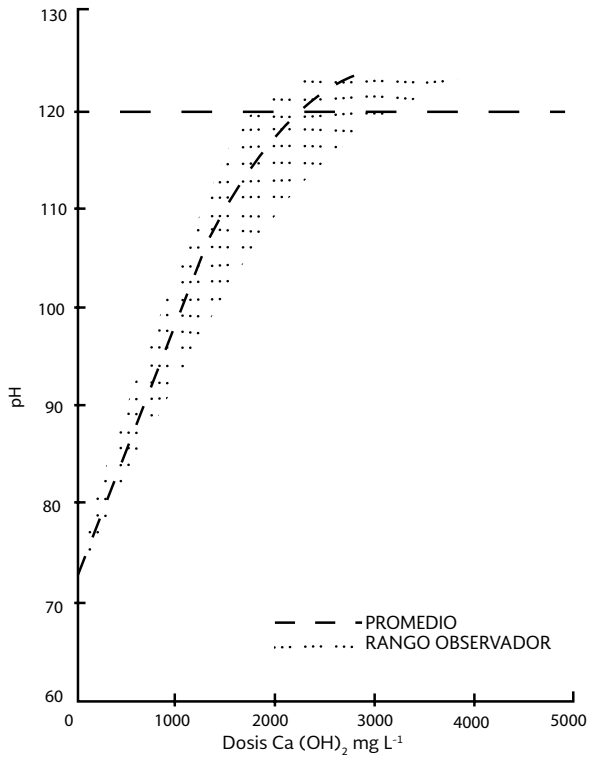
El óxido de calcio esto otro material comúnmente utilizado tanto en la estabilización del lodo líquido, como en el lodo deshidratado. La dosis

de óxido de calcio adecuadas, para obtener lodo Clase A, alcanzando los criterios de pasteurización de 70 °C durante 30 minutos, es entre el 40 y 75 por ciento en peso sobre base seca (12 a 15 por ciento en base húmeda). Estas son las dosis que se utilizan en las tecnologías alcalinas descritas anteriormente. WEF, 2012. Las dosis teóricas requeridas para obtener lodo Clase A ó Clase B, en función de la concentración de sólidos totales en el lodo se muestra en la Ilustración 11.11, (Lue-Hing, et al., 1992).

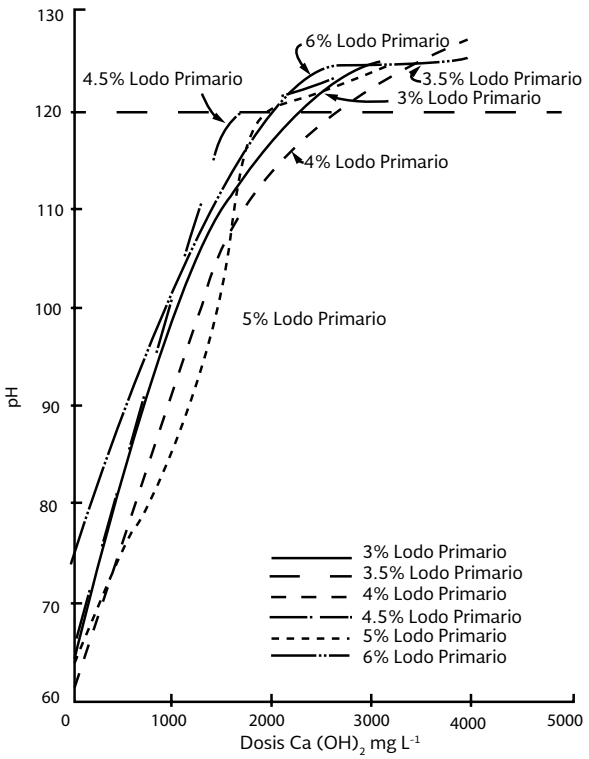
Otros criterios que deben considerar son: Los sistemas de ventilación y control de olor, los sistemas de mezclado, los sistemas para almacenamiento de los materiales alcalinos o para el almacenamiento del lodo tratado, el equipo de alimentación y apagado, entre otros.

En la Tabla 11.4 se muestra los estándares recomendados en Estados Unidos y Europa para el diseño de sistemas de estabilización química.

Ilustración 11.10 Dosis de cal en función del pH para diferentes tipos de lodos, Fuente: EPA 1978



Dosis de cal Vs. pH para todo tipo de lodo



Dosis de cal Vs. pH para todo tipo de lodo

Ilustración 11.11 Dos teóricas de óxido de calcio requeridas para obtener lodo Clase A o lodo clase B a diferentes porcentajes de sólidos totales en el lodo

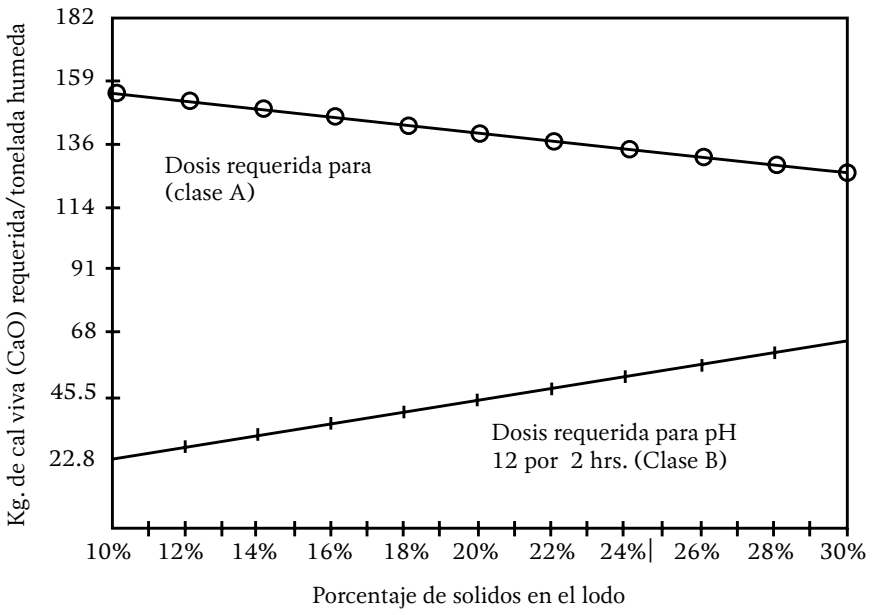


Tabla 11.4 Criterios recomendados en Estados Unidos y Europa para el diseño de sistemas de estabilización alcalina de lodos

Diez estados	Estándar europeo
General	General
Los materiales alcalinos pueden adicionarse al lodo líquido primario o secundario para estabilización de lodos en plantas de tratamiento; para completar instalaciones existentes o para un manejo provisional de lodos	La estabilización es un proceso de transformación de la materia orgánica fácilmente degradable en sustancias minerales o en compuestos de menor velocidad de degradación. El tratamiento alcalino de lodos se conoce como "pseudo estabilización"
No hay un reducción de la materia orgánica ni del volumen de lodos. Se incrementa la masa de lodo seco. Se requiere deshidratación para disminuir el volumen de lodos	La pseduo estabilización puede usarse para reducir olor durante el almacenamiento, durante el manejo de olor o para desinfectar el lodo
El diseño debe considera el aumento de la cantidad de lodo para las instalaciones de almacenamiento, manejo, transporte y disposición, así como los costos asociados	La pseudo estabilización se puede alcanzarse adicionando una sustancia química (por ejemplo cal a pH mayor de 12), con el objetivo de parar la actividad microbiana. También se puede realizar la desinfección como un beneficio secundario por la adición de material alcalino
Criterios de operación	Los siguientes factores deben considerarse
Se debe adicionar suficiente material alcalino para producir una mezcla homogénea con un pH de 12 después de 2 horas de un fuerte mezclado	• Las emisiones de amoniaco debido a los altos valores de pH que se manejan
Se deben considerar instalaciones para almacenar el material alcalino en las plantas donde se use este proceso para el manejo provisional de lodos	• Ventilación y limpieza del aire
Ventilación y control de olor	
	Desinfección de lodo
Las plantas de tratamiento deben considerar instalaciones para el control de olor durante las etapas de mezclado y almacenamiento del lodo tratado, cuando estén localizadas a 0.8 Km de áreas residenciales y comerciales. Se requiere ventilación cuando el mezclado o el almacenamiento se hacen en instalaciones cerradas	Si se realiza la desinfección del lodo líquido, deben considerarse los siguientes factores • El pH del lodo debe elevarse arriba de 12 • El lodo tratado requiere almacenamiento • Uso de múltiples tanques de almacenamiento • Monitoreo del pH durante el almacenamiento • Desintegración o tamizado del lodo antes del acondicionamiento con el material alcalino • Agitación para prevenir formación de depósitos de lodo

Tabla 11.4 Criterios recomendados en Estados Unidos y Europa para el diseño de sistemas de estabilización alcalina de lodos (continuación)

Diez estados	Estándar europeo
Tanques de mezclado Los tanques para el mezclado deben diseñarse para operar en flujo continuo o discontinuo. Se requiere un mínimo de 2 tanques de tamaño adecuado para poder tener un tiempo de contacto mínimo de 2 horas en cada tanque. Para determinar el número y tamaño de los tanques se debe considerar: a) Flujo máximo de lodos b) Almacenamiento entre lotes c) Tanques para el espesamiento y deshidratación. d) Repetir el tratamiento en caso de que el pH disminuya (<12) durante el almacenamiento. e) Espesar el lodo antes del tratamiento f) El tipo de equipos para el mezclado y los requerimientos de mantenimiento y reparación	Si el lodo deshidratado se quiere tratar con adición de cal viva (CaO). Se debe considerar que la reacción exotérmica puede alcanzar temperaturas superiores a 55°C. El tratamiento de un lodo deshidratado con cal viva puede ser suficiente para llevarlo a un relleno sanitario. Los factores que deben considerarse cuando se utilice cal viva para desinfectar el lodo deshidratado. • Tratamiento mínimo de 24 horas a 55°C y elevar el pH a valores mayores a 12. (Para almacenar el lodo se deben utilizar contenedores con aislamiento térmico) • Realizar el monitoreo de la temperatura del lodo cerca de la superficie • El tamaño de partícula no debe exceder 10mm. • Mezclado eficiente • Considerar en el manejo la solidificación e incremento de la concentración de sólidos y de la masa de lodo debido a la adición del material
Equipo de mezclado El equipo de mezclado debe diseñarse para que proporcione una agitación fuerte dentro del tanque para mantener los sólidos en suspensión y una mezcla homogénea del lodo con el material alcalino. Se pueden utilizar difusores de aire o mezcladores mecánicos Si se utiliza aeración difusa se debe suministrar 0.5 L de aire por metro cúbico de tanque por segundo 0.5 L m^{-3} s. Se deben seleccionar difusores que no causen obstrucciones y que permitan un servicio continuo. Si se seleccionan mezcladores mecánicos, los impulsores deben diseñarse para minimizar obstrucción o choques con residuos que traiga el lodo y considerar el servicio continuo aún en épocas de invierno	Almacenamiento Los silos o tanques para almacenamiento de los materiales alcalinos o de sustancias químicas deben tener suficiente capacidad y contar un tanque en stock. Deben considerar lo siguiente: • Accesos adecuados para mantenimiento • Tubería de alimentación con aislante • Válvula liberadora o de alivio de presión • Medios o equipos para control de la dosificación de químicos • Equipo de seguridad • Forma de medir las cantidades de reactivos
Alimentación o suministro de reactivos químicos y almacenamiento El material alcalino es de naturaleza caustica y puede causar daños a la piel y los ojos. El diseño de los equipos para manejar o almacenar materiales alcalinos debe considerar la seguridad de los operadores Los tanques de almacenamiento, apagado y alimentación deben ser herméticos para evitar el contacto del material alcalino con atmósfera de dióxido de carbono y vapor de agua y para prevenir el escape de polvo. Todos los equipos, líneas o tuberías de transferencia deben poder limpiarse fácilmente	Todos los tanques deben ser resistentes al contenido y al ataque químico. La abrasión también debe considerarse. Debe ser posible remover depósitos químicos mecánicamente de cualquier parte del equipo Los siguientes aspectos se deben considerar en el diseño de una instalación que utilice cal viva y para el mezclado de lodo desaguado • Mezcladores con control de polvos • Rodamientos externos y sellos en juntas • Registro para inspección con seguros • Edificios con ventilación • Sistemas para control de olor, polvos y otras emisiones al aire

Tabla 11.4 Criterios recomendados en Estados Unidos y Europa para el diseño de sistemas de estabilización alcalina de lodos (continuación)

Diez estados	Estándar europeo
Equipo de alimentación y apagado El diseño del equipo de alimentación debe considerar el tamaño de la planta, el tipo de material alcalino que se va utilizar, los requerimientos de apagado, y las necesidades del operador. Los equipos pueden ser de alimentación manual (para operación discontinua) o automática. Los alimentadores automáticos pueden ser de tipo volumétrico o gravimétrico dependiendo de la precisión y exactitud que se requieran y también en la selección se debe considerar las necesidades de mantenimiento Se debe evitar el apagado de la cal (CaO) en forma manual aunque se tenga equipo y ropa protección adecuada. Para pequeñas plantas se recomienda por razones de seguridad, que solo se utilice cal hidratada ($Ca(OH)_2$. El equipo para alimentación y apagado debe poder manejar por los menos un 150 por ciento del flujo máximo de lodo y debe considerar un flujo adicional para tratar otra vez el lodo volverse a tratar por decaimiento del pH. Se recomiendan unidades duplicadas. (Operación y espera)	

Recommended Ten States Standards for watewater facilities. Chapter 80. Sludge processing, storage, and disposal. Recuperado de http://www.michigan.gov/deq/0,4561,7-135-3313_44117---,00.html

British Standard. BS EN 12255-8:2001. Wastewater treatment plants. Part 8: Sludge treatment and storage.

11.4.3. Equipo requerido para implementar un sistema de estabilización alcalina

11.4.3.1. Equipo requerido para la estabilización alcalina de lodo líquido, crudo o estabilizado

Este es el método convencional de encalado donde el lodo líquido crudo o el lodo después de la estabilización aerobia o anaerobia se somete a un proceso de encalado utilizando hidróxido de calcio Ca(OH)2, o cal viva (CaO).

El equipo consiste:

- Silo de almacenamiento de cal
- Tornillo sin fin para transporte de cal
- Equipo alimentadores de cal que pueden ser gravimétricos o volumétricos. Que entregan o dosifican una cantidad controlada de reactivo químico
- Apagador y alimentador de cal viva en caso de utilizarse este producto
- Unidades para control de olor
- Molino o triturador en línea para reducir o eliminar sólidos que pueden obstruir los equipos posteriores
- Tanques de mezclado. Se recomiendan por lo menos 2. Uno en proceso de llenado de lodo y el otro en el proceso de encalado que considere el flujo pico a la planta de tratamiento

En la Ilustración 11.12 se observan todas las unidades que integran un sistema de encalado típico.

11.4.3.2. Equipo requerido para la estabilización de lodo deshidratado. Post tratamiento alcalino

- Silo para el almacenamiento de cal
- Sistema de alimentación y dosificación de cal
- Banda para transportar y alimentar el lodo deshidratado
- Mezclador de lodo con cal
- Banda transportadora de lodo encalado
- Contenedores para almacenamiento

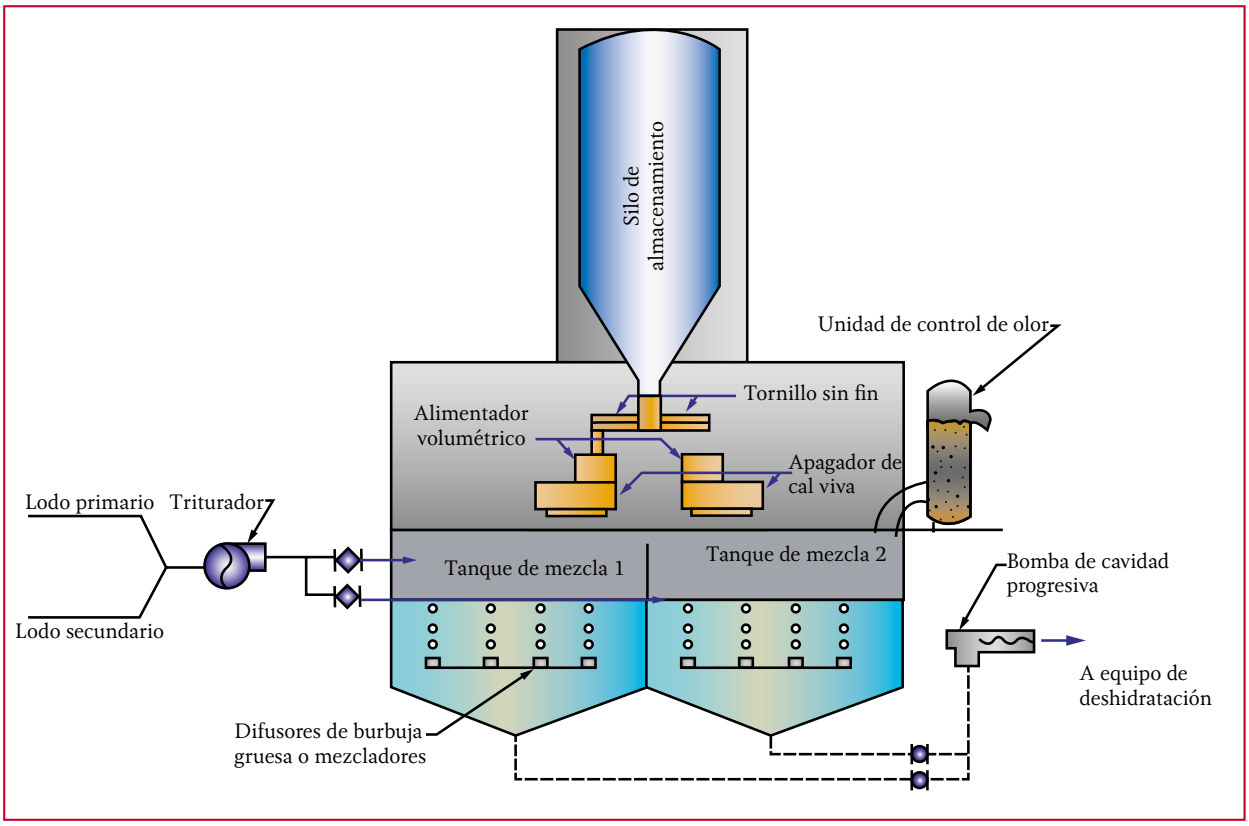
La Ilustración 11.14. Muestra un esquema típico de post tratamiento con cal.

A continuación se puede ver algunos equipos utilizados para el encalado. Silo para el almacenamiento de cal, Ilustración 11.15. El tanque está dotado de una escalera con protección para permitir al operario acceder al techo del tanque y a la tolva de recarga. En la parte superior del tanque se encuentran: orificio de inspección, válvula de seguridad y filtro anti-polvo de gran eficiencia. Las barandillas de seguridad situadas en la parte superior protegen eficazmente a los operarios.

Sistema de alimentación y dosificación de cal

Consta de alimentador, electro vibrador, guantes manipuladores, tapa con ventana de control, ventilador con filtro electrovibrador y dosificador de cal. La carga de cal en el tanque consiste en introducir la bolsa de cal dentro del tanque y en cerrar la tapa. Antes de introducir una bolsa nueva de cal hay que cerciorarse de que los restos del anterior se hayan eliminado. La bolsa

Ilustración 11.12 Componentes de un sistema de estabilización de lodo líquido, Fuente: EPA 1979



que se encuentra en la parrilla se rasga con unos guantes manipuladores. Se puede observar la operación a través de la ventana de control. Se aconseja que en cada carga se encienda el ventilador extractor. A continuación se enciende el dosificador de cal y se transporta la cantidad de cal requerida.

Mezclador cal- lodo

Dependiendo del tipo de lodo, concentración de sólidos y viscosidad se selecciona el mezclador que puede ser bi-helicoidal o de paletas. La Ilustración 11.17 muestra un mezclador helicoidal. En uno de los orificios se introduce la cal, mientras que al segundo se introduce el lodo. La mezcla obtenida a la salida tiene una consistencia homogénea que no requiere mas tratamientos. La mezcla de cal y fango puede ser depositada directamente en el punto de almacenamiento, o continuar por medio de una banda o cinta transportadora o helicoidal al punto de almacenamiento, eventualmente a un contenedor.

Ilustración 11.13 Apagador y alimentador de cal y tanque de mezclado

Ilustración 11.14 Esquema típico de un post tratamiento con cal. Fuente: Metcalf & Eddy 2003

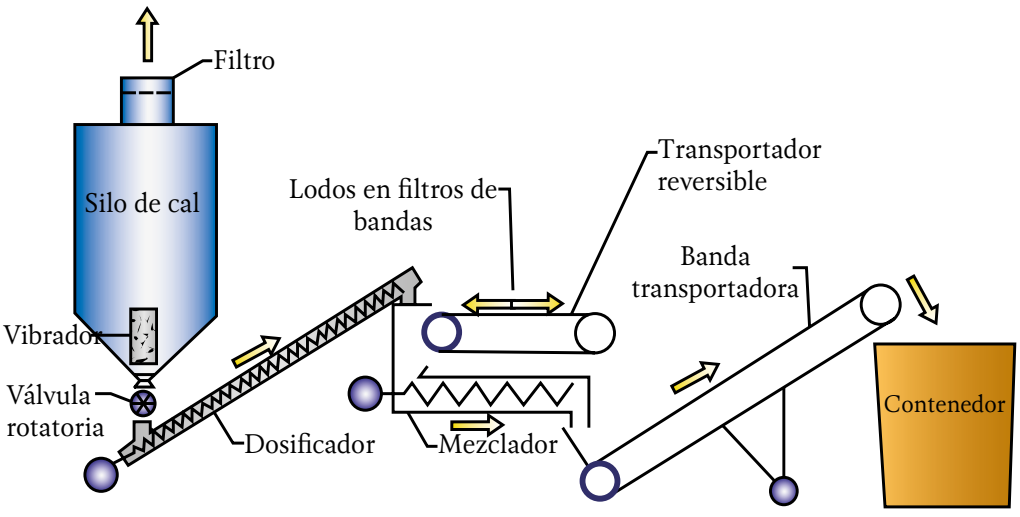


Ilustración 11.15 Componentes de un silo de almacenamiento de cal

11.5. Ejemplo de Diseño

11.5.1. Diseño de un sistema de encalado o de estabilización alcalina de lodo

Diseñar un sistema de estabilización alcalina para un lodo que se produce en una planta de tratamiento de aguas residuales municipales con un proceso de lodos activados. La planta tiene una capacidad de 350 $L \cdot s^{-1}$ (30 240 $m^3 \cdot d^{-1}$). Para hacer el tratamiento alcalino se toma el lodo del sedimentador primario y el lodo del sedimentador secundario que proviene del proceso de lodos activados. El lodo secundario pasa por un proceso de espesamiento para incrementar el contenido de sólidos totales y posteriormente se une con el lodo primario para pasar al proceso de estabilización.

El proceso de tratamiento de lodos incluye las siguientes etapas:

- Estabilización alcalina
- Deshidratación
- Disposición en suelo

Ilustración 11.16 Sistema de alimentación y dosificación de cal

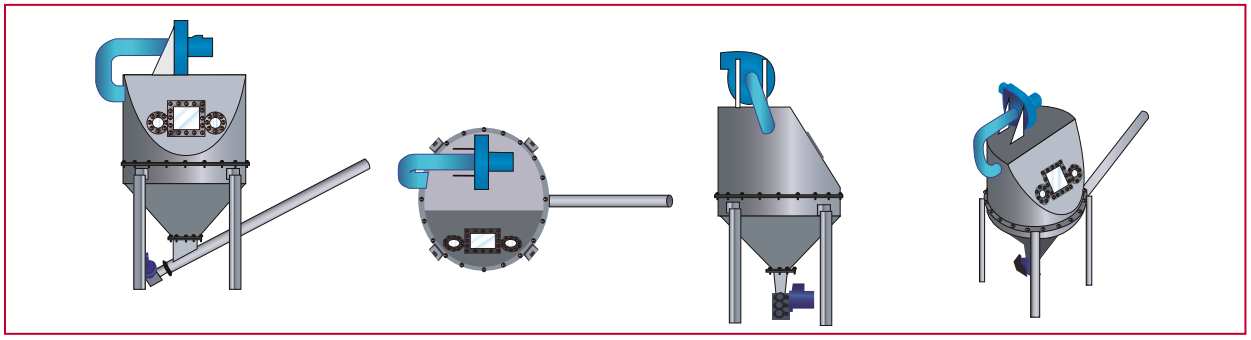
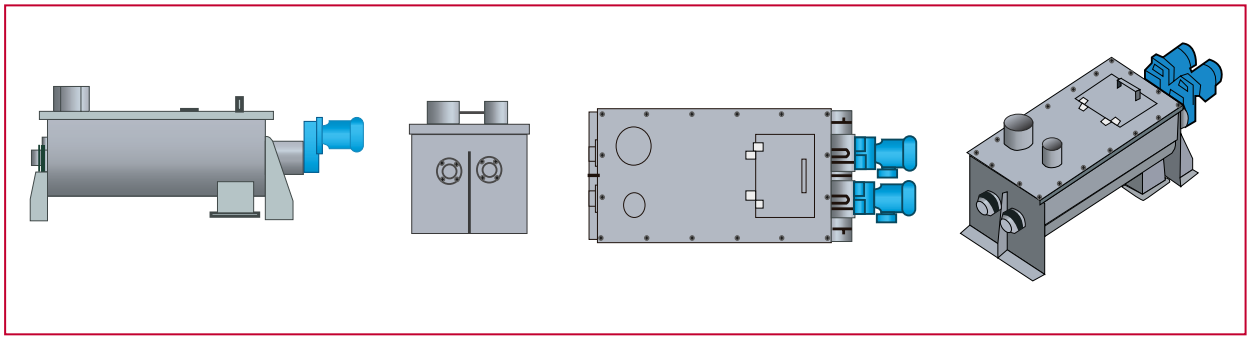


Ilustración 11.17 Sistema de mezclado lodo-cal



Producción de lodo

En la Tabla 11.5 se muestra la producción de lodo para la planta.

Tabla 11.5 Producción de lodos en la planta de tratamiento

Parámetro	Condiciones de flujo de lodos	
	Promedio	Flujo pico
Producción de lodo, kg Sólido seco/dia		
Lodo primario	4 545	6 818
Lodo activado o secundario	2 272.5	3 409
Sólidos totales (por ciento)		
Lodo primario	5 por ciento	4.0
Lodo activado o secundario	4.0	3.5
Volumen de lodo ($m^3\ d^{-1}$)		
Lodo primario	90.6	170.2
Lodo secundario o activado	56.6	97.2

Descripción del sistema

El diseño conceptual para el sistema de estabilización alcalina es que aparece en la Ilustración 11.12 y en el inciso 11.4.3.1 la descripción general del equipo requerido

El sistema de estabilización estará integrado por los siguientes equipos:

- Un mezclador o triturador en línea
- Dos tanques para el mezclado cada uno con una capacidad para mezclar el lodo producido (flujo pico) durante 8 horas (1 turno). Mientras un tanque se llena, el otro recibirá la dosis de cal y se mezclará durante 30 minutos, y posteriormente se descargará hacia el área de deshidratación
- En este ejemplo se considera que el equipo de deshidratación de lodos opera en forma continua y que no se requiere de tener tanques de almacenamiento del lodo encalado o estabilizado. En caso de que el equipo de deshidratación opere solo 2 turnos, se requerirá por lo menos tanques para almacenar el lodo encalado que se produce en el tercer turno (Volumen de lodo de 8 horas)
- Se considera utilizar aire que se inyectará por medio de difusores de burbuja gruesa para mezcla el lodo con la cal. Este también previene que el lodo se vuelva séptico y produzca malos olores
- Para eliminar los olores, se cubrirán los tanques de mezcla y los gases que se liberen durante el mezclado se recogerán y removerán en una unidad para control de olor. Esta unidad consiste en una columna de adsorción empacada (scrubber). A la columna se le inyecta una solución de ácido sulfúrico diluído para adsorber todo el amoniaco (NH_3)

que se libere durante el encalado. Este adsorbedor debe construirse con materiales resistentes al ácido

- En este ejemplo se utilizará cal viva (CaO) para realizar el encalado o estabilización. Se tendrá un silo de almacenamiento (Tabla 11.4) con una capacidad para almacenar la cantidad de cal requerida para 30 días para el flujo promedio
- La cal se alimentará a los tanques de mezclado (reactores) por medio de dos alimentadores o dosificadores volumétricos. La dosis de cal se debe seleccionar para mantener el pH arriba de 12.5 durante 2 horas

Dimensionamiento de las unidades

Tanques de mezclado o reactores

Volumen requerido.

Criterio de diseño. Los tanques se seleccionan para que manejen el flujo pico y con un tiempo de retención de 8 horas.

Volumen

$V = 8\ h/tanque/24\ h\ d^{-1}(\ 170.2\ m^3\ d^{-1} + 97.2\ m^3\ d^{-1})$

$V = 89\ m^3/tanque$

Área superficial del tanque.

Se considera una profundidad útil de 3 m

$A = 89\ m^3/\ 3\ m = 29.\ 3\ m^2$

Dimensiones sugeridas para el tanque, considerando un borde libre 0.6 m.

5.4 m x 5.4 m x 3.7 m

Sistema de mezclado con aire

Criterio de diseño para la inyección de aire

$30\ m^3/min/1\ 000\ m^3$

Capacidad del soplador

Flujo de aire (Q)

$Q = 89.2\ m^3/tanque\ (30\ m^3/min/1\ 000\ m^3)$

$Q = 2.67\ m^3/min/$ *para cada soplador*

Silo para el almacenamiento de cal

Criterio de diseño. Para almacenar la cantidad requerida durante 30 días con la producción promedio de lodo.

Características de la cal

Pureza 90 por ciento CaO
Densidad aparente 882 kg m^{-3}

Dosis de cal

Las dosis de cal recomendadas para plantas de tratamiento de lodos activados aparecen en la Tabla 11.2 Estas dosis garantizan pH >12 por 2 horas.

Lodo primario	0.12 kg $Ca(OH)_2$/kg de sólido seco
Lodo secundario o lodo activado	0.30 kg $Ca(OH)_2$/kg de sólido seco

Cantidad promedio de cal requerida por día.

Expresada como cal hidratada $Ca(OH)_2$

$W_{Ca(OH)2} = 4545\ kg\ d^{-1}\ (0.12\ kg\ kg^{-1}) + 2\ 272.5\ (0.3\ kg\ kg^{-1})$

$W_{Ca(OH)2}$ = 545.4+681.8 kg = 1 227.2
$W_{Ca(OH)2}$ = 1 230 kg Ca $(OH)_2$ por día

Expresada como cal viva (CaO) con pureza de 90 por ciento.

W_{CaO} = 1 230 kg d^{-1} (56 kg CaO/mol/ 74 kg Ca $(OH)_2$/mol (100/90)
W_{CaO} = 1 034 kg d^{-1}

Volumen del silo de almacenamiento

V_{silo} = (1 034 kg d^{-1} /882 kg m^{-3}) (30 días) = 35.2 m^3

Dosificador y apagador de cal

Criterio de diseño

Capacidad para dosificar un lote en 15 minutos
Capacidad del apagador
C = 1 034 kg d^{-1}/ 3 lotes* 1 lote/15 min
C= 23 kg/minuto

Resumen del equipo requerido

- 2 tanques de mezclado o reactores de 89 m^3 cada uno
- 2 sopladores para inyección de aire con una capacidad de 2.67 m^3 min^{-1} cada uno
- 1 silo de cal de 35 m^3
- 2 dosificadores - apagadores de cal con una capacidad 23 kg min^{-1}

11.5.2. Estudio de caso: estabilización con cal de los lodos residuales provenientes de la planta de tratamiento de aguas residuales

El lodo proveniente del sedimentador secundario de una la planta, se sometió a espesamiento en el espesador piloto IMTA I con diferentes concentraciones de sólidos totales y después se realizaron pruebas de encalado a nivel laboratorio y planta piloto con el objeto de definir las dosis de cal que cumplan los siguientes criterios: (Ramírez, 2000).

- Mantener el pH de 12 o superior por un tiempo mínimo de dos horas después de encalado
- Mayor remoción de microorganismos patógenos usando como indicadores las coliformes fecales y los huevos de helminto
- Menor resistencia a la filtración

Para evaluar el sistema de encalado se realizaron dos etapas:

Prueba de jarras para seleccionar las dosis de cal y pruebas a nivel piloto para seleccionar las dosis óptimas.

El monitoreo del proceso se realizó de acuerdo a la tabla 4 y siguieron las técnicas propuestas por el Standard Methods.

La resistencia específica del lodo se determinó por el método del embudo Buchner.

11.5.2.1. Estimación de la dosis de cal

Pruebas a nivel laboratorio

El encalado se realizó inicialmente a nivel laboratorio con el objeto de estimar las diferentes dosis de cal que cumplan con los requerimientos de pH mayor e igual a 12 durante 2 horas.

Se utilizaron dos tipos de cal. Cal de construcción con una concentración de 70 por ciento de hidróxido de calcio y cal para tratamiento de aguas con una concentración de 90 por ciento de hidróxido de calcio.

Con los dos tipos de cal se realizaron pruebas preliminares para evaluar el cambio de pH con diferentes dosis de cal utilizando lechadas de 10 y 15 por ciento en peso. En estas condiciones se evaluaron dosis de cal entre 0.6 y 30 g L^{-1} como $Ca(OH)_2$.

Se estudiaron además de los cambios de pH, los cambios en la conductividad y los sólidos disueltos con estas dosis.

Selección de dosis de cal en pruebas de jarras

Para la selección de dosis se realizaron pruebas de jarras en diferentes concentraciones.

- Bajas dosis de cal. Aplicando dosis de cal entre 0.6 y 3.0 g L^{-1} como $Ca(OH)_2$
- Concentraciones medias de cal. Utilizando dosis entre 5 y 20 g L^{-1} como $Ca(OH)_2$
- Altas dosis de cal. Utilizando concentraciones de 20 a 32 g L^{-1}

Durante la realización de cada prueba de jarras se estudiaron los cambios en el pH, conductividad, temperatura y sólidos disueltos durante 7 días. También se determinaron los cambios en la concentración de sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV), sólidos suspendidos totales (SST), sólidos suspendidos volátiles (SSV) para cada prueba antes y después del encalado.

Influencia de la dosis de cal con la concentración de sólidos totales en el lodo

Considerando que a la salida del espesador el lodo puede tener diferentes concentraciones de sólidos totales, se realizó un estudio sobre el cambio en la dosis de cal para lodos con concentraciones entre 1 y 4 por ciento de sólidos totales. Este estudio se realizó a nivel laboratorio (prueba de jarras).

Las pruebas a nivel laboratorio se realizaron con dosis entre 5 y 20 g L^{-1}· para diferentes concentraciones de lodo.

Se hizo el estudio sobre los cambios en el pH, conductividad, sólidos disueltos durante 10 días, y se determinó el cambio en las características de los sólidos para cada dosis aplicada.

También se determinó la resistencia específica del lodo para cada dosis estudiada. Se determinó la remoción de microorganismos patógenos y huevos de Helminto con la dosis que mantuvieron un pH superior a 12, después de 20 días de encalado.

Con los mejores resultados obtenidos en las pruebas de jarras se realizaron las pruebas a nivel piloto.

Tabla 11.6 Parámetros de control y monitoreo del sistema de encalado

Parámetro	Monitoreo
pH y temperatura	Durante todo el proceso
Conductividad eléctrica y sólidos disueltos	Durante todo el proceso
ST, SVT, SST, SSV	Antes y después del encalado.
Resistencia específica	Antes y después del encalado.
Alcalinidad	Antes y después del encalado
Coliformes fecales	Antes y después del encalado
Huevos de Helminto	Antes y después del encalado.

Pruebas a nivel piloto

Estas se realizaron en una instalación que constaba de un reactor de 200 litros equipado con un agitador de velocidad variable que permitía controlar la velocidad de la mezcla rápida y la floculación.

Las mejores dosis obtenidas en pruebas de jarras se ensayaron a nivel piloto con el fin de confirmar los resultados. Para el monitoreo y análisis del proceso se midieron los mismos parámetros que para las pruebas en jarras. En esta etapa se adicionó la alcalinidad antes y después del encalado.

El lodo encalado en la planta piloto se deshidrató posteriormente en una centrífuga marca Westfalia y se hicieron análisis del lodo deshidratado.

También se estudió la adición de polímero durante el encalado para reducir la resistencia específica del lodo.

11.5.2.2. Resultados de los experimentos

Se presentan los resultados obtenidos del estudio de encalado realizado a nivel laboratorio y planta piloto. Todas las dosis de cal corresponden a g L^{-1} de hidróxido de calcio. El por ciento ST se refiere al porcentaje en peso de sólidos en la muestra y el por ciento SSV es el porcentaje correspondiente a la fracción volátil de los sólidos suspendidos

Pruebas de jarras con bajas dosis de cal

Estas pruebas se realizaron utilizando la cal para tratamiento de aguas con un contenido de 90 por ciento de hidróxido de calcio y utilizando una lechada al 10 por ciento.

Las pruebas se realizaron con lodos con concentraciones de sólidos totales de 4 a 6.8 por ciento y utilizando dosis de 0.6 a 3.0 g L^{-1}.

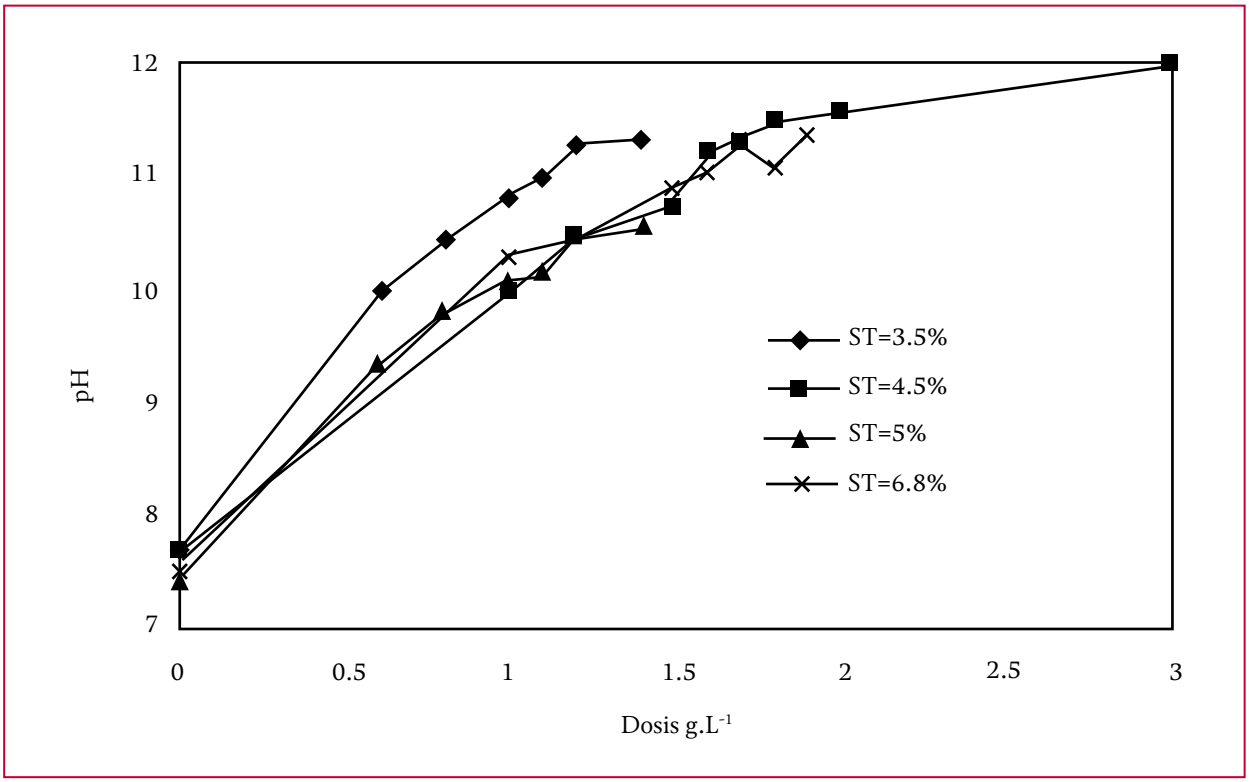
Tabla 11.7 Características del lodo utilizado en las pruebas de jarras

Prueba	pH	porcentaje de ST	COND. ELEC. mS/g	SDT (g L^{-1})
1	7.7	3.5	1.052	0.525
2	7.7	4.54	1.01	0.50
3	7.5	5.0	1.1	0.55
4	7.5	6.7	1.2	0.6

De acuerdo a los datos presentados en la tabla 11.7, no se observan cambios drásticos en las características del lodo al variar la concentración de los sólidos totales. El pH presenta variaciones sólo de dos décimas y la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos son casi constantes.

La Ilustración 11.18 presenta la variación del pH con la dosis de cal para diferentes concentraciones de sólidos totales. Se observa que una dosis de 1.2 g L^{-1} alcanza un pH de 11.28 en el lodo con 3.5 por ciento de ST. Con esta misma dosis el lodo de 5 por ciento de ST llega a un pH de 10.54 y el lodo con una concentración de 6.7 por ciento sólo alcanza un pH de 10.3. Por lo tanto se observa una correlación directa entre la

Ilustración 11.18 Variación del pH con la dosis de cal para diferentes concentraciones de sólidos totales en el lodo



dosis de cal y la concentración de ST para alcanzar un determinado pH.

Al adicionar cal en bajas concentraciones (menores de 1 mg L^{-1}) existe una disminución en la concentración de los sólidos disueltos totales (SDT). Después de esta concentración se inicia el aumento de los sólidos disueltos y es más rápido con las menores concentraciones de sólidos totales en el lodo. Para concentraciones de ST de 3.5 por ciento los SDT empiezan a aumentar con dosis de 1.0 g L^{-1} y para el lodo con 6.7 por ciento de ST este aumento se observa con dosis de 1.5 g L^{-1}.

La Tabla 11.8, muestra los cambios en la composición de los sólidos después del encalado. Se observa el incremento en los sólidos totales y en los sólidos suspendidos al agregar diferentes dosis de cal; así como el decremento en los sólidos volátiles.

La aplicación de bajas dosis de cal no es suficiente para elevar el pH a 12 en ninguno de los experimentos, pero si consigue una reducción en SSV, hasta un 50 por ciento con 1.2 g L^{-1} de cal.

Se hizo la determinación de la resistencia específica del lodo a la filtración. El lodo crudo presentó una resistencia específica de 43.7 × 107 $seg^2\ g^{-1}$ y al adicionar cal en dosis hasta 1.4 g L^{-1} esta resistencia fue incrementando gradualmente, como se observa en la Ilustración 11.19.

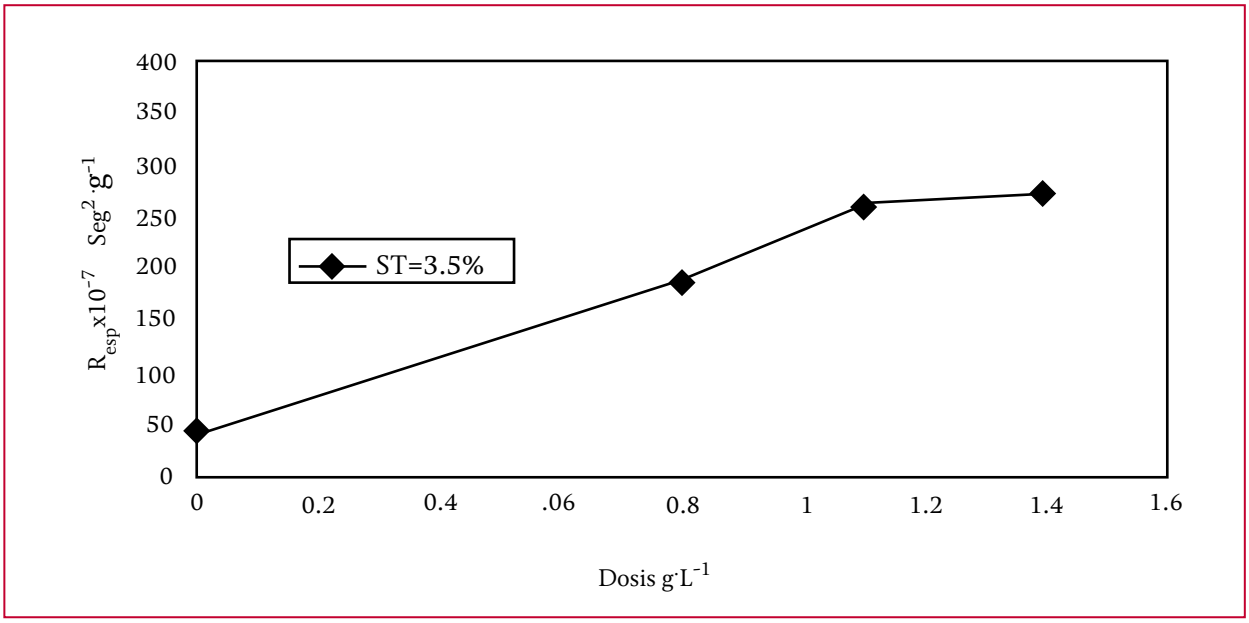
Prueba de jarras para definir dosis de cal

Se realizó otro estudio de prueba de jarras en un amplio rango de concentración y utilizando una cal con un contenido de sólo 70 por ciento como $Ca(OH)_2$.

Tabla 11.8 Cambios en la composición de los sólidos después del encalado

Muestra	pH	porcentaje ST	porcentaje STV	porcentaje SST	porcentaje SSV
Lodo crudo	7.7	4.0	38.4	81.4	45.4
0.6 g L^{-1} cal	9.99	3.5	23.3	95.1	23.5
0.8 g L^{-1} cal	10.5	3.62	22.2	95.5	46.56
1.0 g L^{-1} cal	10.86	3.9	21	99.8	19.8
1.1 g L^{-1} cal	10.97	4.0	19.5	99.2	18.06
1.2 g L^{-1} cal	11.28	4.3	16.74	93.3	16.64
1.4 g L^{-1} cal	11.34	4.3	16.7	92.0	15.63
lodo crudo	7.5	5.08	24.0	89.3	23.4
0.6 g L^{-1} cal	9.38	5.29	20.8	98.2	18.2
0.8 g L^{-1} cal	9.85	5.54	16.2	97.2	15.5
1.0 g L^{-1} cal	10.11	5.62	15.4	99,8	12.7
1,1 g L^{-1} cal	10.18	5.65	14.76	99.7	12.4
1.2 g L^{-1} cal	10.5	5.95	12.9	96.2	11.8

Ilustración 11.19 Resistencia específica del lodo con bajas concentraciones de cal



Se realizaron pruebas de jarras con dosis entre 3.5 y 27.3 g L^{-1} como hidróxido de calcio y con lodo espesado con concentraciones de ST de 2.26 y 1.77 por ciento respectivamente.

El lodo utilizado tiene un pH de 7.42 y una concentración de sólidos volátiles de 58 a 54 por ciento respectivamente.

Se realizó el encalado aplicando diferentes dosis. Como se observa en la Ilustración 11.20. El pH de 12 requerido durante 2 horas en el encalado se obtiene con dosis de 5 g L^{-1} de cal. Las concentraciones mayores a estas dosis mantienen su pH entre 12 y 12.3 dos horas después del encalado. En estas condiciones la concentración de sólidos disueltos se encuentra entre 4 y 4.8 gramos por litro.

Para observar el cambio del pH con las diferentes dosis en el tiempo, se realizó este monitoreo durante 10 días. Para las dosis de cal entre 3.5 y 9.1 g L^{-1} después de 2 días de encalado, empieza un descenso paulatino de pH y después de 3 días, en todos los experimentos han descendido una media unidad de pH, que podría afectar la eficiencia del encalado.

También se observa una disminución en el valor de conductividad de cada muestra. Esta reducción es de 1.0 a 0.5 unidades dependiendo de la dosis aplicada.

Al aplicar mayores dosis de cal entre 10.5 y 27.3 g L^{-1}, se observa que el pH se mantiene arriba de 12 durante 4 días, después de este tiempo, el pH continua bajando paulatinamente hasta disminuir de 0.5 a 0.8 unidades de pH, nueve días después del encalado. Igual comportamiento se observa en la conductividad de la conductividad del sistema, donde el decaimiento después de nueve días es de aproximadamente una unidad en este periodo de tiempo.

Se realizó la determinación de la resistencia específica para las jarras de los experimentos (Ilustración 11.21). Se observa que la adición de cal favorece considerablemente la filtración del lodo. Disminuyendo la resistencia al aumentar la dosis de cal.

La concentración de estos microorganismos se expresa como kg. de sólidos suspendidos totales. La remoción de Coliformes Fecales con bajas dosis de cal (7-9 g L^{-1}) es del orden de 4 unidades logarítmicas y con dosis más altas la remoción fue de 4 o 5 logaritmos en todos los experimentos.

Con respecto a los huevos de Helminto se obtuvieron altas concentraciones en el lodo siendo los más abundantes los de Ascaris sp con concentraciones de 10^5 y 10^6/ kg. de SST, seguido de Trichuris sp con concentraciones de 10^3 y 10^4/ kg. SST, Hymenolepis con concentraciones de 10^4/kg. SST y el menos abundante fue Toxocora sp con concentraciones de 10^3/kg^3 SST.

La adición de cal al lodo produjo una reducción total de Toxocora sp con todas las concentra-

Tabla 11.9 Características del lodo utilizado en las pruebas de jarras

Dosis cal g L^{-1}	pH	por cientoST	COND.ELEC. mS/g	SDT g L^{-1}	SST g L^{-1}	por ciento SSV
3.5-9.1	7.42	2.26	1.01	0.505	18.7	58.0
10.5-27.3	7.42	1.77	1.01	0.505	17.2	54

ciones, sin embargo se observó su presencia en algunas muestras con concentraciones de 10^2 y 10^3 /kg. SST para las dosis de 7 y 12 g L^{-1} de cal. La remoción de Hymenolepis sp fue casi total durante estos experimentos, sólo se encontró en una muestra de 14 g L^{-1}. Trichuris sp se observó resistencia a este tratamiento obteniéndose remociones de sólo un logaritmo con la mayoría de las dosis de cal adicionadas. Igual comportamiento se observa para Ascaris sp, el cual permanece en concentraciones de 10^4 y 10^5/kg. SST para todas las dosis de cal adicionadas.

Ilustración 11.20 Variación del pH con el tiempo. Lodo residual con 2.26 por ciento de ST

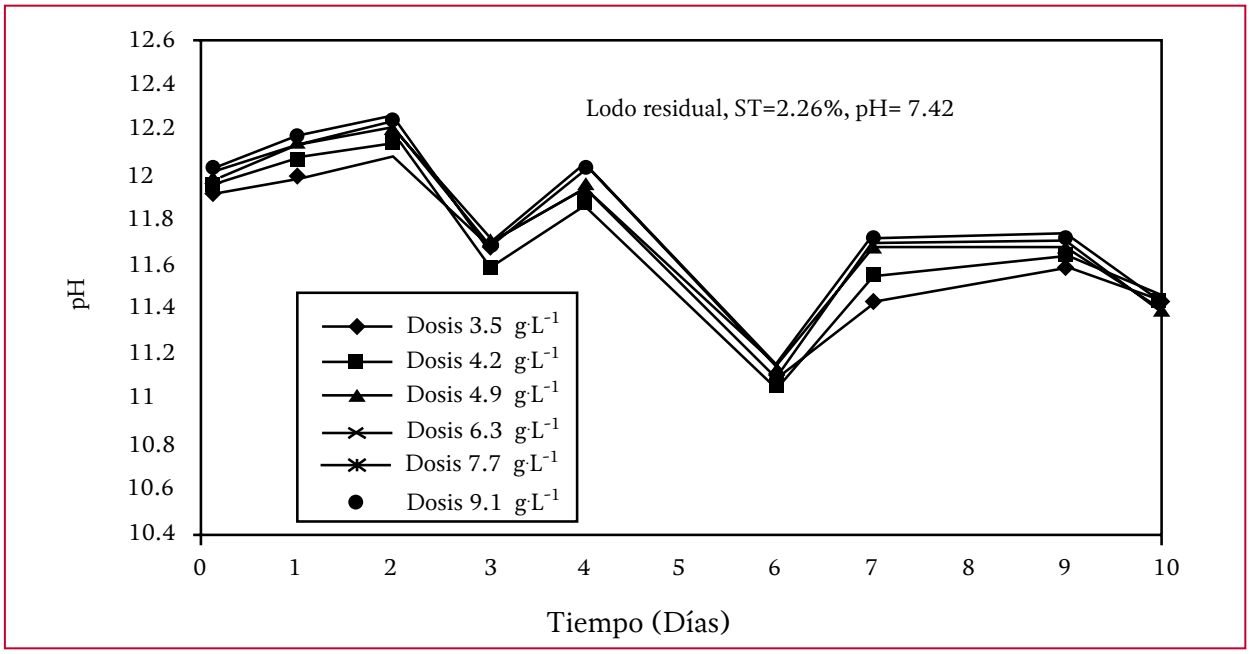


Ilustración 11.21 Variación de la resistencia específica del lodo con diferentes dosis

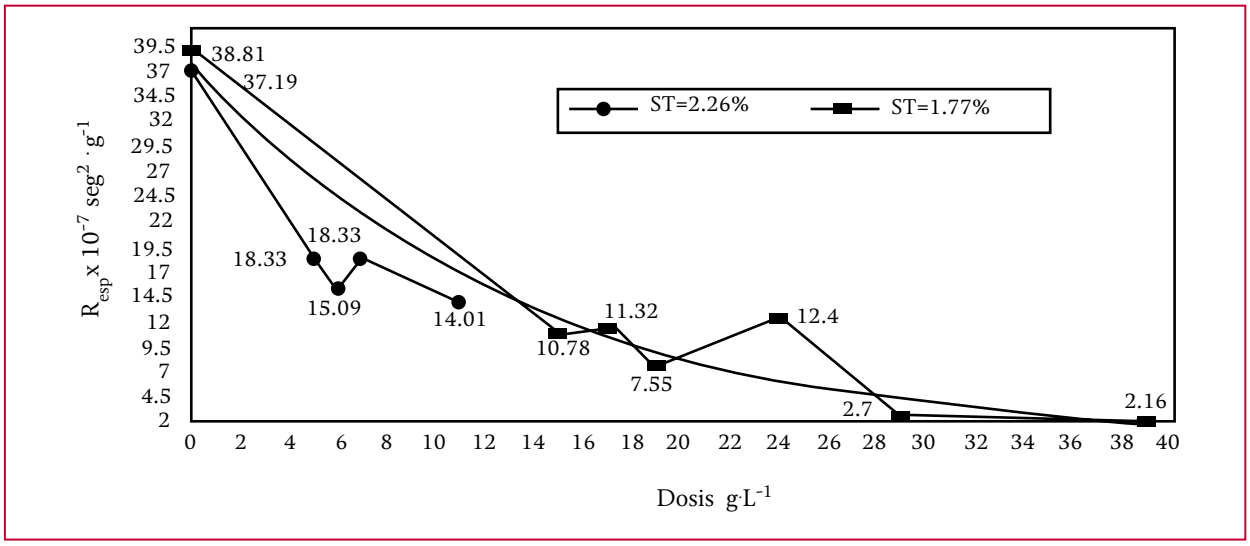


Tabla 11.10 Microorganismos patógenos antes y después del encalado

Muestra	C. F. NMP Kg^{-1} SST	Ascaris Kg^{-1} SST	Trichuris Kg^{-1} SST	Hymenolepis Kg^{-1} SST	Toxocara Kg^{-1} SST
Lodo crudo (1.79 por ciento ST)	1.142×10^{6}	1.09×10^{6}	6.85×10^{4}	1.83×10^{4}	2.28×10^{3}
7 g L^{-1} cal	1.2×10^{2}	1.07×10^{5}	2.33×10^{3}	-	-
9 g L^{-1} cal	1.21×10^{2}	1.86×10^{5}	7.27×10^{3}	-	-
11 g L^{-1} cal	7.84×10^{2}	8.16×10^{4}	1.56×10^{3}	-	-
Lodo crudo (22.59 por ciento ST)	8.69×10^{6}	9.12×10^{5}	2.87×10^{4}	2.78×10^{4}	-
9 g L^{-1} cal	68	1.27×10^{5}	-	-	-
10 g L^{-1} cal	55	8.54×10^{4}	2.19×10^{3}	-	-
12 g L^{-1} cal	58	8.23×10^{4}	-	-	-
14 g L^{-1} cal	72.7	6.98×10^{4}	-	1.45×10^{3}	-
16 g L^{-1} cal	64	8.88×10^{4}	1.27×10^{3}	-	-
Lodo crudo (3.53 por ciento ST)	1.31×10^{6}	5.84×10^{5}	3.94×10^{3}	4.32×10^{4}	2.62×10^{3}
7 g L^{-1} cal	63.5	4.32×10^{4}	-	-	1.27×10^{3}
10 g L^{-1} cal	58.8	8.0×10^{4}	2.35×10^{3}	-	-
12 g L^{-1} cal	47	1.12×10^{5}	6.58×10^{3}	-	9.92×10^{2}
14 g L^{-1} cal	46.5	4.65×10^{4}	9.30×10^{2}	-	-
16 g L^{-1} cal	44	2.81×10^{4}	-	-	-
18 g L^{-1} cal	43.5	1.82×10^{4}	-	-	-
Lodo crudo (4.12 por ciento ST)	1.17×10^{7}	5.11×10^{5}	9.5×10^{3}	2.6×10^{4}	-
7 g L^{-1} cal	65.5	2.16×10^{5}	1.31×10^{4}	-	1.31×10^{3}
9 g L^{-1} cal	43.8	1.46×10^{5}	1.13×10^{4}	-	-
10 g L^{-1} cal	43.5	5.56×10^{4}	-	-	-
12 g L^{-1} cal	49.4	1.32×10^{5}	2.96×10^{3}	-	9.87×10^{2}
14 g L^{-1} cal	49.4	7.3×10^{4}	2.96×10^{3}	-	-

12

Deshidratación de lodos

12.1. Introducción

La deshidratación es la eliminación del agua de los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales para lograr una reducción de mayor volumen que el conseguido por el espesamiento. La deshidratación se realiza principalmente para reducir los costos de inversión y de operación que implica el manejo del lodo después de la estabilización. Con la deshidratación de los lodos se logra incrementar hasta un 20 por ciento la concentración de sólidos en el lodo. Cuando se inicia con una concentración inicial de sólidos en el lodo del 5 por ciento, se reduce el volumen en tres cuartas partes y se obtiene un material no fluido, denominado torta de lodos. La deshidratación es sólo un componente del proceso de tratamiento de aguas residuales y lodos, que deben integrarse en un sistema general de tratamiento de aguas residuales para optimizarlo y de esta forma reducir los costos totales del tratamiento. (WEF, *et al*., 2012).

12.2. Objetivo

El objetivo del presente capítulo es describir las bases teóricas y características de los diferentes procesos de deshidratación, así como presentar los criterios que intervienen en el diseño y en la selección de los equipos de deshidratación de lodos.

12.3. Bases teóricas

Para realizar la deshidratación del lodo residual espesado se pueden utilizar métodos naturales o métodos artificiales. Los métodos artificiales se emplean para acelerar el proceso de deshidratación y reducir el área necesaria para su realización. El desempeño de esta operación depende de la energía consumida en el proceso (Mijaylova, 1999).

Los procesos convencionales para la deshidratación artificial de los lodos pueden subdividirse en dos grupos:

- Métodos basados en la separación del agua del lodo debido a la presión externa por medio de una membrana aislante permeable al agua (filtros prensa de bandas, filtros prensa de placas, filtros al vacío)
- Métodos basados en la separación del agua mediante un aumento de la gravedad (centrífugas)

El diseño de instalaciones adecuadas para la deshidratación de lodos, no es solo la selección del equipo de un catálogo, requiere del análisis sistemático de las diferentes opciones del sistema, de las características de los lodos y de las variables específicas del sitio, incluyendo otros procesos de tratamiento.

La selección de los equipos de deshidratación está determinada por los tipos de lodos, las características del lodo producido después del secado y del espacio disponible. Los lechos de secado y/o lagunas se usan en plantas pequeñas donde la disponibilidad de terreno no es un problema. Para las instalaciones que no dispongan de terreno, es recomendable utilizar medios mecánicos para la deshidratación. El control de olores es una consideración importante para el diseño, ya que el nivel de olores generados varía dependiendo del tipo de lodos y del equipo mecánico seleccionado. Los equipos de deshidratación de alto impacto y los equipos de transporte pueden incrementar la liberación de olor, especialmente cuando el lodo fue estabilizado anaerobiamente (Murthy & Novak, 2001).

Algunos lodos, particularmente los que son estabilizados anaerobiamente, no son fáciles de deshidratar por medios mecánicos. Estos lodos pueden ser deshidratados en lechos de arena con buenos resultados. Cuando un lodo en particular debe ser deshidratado mecánicamente, es difícil o imposible de seleccionar el dispositivo de deshidratación óptimo sin llevar a cabo estudios a escala de laboratorio o piloto (Metcalf & Eddy, 2003).

12.3.1. Acondicionamiento de lodos

El acondicionamiento para la deshidratación incluye tratamientos químicos y físicos para mejorar la remoción del agua en el lodo y la captura de sólidos. Hay tres sistemas comunes de acondicionamiento que utilizan químicos inorgánicos, polímeros orgánicos y calentamiento. En la Tabla 12.1 se muestran y comparan los efectos de los sistemas de acondicionamiento en una mezcla de lodos primario y de lodo del sistema de lodos activados.

El acondicionamiento siempre tiene un efecto sobre la eficiencia del proceso de deshidratación. Una evaluación del proceso de acondicionamiento debe por lo tanto, tener en cuenta la inversión y los costos de operación y mantenimiento de todo el sistema.

12.3.1.1. Factores que afectan el acondicionamiento

Las características del lodo que afectan al proceso de deshidratación y por lo cual es necesario emplear el acondicionamiento son: el tamaño y dis-

Tabla 12.1 Efectos del acondicionamiento con químicos inorgánicos, polímeros orgánicos, o calentamiento sobre la mezcla de lodo primario y lodo residual del sistema de lodos activados, (US, EPA, 1985)

	Químicos inorgánicos	Polímeros orgánicos	Calentamiento
Mecanismo de acondicionamiento	Coagulación y floculación	Coagulación y floculación	Las propiedades de la superficie se alteran y las células de la biomasa se rompen, liberación de sustancias químicas, hidrólisis
Efecto sobre la tasa de carga permisible de sólidos	Puede incrementarse	Puede incrementarse	Se puede incrementar significativamente
Efecto sobre el sobrenadante	Puede mejorar los sólidos suspendidos capturados	Puede mejorar los sólidos suspendidos capturados	Puede haber un incremento significativo en color, sólidos suspendidos, DBO soluble, $N\text{-}NH_3^-$ y DQO.
Efecto sobre la mano de obra	Pocos efectos	Pocos efectos	El operador requiere habilidades y un fuerte programa de mantenimiento preventivo
Efecto sobre la masa de lodos	Incremento significativos	Ningún efecto	La masa presente se reduce pero puede incrementarse la masa a través de la recirculación

tribución de las partículas, la carga superficial y la interacción de las partículas. También influyen la producción del biopolímero, el grado de crecimiento filamentoso, la proporción del lodo y el contenido de inorgánicos (US, EPA, 1985).

El método de deshidratación también afecta la selección de los acondicionadores químicos dependiendo del equipo de mezclado seleccionado y de las características particulares de los métodos de deshidratación. Por ejemplo, los polímeros se usan comúnmente para la deshidratación en las centrífugas y en los filtros de bandas pero se usan con menos frecuencia para los filtros prensa. Es recomendable realizar pruebas a escala piloto o laboratorio para determinar los tipos de agentes acondicionadores requeridos, particularmente para los lodos y biosólidos que pueden presentar problemas para la deshidratación (Metcalf & Eddy, 2003).

El primer objetivo del acondicionamiento es incrementar el tamaño de las partículas por la combinación de partículas pequeñas en agregados más grandes. Ya que las partículas del lodo están típicamente cargadas negativamente y se repelen en vez de atraerse una con otra, el acondicionamiento se usa para neutralizar los efectos de la repulsión electrostática de las partículas coloidales pueden tener y así incrementar el tamaño.

El acondicionamiento se logra por medio del proceso de coagulación- floculación. La coagulación involucra la desestabilización de las partículas del lodo por medio del decremento de la repulsión electrostática que interactúa entre ellas. Este proceso ocurre a través de la compresión de la doble capa eléctrica que rodea cada partícula. La floculación es la aglomeración de coloides y finalmente se aplica una agitación suave para separar la materia suspendida (US, EPA, 1985).

Con el fin de minimizar el cizallamiento (fuerza cortante) de los flóculos, la mezcla debe proporcionar la energía suficiente para dispersar el acondicionador dentro del lodo. En las aplicaciones de deshidratación, se debe considerar la posibilidad de aplicar el acondicionamiento químico a cada unidad de deshidratación, ya que no siempre es económico tener solo un sistema de acondicionamiento común para varias unidades. Los problemas pueden surgir cuando haya variaciones en el flujo o caudal de las diferentes corrientes, sobre todo en el arranque y paro de las diferentes unidades de deshidratación. Se debe optimizar o estudiar la ubicación de la unidad de acondicionamiento con respecto al dispositivo de espesamiento o deshidratación.

El acondicionamiento químico inorgánico, está asociado principalmente con los filtros prensa y de vacío en el proceso de deshidratación. Los químicos normalmente utilizados para el acondicionamiento de lodos del agua residual municipal son la cal y el cloruro férrico. Los menos comunes son el sulfato ferroso, el cloruro ferroso y el sulfato de aluminio.

Los polímeros orgánicos se usan ampliamente para el acondicionamiento y hay una gran variedad de estos. Es importante entender que estos materiales difieren en su composición química, funcionalidad efectiva y la rentabilidad. Los polímeros se usaron originalmente para el acondicionamiento de lodos primarios y para la mezcla de lodo primario y secundario fácil de deshidratar por medio de los filtros de vacío y las centrífugas de tazón sólido. La mejora en la efectividad de los polímeros permite que se usen frecuentemente en la deshidratación. Las ventajas de seleccionar polímeros sobre acondicionadores químicos inorgánicos son: (US, EPA, 1985):

- Se produce poca masa de lodo adicional. Los acondicionadores inorgánicos normalmente incremental la masa de lodo en un 15 a 30 por ciento
- Si el lodo deshidratado se usa como combustible, los polímeros no disminuyen el valor del combustible
- Permiten hacer las operaciones de limpieza manualmente
- Reducen los problemas de operación y mantenimiento

La correcta selección del polímero requiere de trabajos de selección con proveedores de polímeros, con proveedores del equipo y con el personal de la operación de la planta. De ser posible las evaluaciones se deben realizar en el sitio, con el lodo real. La evaluación de los polímeros es un proceso continuo, ya que nuevos tipos y grados de polímeros se introducen en el mercado continuamente. Para seleccionar un polímero como agente de acondicionamiento se deben considerar los siguientes aspectos: (a) la reducción de costos en el sistema de acondicionamiento, (b) la reducción de la cantidad de lodos y (c) la eliminación de los problemas de operación para la disposición final que se asocian con los agentes acondicionadores inorgánicos. Los requerimientos de polímero varían de 1.4 a 13.6 kg de polímero por tonelada de lodo seco. El acondicionamiento requerido para cada uno de los diferentes sistemas de deshidratación se muestra a continuación:

12.3.1.2. Lechos de secado

El acondicionamiento con polímeros no es ampliamente utilizado, sin embargo, la adición de 0.25 a 1 kg de polímero seco por tonelada de lodos secos puede incrementar la tasa de deshidratación de 2 a 4 veces (Beardsley, 1976) (Jannett & Santry, 1969).

12.3.1.3. Filtros prensa de placas

Diferentes publicaciones indican que el acondicionamiento con polímeros se usa para los filtros prensa si se hace con precaución. La dosis se optimiza y controla para una óptima concentración de sólidos en la torta, incrementar la captura de sólidos, y disminuir la resistencia para deshidratar el lodo. (Harrison, 1978) (US, EPA, 1979).

Los polímeros que tienen mejor desempeño son aquellos que producen un flóculo fuerte. Polímeros catiónicos de bajo peso molecular proporcionan un rendimiento aceptable en los filtros prensa de placas.

12.3.1.4. Filtros prensa de bandas

La experiencia de operación indica que todos los filtros prensa requieren del acondicionamiento con polímeros para que trabajen mejor. Comparados con otros sistemas mecánicos de deshidratación, los filtros prensa de bandas deben optimizar la dosis de polímero en función de las características del lodo. El drenado, que es la primera sección del proceso de deshidratación, es inadecuado si el acondicionamiento de los lodos es pobre, causando un poca extracción de los sólidos drenados; o en circunstancias extremas, descontrol en el flujo del lodo en esta sección (NCASI, 1978). Un bajo acondicionamiento de los lodos provoca que los sólidos biológicos puedan taponar u obstruir la malla fina del filtro. Un sobre acondicionamiento también puede ser un

problema. Demasiado polímero puede causar problemas con la remoción de la torta e incrementar el taponamiento del medio. En la Tabla 12.2 se enlistan dosis típicas de polímeros que se adicionan para el acondicionamiento de lodos en los filtros prensa de bandas. Las dosis de polímero están en función del porcentaje de sólidos presentes en los lodos (US, EPA, 1979).

12.3.1.5. Centrífugas

Las centrífugas de tazón sólido o tornillo usualmente requieren polímeros para obtener una buena deshidratación de los lodos del agua residual municipal. En la Tabla 12.3 se enlistan las dosis típicas de polímeros secos para el acondicionamiento de varios tipos de lodos, en la deshidratación por medio de las centrífugas (US, EPA, 1979).

Tabla 12.2 Dosis típicas de polímeros adicionados a los filtros prensa de bandas, (US, EPA, 1979)

Tipo de lodo	kilogramos de polímero seco adicionado por tonelada de lodo seco
Lodo primario	1.8-3.6
Primario + lodo de filtro rociador	1.35-4.5
Primario + lodo del sistema de lodos activados (usando aire)	1.8-4.5
Lodo del sistema de lodos activados (usando aire)	3.6-5.4
Lodo del sistema de lodos activados (usando oxigeno)	3.6-5.4
Lodo primario + lodos del sistema de lodos activados (usando aire), estabilizados aerobiamente.	1.8-4.5
Lodo primario estabilizado anaerobiamente	0.9-2.7
Lodo primario + lodos del sistema de lodos activados (usando aire), estabilizados anaerobiamente.	1.35-4.05

12.3.2. Sistemas utilizados en la deshidratación

12.3.2.1. Lechos de secado

Cuando se dispone de terreno, la deshidratación de lodos por medios naturales puede ser muy atractiva, tanto desde el punto de vista de costos de inversión y operación. Teniendo en cuenta el aumento de los costos de la energía eléctrica, este método es aún más atractivo. Dos tipos de sistemas de secado se clasifican como naturales: lechos de secado y secado en lagunas (US, EPA, 1979).

Los lechos de secado se toman por una pared de 0.3 a 1.0 m de alto y un sistema de filtración o drenaje poroso. El sistema de drenaje puede estar formado por varias capas intercaladas de arena y grava, combinaciones de arena y grava con cemento, rejillas de metal ranuradas, o de

Tabla 12.3 Dosis típicas de polímero seco adicionado a las centrífugas para el acondicionamiento de los lodos previo a la deshidratación, (US, EPA, 1979)

Tipo de lodo	Kilogramos de polímero seco adicionado por tonelada
Lodo primario	0.9-2.25
Primario + lodo del sistema de lodos activados (usando aire)	1.8-4.5
Lodo primario + lodos del sistema de lodos activados (usando aire), estabilizado térmicamente	1.35-2.25
Lodo primario + lodo de filtros rociadores estabilizado térmicamente	0.9-2.2
Lodo primario estabilizado anaerobiamente	2.7-4.5
Lodo primario + lodos del sistema de lodos activados (usando aire), estabilizados anaerobiamente.	3.15-4.5

un medio poroso permanente. Entre los equipos y accesorios requeridos se encuentran: tuberías de alimentación de lodos, medidores de flujo, tanques para reactivos químicos, tuberías, bombas dosificadoras, drenaje de lixiviados, líneas de recirculación, equipo mecánicos para la recolección de lodos y en algunos casos una cubierta o techo.

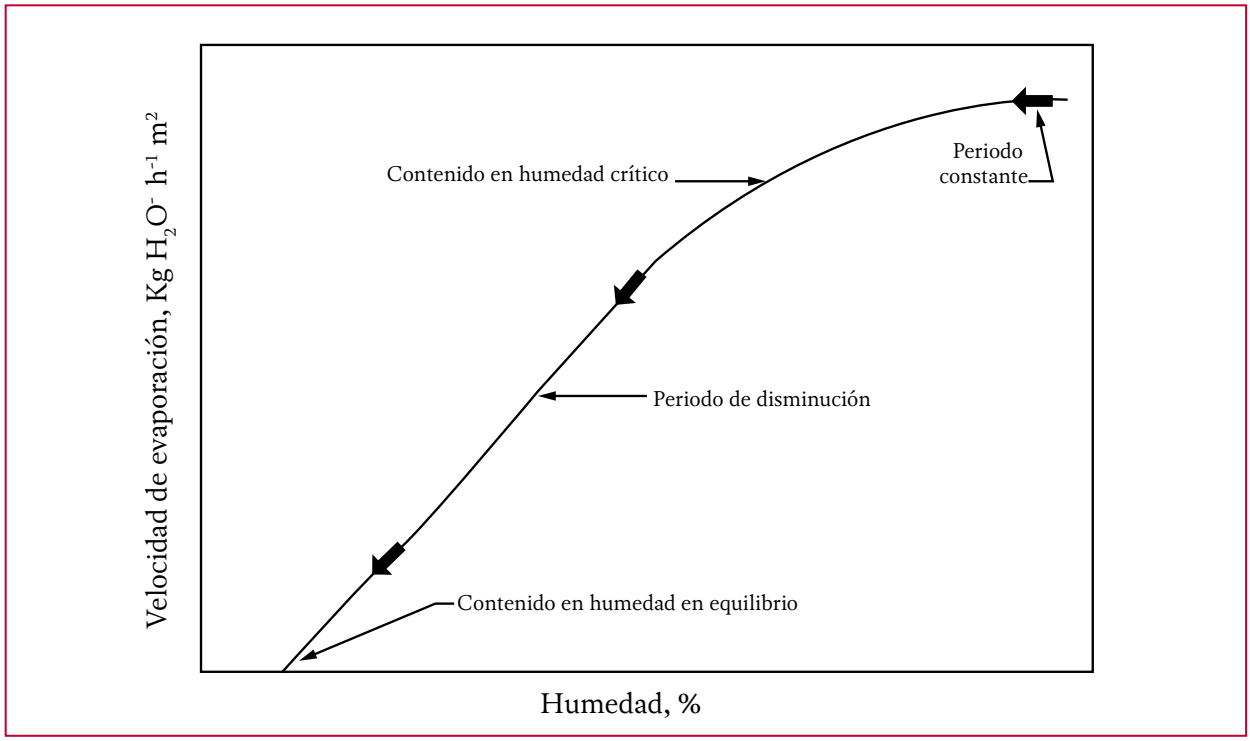
Los procedimientos de operación comunes para todos los tipos de lechos de secado involucran:

- Bombeo del sobrenadante de los lechos de secado con profundidad 20 a 30 cm
- Manejo de equipos para el acondicionamiento químico del lodo
- Una vez que se alcance el nivel deseado en el lecho de secado, secar el lodo hasta la concentración final de sólidos deseada. Esta concentración puede variar entre el 18 y 60 por ciento, dependiendo del tipo de lodo, la velocidad de secado, el grado se sequedad requerido etc
- Remover el lodo deshidratado por medios mecánicos o manuales
- Finalmente repetir el ciclo

12.3.2.2. Lechos de secado de arena

La concentración de sólidos en el afluente no afecta a los lechos de arena y pueden producir un lodo más seco que cualquier método con dispositivos mecánicos. Este proceso requiere mano de obra y terreno. Sin embargo, las frecuentes reparaciones y altos costos de inversión inicial de los sistemas mecánicos, hacen más atractivo el secado en arena, donde hay disponibilidad de terreno y condiciones ambientales aceptables. El costo adicional del techo o cubierta y el monitoreo de la calidad del agua subterránea para estos sistemas pueden incrementar mucho los costos.

Ilustración 12.1 Curva de velocidad de evaporación, (Ramalho, 1996)



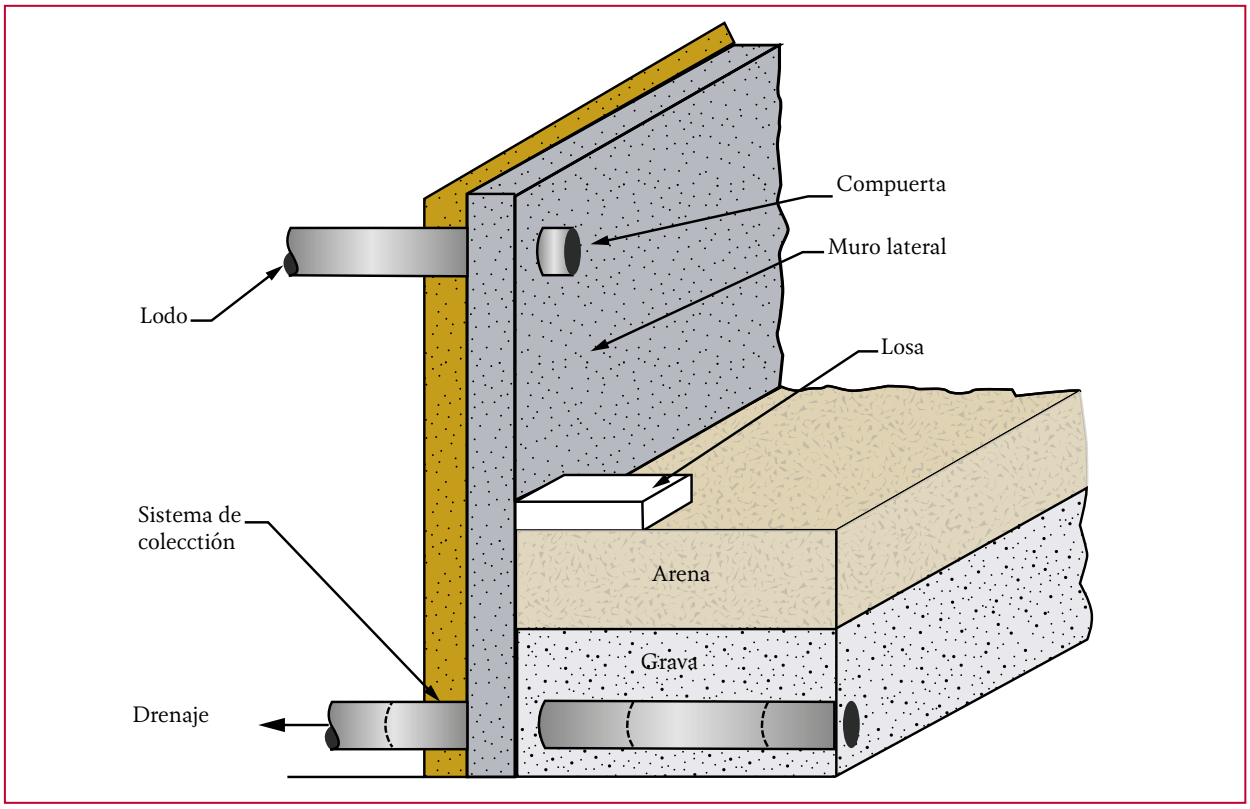
En los lechos de secado de arena actúan dos mecanismos para la deshidratación de los lodos (Ramalho, 1996).

1. Percolación o filtración del agua a través del lecho de arena. La proporción de agua eliminada por este mecanismo es del 20 al 55 por ciento, dependiendo del contenido inicial de sólidos en el lodo y de las características de los sólidos. La percolación suele completarse en 1-3días, resultando una concentración de sólidos del 15-25 por ciento
2. La evaporación de agua, a través de los mecanismos de radiación y convección ver sección 12.3.3. de este capítulo. La velocidad de evaporación es más lenta que la percolación y depende de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire. En la Ilustración 12.1 se representa una curva típica de evaporación, pudiendo distinguirse dos secciones correspondientes a periodos en que se mantiene constante o disminuye

Durante el periodo constante, la superficie de lodo está húmeda, siendo la velocidad de evaporación relativamente independiente de la naturaleza del lodo. Estos valores son inferiores a los observados en la superficie del agua, evaporación de agua libre, debido al hecho de que el plano de vaporización está por debajo de la superficie del sólido. La evaporación continúa a velocidad constante hasta que se alcanza una humedad crítica.

Cuando se alcanza la humedad crítica el agua no emigra a la superficie del lodo con la misma rapidez con que se evapora, empieza el periodo de disminución. La velocidad de secado en este

Ilustración 12.2 Lecho de secado de arena típico, (WEF, et al., 2012)



periodo depende del espesor del lodo, de las propiedades físicas y químicas, y de las condiciones atmosféricas. El secado por debajo de la superficie continúa hasta que se alcanza una humedad de equilibrio (Ramalho, 1996).

Los lechos de secado de arena son los más tradicionales y comunes dentro de la tecnología de lechos de secado. En la Ilustración 12.2 se muestran las características típicas de un lecho de secado de lodos. Los lechos de secado son generalmente rectangulares para permitir el retido o recogida del lodo con un cargador frontal. Las dimensiones pueden ser de 4.5 a 18 m de ancho y de 15 a 45 m de largo, con paredes laterales y verticales que son típicamente de concreto (WEF, *et al*., 2012). Por lo general, se colocan de 10 a 23 cm de arena más 20-46 cm de grava graduada o piedra. La arena es generalmente de 0.3 a 1.2 mm de diámetro y tiene un coeficiente de uniformidad menor de 5.0. La grava normalmente se clasifica de 0.3 a 2.5 cm de diámetro efectivo. Anteriormente la tubería de desagüe inferior o drenaje era normalmente de arcilla vitrificada, pero actualmente se utiliza más tubería de plástico. Las tuberías deben ser mayores de 10 cm de diámetro, deben tener una separación de 2.4 a 6 m de distancia, y una pendiente mínima de 1 por ciento (US, EPA, 1979) (Metcalf & Eddy, 2003).

En los siguientes puntos se describe con mayor detalle las características de los lechos de secado de arena (Mijaylova, 1999).

- **Paredes laterales**: la construcción arriba de la capa de arena deberá incluir una pared vertical con un borde libre 0.5 a 0.9 metros. Las paredes pueden ser de tierra con pasto, tablones de madera, preferentemente tratados para evitar pudrición; viguetas de concreto; concreto reforzado o bloques de concreto colocados alrededor de la capa de arena y extendidos hacia el bajo dren de grava, como una manera de evitar la penetración de hierbas y pasto
- **Bajo dren:** generalmente está construidos de tubería perforada de plástico o arcilla vitrificada, con una pendiente hacia un colector principal o tubería de salida
- **Tubería principal del bajo dren.** Debe tener no menos de 100 mm de diámetro y una pendiente mínima de 1 por ciento. La distancia entre la tubería será de 2.5 a 6 m y deberá tomar en cuenta la forma de retirar el lodo para no dañar el bajo dren
- **Membrana impermeable**. En caso de que las infiltraciones pongan en peligro el agua subterránea, se debe sellar el piso de tierra con una membrana impermeable. El área alrededor del sistema del bajo dren se rellena con grava gruesa
- **Capa de grava**: Ésta debe ser graduada y tener una profundidad de 200 a 460 mm, con el material relativamente grueso en el fondo. Las partículas de grava varian entre 3y 25 mm de diámetro
- **Capa de arena**: la profundidad de la capa de arena varía de 200 a 460 mm; sin embargo, se sugiere una profundidad mínima de 300 mm, para asegurar un buen efluente y reducir las pérdidas de arena debido a las operaciones de limpieza. La arena debe tener partículas limpias, duras, resistentes, libres de arcilla, limo, polvo u otra materia extraña; un coeficiente de uniformidad no

mayor de 4.0, pero de preferencia debajo de 3.5; y un tamaño efectivo de los granos de arena entre 0.3 y 0.75 mm. Se puede utilizar también grava pequeña y carbón de antracita triturado a tamaño efectivo de 0.4 mm

- **Divisiones.** Para la remoción manual del lodo, los lechos de secado se dividen en secciones de 7.5 m de ancho, pero dependen del método de remoción utilizado. Se han construido lechos con longitudes de 30 a 60 m. Sin embargo, si se van usar polímeros, la longitud no deberá exceder de 15 a 20 m, para evitar problemas de distribución del lodo. El ángulo de reposo para muchos lodos tratados con polímeros puede ser tan plano como 1.120 o mayor. Las divisiones pueden ser de terracería o paredes construidas con bloques de concreto, concreto reforzado, tablones y postes ranurados. En caso de utilizar tablones, estos se extienden de 0.6 a 0.9 m debajo de la capa de grava
- **Decantadores o sistema de recolección de agua.** En el perimetro del lecho se instala un sistema para decantar o retirar el sobrenadante, ya sea en forma continua o intermitente. Los decantadores son útiles en el caso de lodos secundarios relativamente diluidos, lodos tratados con polímeros y en la remoción de agua pluvial
- **Canal de distribución de lodo.** El lodo se aplica a las distintas subdivisiones de los lechos de lodo a través de conductos cerrados o tuberías a presión con válvulas en las salidas de cada sección

Ilustración 12.3 Lecho de secado de arena

de lecho, o a través de un canal abierto con aberturas laterales controladas mediante compuertas manuales. El canal es más fácil de limpiar después de cada uso. Con cualquier tipo, se requiere una losa de concreto de 130 mm de espesor y 0.90 m^2 de superficie para recibir el lodo y evitar la erosión de la superficie de arena

- **Rampas y pasillos.** Si se utiliza un camión para la remoción de la torta seca, se requieren rampas y pasillos de concreto a lo largo del eje central de cada sección

En la Ilustración 12.3 se muestra un lecho de secado de arena típico de una planta de tratamiento de aguas residuales.

12.3.2.3. Lechos de secado pavimentados

La principal ventaja que presentan es el hecho de que los cargadores frontales pueden entrar con mayor facilidad, para la remoción de la torta, y que se reduce el mantenimiento del lecho. Dos tipos de lechos pavimentados se usan como una alternativa de los lechos de arena: uno tipo drenaje y otro tipo decantador. El tipo drenaje funciona de forma similar al lecho de secado de arena (Metcalf & Eddy, 2003).

Los lechos son normalmente de forma rectangular, de 6 a 15 metros de ancho y de 20 a 45 m de largo con paredes verticales. En el suelo se puede utilizar hormigón o revestimiento de asfalto,con una capa de 20 a 30 cm de arena o base de grava. El revestimiento debe tener una pendiente mínima de 1.5 por ciento hacia el área de recolección del drenado, donde una tubería con un diámetro mínimo de 100 mm conduce el líquido drenado hacia La planta de tratamiento. Un área sin pavimentar, de 0.6 a 1 m de ancho, corre paralelamente a un costado o por el centro del lecho hacia el drenaje. Los lechos pavimentados se construyen con o sin techo (WEF, *et al.*, 2012). Para una misma cantidad de lodos a tratar, los lechos de secado pavimentados requieren más espacio que los lechos de secado de arena. Existen lechos pavimentados calentados con agua que circula a través de tuberías en el área pavimentada y se ha reportado que pueden secar de 88 a 210 kg m^{-2}, cuando se utilizan polímeros para acondicionar el lodo. Los lechos de secado con fondos de arena funcionan mejor que los lechos con fondo impermeable. En la

Ilustración 12.4 Lecho de secado pavimentado, (US, EPA, 1979)

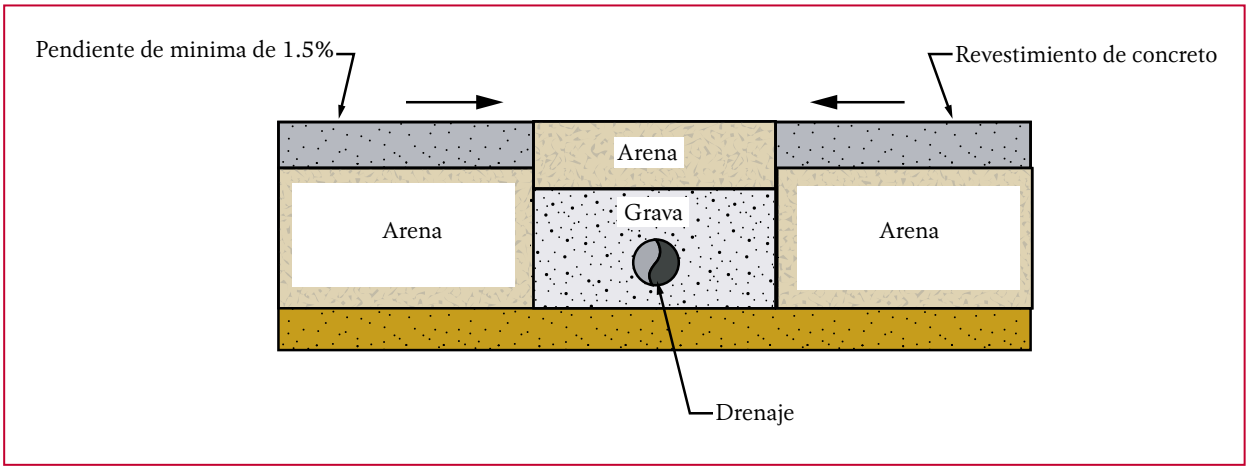


Ilustración 12.4 se presenta un esquema de un lecho pavimentado. (US, EPA, 1979).

Los lechos pavimentados tienen la ventaja de poder utilizarse en climas calientes, áridos y semiáridos. Este tipo de lechos de secado usan un material impermeable de bajo costo. La evaporación en este tipo de lecho depende de la decantación del sobrenadante y del mezclado del lodo.

Las características de diseño son: 1) el material de pavimentación es una mezcla de cemento, 2) requiere tuberías perforadas para decantar el sobrenadante y 3) un tubo de alimentación en el centro del lecho, en la Ilustración 12.5 se presenta un esquema de este tipo de lechos. Estos lechos pueden remover alrededor de 20 al 30 por ciento del agua, con un buen secado del lodo. En climas áridos una capa de lodo de 300 mm puede alcanzar una concentración de los sólidos del rango de 40 a 50 por ciento en un tiempo de secado de 30 a 40 d. (Metcalf & Eddy, 2003).

Con la Ecuación 12.1 se determina el área del fondo del lecho de secado pavimentado tipo decantación:

$$W_0 = 1.04(S)\left[\frac{1 - s_0}{s_0}\right] \qquad \text{Ecuación 12.1}$$

donde:

W_0 = Contenido de agua total en el lodo aplicado, kg yr^{-1}

1.04 = Es la gravedad específica del biosólido

S = Producción anual de lodo, sólidos secos, kg yr^{-1}

s_0 = porcentaje de sólidos secos en el lodo aplicado, como decimal

Con la ecuación 12.2 se determina el agua contenida en el lodo después de la decantación:

$$W_d = 1.04(S)\left[\frac{1 - s_d}{s_d}\right] \qquad \text{Ecuación 12.2}$$

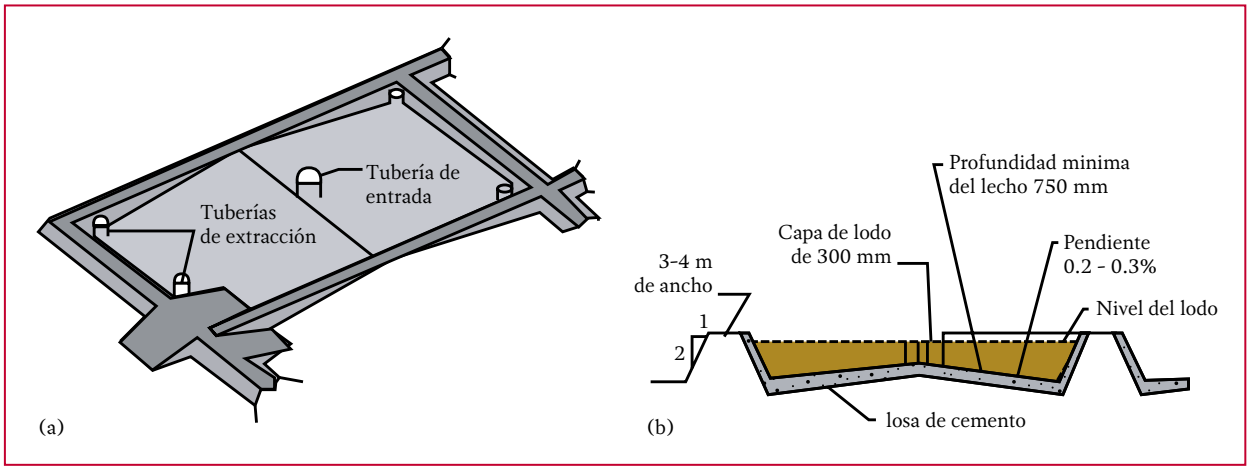
donde:

W_d = contenido total de agua después de la decantación, kg yr^{-1}

s_d = porcentaje de sólidos en el lodo decantado, como un decimal

El contenido de agua a ser removida por evaporación está dado por:

Ilustración 12.5 Lecho de secado pavimentado por decantación y evaporación: a) vista isométrica, b) vista transversal, (Metcalf & Eddy, , 2003)



$$W_e = W_d - 1.04(S)\left[\frac{1-s_e}{s_e}\right](P)(A)(10^3 kg\ m^{-3})$$

Ecuación 12.3

donde:

W_e = El agua evaporada después de la decantación, kg yr^{-1}

s_e = Porcentaje de sólidos secos después de la evaporación, como un decimal

P = precipitación anual, m y r^{-1}

A = Es el área del fondo del lecho pavimentado, m^2

Con la Ecuación 12.4 se determina la velocidad de evaporación para una localidad dada:

$$R_e = (10)(K_e)(E_p)$$

Ecuación 12.4

donde:

R_e = Velocidad de evaporación anual, kg m^{-2} y r^{-1}

10 = Factor usado para convertir cm yr^{-1} a kg m^{-2} yr^{-1}

k_e = Factor de reducción del lodo evaporado .vs. superficie del agua libre (no enlazada con el lodo).

Usar 0.6 como una estimación inicial. Realizar una prueba piloto para determinar el factor de diseño final.

E_p = Tasa de evaporación del agua libre en el lecho.

Con la combinación de la Ecuación 12.3 y la Ecuación 12.4 se genera la Ecuación 12.5 con la cual se estimo el área requerida.

$$A = \frac{1.04S\left[\frac{(1-s_d)}{s_d} - (1-s_e)/s_e\right] + (10^3 kg \cdot m^3)(P)(A)}{(10)(K_e)(E_p)}$$

Ecuación 12.5

12.3.2.4. Lechos de secado de medio artificial

El medio artificial que se usa, es una malla de alambre de acero inoxidable o páneles de poliuretano de alta densidad. Un lecho de secado de malla de alambre, tiene una fosa somera, rectangular y hermética con un falso fondo de malla de alambre con aberturas ranuradas de 0.3 mm. Este falso fondo se hace hermético con el calafateado de las posiciones donde los páneles se apoyan contra las paredes. Debajo del falso fondo se localiza una válvula de salida para controlar la velocidad de drenado (Mijaylova, 1999). En la Ilustración 12.6, se presenta un esquema de los lechos de secado de malla de alambre.

El procedimiento utilizado para desaguar el lodo empieza colocando una capa de agua o efluente de la planta sobre la malla de alambre hasta lograr una profundidad de aproximadamente 25 mm. Esta capa de agua evita un diferencial de carga, que de otra manera provocaría que el lodo diluido fluyera en forma dispareja a través de la malla (Metcalf & Eddy, 2003). El agua permite que el lodo sedimentado funcione como un medio de filtración. Esto es similar al medio de un filtro al vacío. Luego, se permite que el agua drenada se percole a una velocidad controlada, por medio de la válvula de salida en el sistema de bajo dren. Después de que el agua libre se drena, el lodo se concentra más por drenado y evaporación hasta que se remueve o retira (US, EPA, 1979).

La técnica de la malla de alambre se diseña para permitir la formación controlada de una torta en la interfase crítica, entre el lodo y el medio de soporte, antes de que una cantidad importante de partículas finas llegue a la interfase o pase a las aberturas del medio y escape en el filtrado. Se utilizan polímeros para mejorar la deshidratación del lodo. Los lechos de malla de alambre normalmente pueden deshidratar entre 2.4 y 4.9 kg m^{-2} de lodo en base seca por carga. La tasa de carga depende de la concentración inicial de sólidos del lodo aplicado. La mayoría de los lodos se pueden desaguar a una concentración manejable de 8 a 12 por ciento de sólidos, dentro de un periodo de 24 horas. Este proceso es más práctico para plantas pequeñas, con un gasto medio de 1 900 m^3 d^{-1} o menor. La tasa de carga de lodos normal es de 890 a 1 780 kg m^2. A estas cargas, el lodo removido está relativamente húmedo (8 a 12 por ciento de sólidos secos) y puede complicar la disposición (Metcalf & Eddy, 2003).

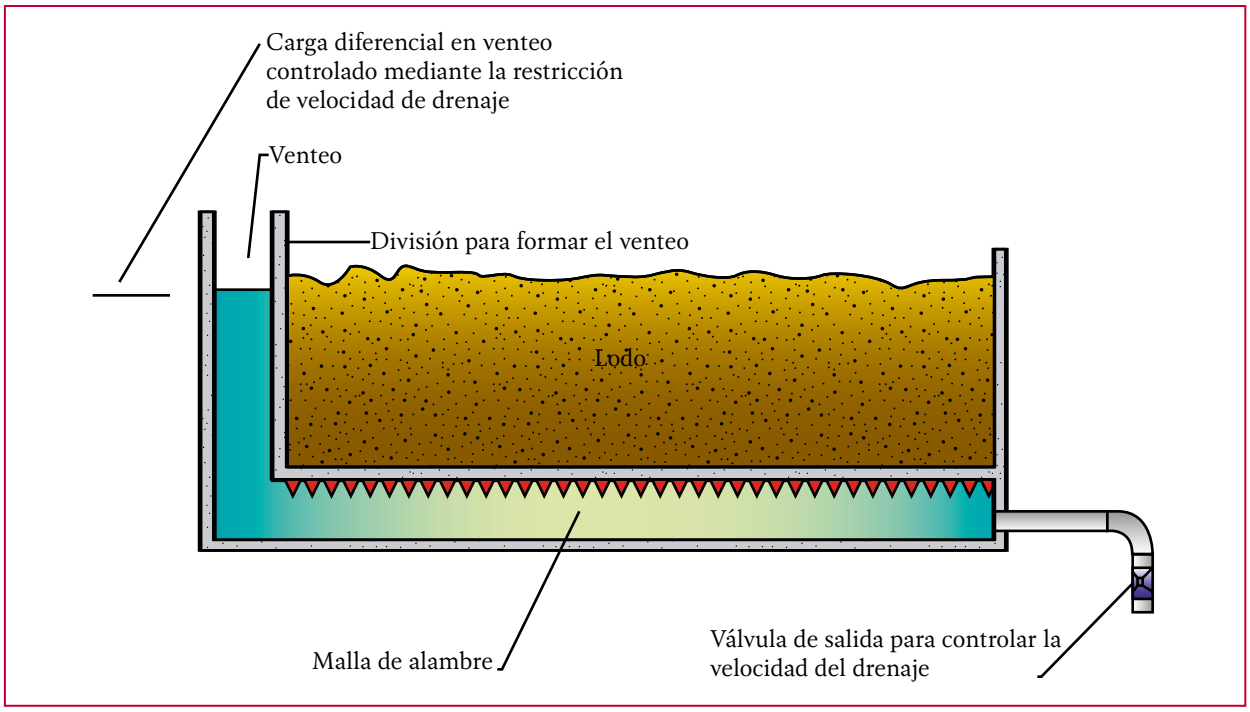
12.3.2.5. Lechos de secado al vacío

Un método usado para acelerar la deshidratación y secado son los lechos de secado al vacío. La deshidratación y el secado se incrementan por la aplicación de vacío en la parte inferior de las placas o filtro poroso. (Metcalf & Eddy, 2003). En la Ilustración 12.7, se presenta un esquema de un lecho de secado al vacío con sus principales componentes, que son (US, EPA, 1979):

- Una losa de concreto reforzado
- Una capa de varios milímetros de espesor de agregados estabilizados, que soporta la placa o losa de concreto (este espacio también funge como la cámara de vacío y está conectada a la bomba de vacío)
- Una tapa rígida o filtro, que se coloca sobre el soporte del agregado

La secuencia de operación es la siguiente (Metcalf & Eddy, 2003):

Ilustración 12.6 Sección transversal de un lecho de secado de malla de alambre, (Metcalf & Eddy, 2003)



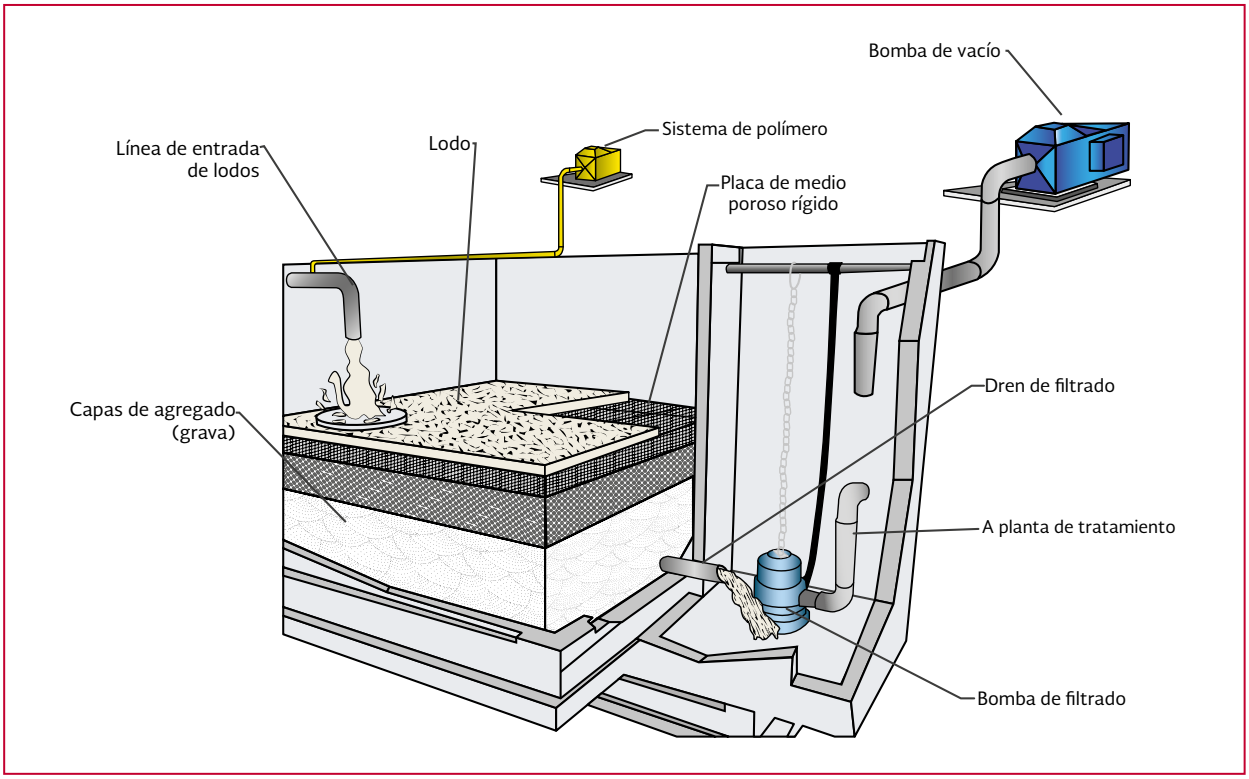
1. Pre-acondicionamiento del lodo con un polímero
2. El lodo se distribuye sobre la superficie del filtro por gravedad a una tasa de 9.4 L s^{-1} y a una profundidad de 300 a 750 mm
3. El filtrado se drena a través de un filtro de medio múltiple hacia un espacio que contiene el agregado y luego a un cárcamo
4. Después de aplicar el lodo y permitir que drene por gravedad durante aproximadamente una hora, se arranca el sistema de vacío y se mantiene el vacío de 3 a 34 kN m^{-2} en el cárcamo y bajo las placas o losa de concreto. Cuando la torta se rompe y se pierde el vacío, se apaga la bomba
5. Se permite que el lodo se seque al aire durante aproximadamente 24 a 48 horas
6. Se retira el lodo. Después de remover el lodo, las placas se lavan con agua

En la Tabla 12.4 se presenta la concentración de sólidos típica producida por lechos de secado al vacío.

Para cualquier lodo, mientras mayor sea la concentración de sólidos en el afluente, mayor es la cantidad de sólidos que se pueden aplicar por unidad de área al medio. En la Ilustración 12.8 se muestran los efectos de incrementar la concentración de sólidos en el afluente sobre las tasas de carga, para lodos estabilizados

La mayoría de las instalaciones de lechos con sistemas de vacío están diseñadas para un ciclo de 24 horas. Esto permite aproximadamente 22 horas para el desaguado y 2 horas para la limpieza, debido al deterioro en la calidad de la torta (US, EPA, 1979). Para un lodo específico con un ciclo de operación constante, el tamaño de la instalación cambia en forma lineal con el número de aplicaciones por semana. El dimen-

Ilustración 12.7 Esquema de un lecho de secado al vacío



sionamiento de cualquier instalación está basado en los resultados de plantas piloto.

Un lodo diluído de 0.5 a 1.0 por ciento de sólidos totales, requiere más drenaje por gravedad con un tiempo mayor de desaguado que un lodo más concentrado. La cantidad de lodo a tratar y el secado de la torta aumentan con una mayor concentración de sólidos en el lodo aplicado. El lodo estabilizado anaerobiamente se desagua con mayor facilidad, que un lodo estabilizado aerobiamente. A medida que aumenta la relación entre el lodo primario y secundario, así se incrementa la facilidad de desaguar y la concentración resultante de sólidos en la torta.

La adición de polímeros al lodo afluente, con un mezclado y tiempo de contacto adecuado entre el lodo y el polímero, conduce a la formación de sólidos pequeños y pesados que maximizan la liberación de agua. El vacío utilizado durante el ciclo de desaguado es de 20 a 84 Kpa.

Los lechos con sistema de vacío son buenos para las plantas con pequeñas cantidades de producción de lodos o plantas con espacios de terreno muy limitado. El lodo se remueve mecánicamente con un cargador frontal pequeño, sin dañar las placas. Este sistema depende de un acondicionamiento adecuado con polímeros, para una buena operación.

12.3.2.6. Lagunas de secado

Las lagunas de secado se usan en lugar de los lechos de secado. Las lagunas no pueden utilizarse para la deshidratación de lodos sin estabilizar, lodos encalados, o lodos con alta resistencia a sedimentar porque provoca malos olores u otras molestias. El desempeño de la laguna, es similar al de los lechos de secado. Se afecta por el clima, la precipitación y las bajas temperaturas inhiben la deshidratación. Las lagunas se usan en lugares donde existe una alta velocidad de evaporación. Cuando se utilice una laguna de secado se evita la percolación hacia los mantos acuíferos, especialmente si hay pozos que suministren agua potable. Se utilizan métodos de impermeabilización de acuerdo a la normatividad existente. (Metcalf & Eddy, 2003).

Las lagunas de secado requieren terreno disponible, pero su operación requiere de mínima

Tabla 12.4 Datos del desempeño de los lecho de secado por vacío para diferentes tipos de lodos, (Metcalf & Eddy, 2003)

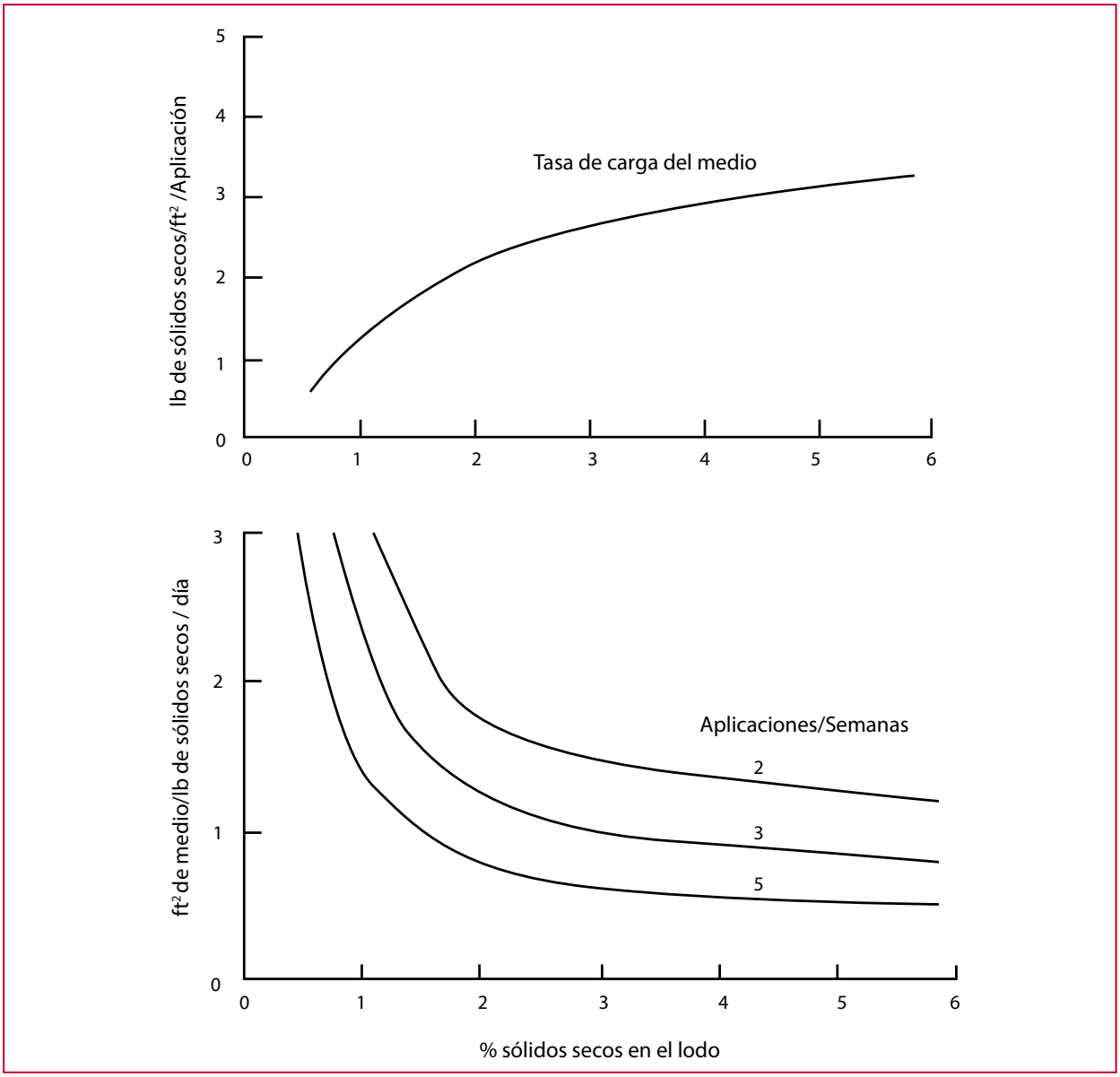
Tipo de lodo	Sólidos secos alimentados, porcentaje	Carga de sólidos secos, kg m^{-2}	Tiempo del ciclo, h	Dosis de polímero, g kg^{-1}	Rango de sólidos en la torta, porcentaje
Estabilizado anaerobiamente					
Primario	1-7	10-20	8-24	2-20	12-26
Primario + Secundario del sistema de lodos activados	1-4	5-20	18-24	15-20	15-20
Primario + secundario de biofiltros	3-10	15-30	18-24	20-26	20-26
Estabilizado aerobiamente					
Lodo del sistema de lodos activados	1-4	5-15	8-24	1-17	10-23
Lodo de zanjas de oxidación	1-2	5-10	8-24	2-7	10-20

capacitación y atención. La evaporación es el factor más importante en la deshidratación de lodos en las lagunas de secado. Estos sistemas de deshidratación tienen muros que generalmente son de barro y que sirven como diques de retención de 0.7 a 1.5 m de alto. Estos diques son rectangulares. Las consideraciones de diseño incluyen el clima, la permeabilidad del subsuelo, la profundidad y el área, el drenaje y el talud del dique (WEF, *et al*., 2012) y (US, EPA, 1979).

El ciclo de operación de las lagunas consiste en los siguientes pasos (WEF, *et al*., 2012):

1. El lodo estabilizado se bombea hacia la laguna durante un periodo de hasta varios meses
2. El sobrenadante se decanta periódicamente
3. El lodo se deja en la laguna por varios meses o años. Un contenido de sólidos de

Ilustración 12.8 Eficiencia típica de los lechos de secado al vacío, ($lb \cdot ft^{-2}$ x 4.883 = $kg \cdot m^{-2}$ y $ft^2 \cdot lb^{-1}$ x 0.2048 = $m^2 \cdot kg^{-1}$ (Mijaylova, 1999)



20 a 40 por ciento puede alcanzarse en un periodo de 3 a 12 meses, dependiendo del clima

4. La torta del lodo se retira con equipos mecánicos, tales como los cargadores frontales
5. Cuando el ciclo se termina, se vuelve a repetir

El lodo que sale de la laguna está parcialmente estabilizado y se le puede dar un tratamiento adicional por composteo, vermicomposteo o estabilización alcalina para su uso o aprovechamiento en el suelo.

12.3.2.7. Centrífugas

Los equipos de centrífugación de canastilla sólida utilizados para el espesamiento de lodos también pueden usarse para la deshidratación de lodos y biosólidos. Los dos tipos de centrífugas utilizadas para la deshidratación de lodos son la de tazón sólido y de alto torque (Metcalf & Eddy, 2003).

El proceso de centrifigación es similar al que ocurre en un sedimentador o espesador. La centrífuga gira a alta velocidad, esto crea una gran aceleración, que genera la separación. Tradicionalmente la aceleración está referida una una "fuerza g". La "fuerza g", se mide en función de la aceleración de la tierra, es la gravedad 9.81 m s^{-2}. (1 fuerza g =9.81 m s^{-2}). La mayoría de las centrífugas operan entre 153 a 306 m s^{-2}. (1500 a 300 g). La relación entre la velocidad de rotación y la fuerza se calcula como una relación entre la velocidad y la fuerza de gravedad, utilzando la Ecuación 12.6 (WEF, *et al*., 2012):

$$Fuerza\ de\ rotacion = k \times rpm^2 \times diametro$$

Ecuación 12.6

donde:

rpm = Velocidad de rotación, r/min

k = 0.00000056 cuando el diámetro está en mm o 0.0000142 cuando el diámetro esta expresado en pulgadas.

En la operación de una centrífuga, el material alimentado entra por medio de una tubería de alimentación estacionaria, que es un tubo abierto. El lodo se desplaza axialmente y se cae en la zona de alimentación, que es la parte central de un transportador giratorio. El transportador gira a una velocidad de unas pocas revoluciones por minuto. El líquido fluye a lo largo de la superficie del tanque, y sale de la centrífuga dejando el concentrado. El tiempo de residencia del líquido desde el punto de entrada a la salida de la centrífuga es de aproximadamente 1 a 2 s. Toda la energía impartida para la alimentación del lodos es alrededor de 2 kW m^{-3} h^{-1}. El líquido que se atrapa entre los sólidos compactados se desplaza y fluye hacia la parte superior del tanque, como se muestra en la (Ilustración 12.9).

12.3.2.8. Centrífugas de tazón solido o de tornillo

En las centrífugas de tazón sólido o de tornillo, el lodo se alimenta a un flujo constante dentro del tazón giratorio, donde se separa en una torta densa que contiene los sólidos y la corriente diluida llamada concentrado. El concentrado contiene, sólidos de baja densidad y se regresa al sistema de tratamiento de aguas residuales. La torta de lodo, la cual contiene aproximadamente 70 a 80 por ciento de humedad, se descarga del tazón por medio de un alimentador de tornillo hacia una tolva o sobre una cinta transportadora. Dependiendo del tipo de lodo, la concentración de sólidos en la torta varía entre 10 a 30 por ciento. Concentraciones en la torta de lodo por

arriba del 25 por ciento se utilizan para la incineración o para disposición en relleno sanitario (Metcalf & Eddy, 2003).

Las centrífugas se pueden utilizar sin un acondicionamiento químico previo, pero el sólido capturado y la calidad del concentrado mejoran considerablemente cuando los lodos se acondicionan con polímeros. El acondicionamiento químico se realiza en la línea de alimentación del lodo o en el tanque de la centrífuga. La dosis de polímeros varía entre 1.0 a 6.75 kg t^{-1} de lodo (basado en la concentración de sólidos secos). Los datos del desempeño de centrífugas de tornillo con y sin acondicionamiento químico se presentan en la Tabla 12.5 (Metcalf & Eddy, 2003).

Existen dos tipos de centrífugas de tornillo: los diseños de flujo contracorriente y co-corriente a una velocidad de diseño alta o baja, en la Ilustración 12.10 se presenta el esquema de las dos diferentes configuraciones de las centrífugas de tornillo (EPA, 1979). En la Ilustración 12.11 se presenta la fotografía de una centrífuga de tornillo. Las principales diferencias en el diseño se relacionan con la colocación de los puertos de entrada del lodo, la remoción del concentrado y los patrones internos del flujo de las fases líquida y sólida. En la configuración co-corriente, la fase sólida recorre toda la longitud del tazón, mientras que la fase líquida recorre un patrón paralelo con la fase sólida. El líquido se remueve mediante conductos para luego pasar por los vertedores de descarga. En el diseño contracorriente, la corriente afluente entra en la junta de la sección cónica cilíndrica; los sólidos se trasladan hacia el extremo cónico de la máquina mientras que la fase líquida viaja en dirección opuesta. La fase líquida (concentrado) rebosa por un vertedor en el extremo del diámetro grande de la centrífuga (WEF, *et al.*, 2012).

El tazón de la centrífuga generalmente tiene un diseño cónico cilíndrico y la proporción de cono a cilindro varía dependiendo del fabricante o tipo de máquina. La relación de longitud a diámetro del tazón varía de 2.5:1 a 4:1; los diámetros del tazón están disponibles desde 230 a 1 800 mm. La capacidad del tazón puede ser desde 0.6 L s^{-1} hasta más de 44 L s^{-1} (EPA, 1979) (WEF, *et al.*, 2012).

Ilustración 12.9 Remoción del agua en una centrífuga, (WEF, et al., 2012)

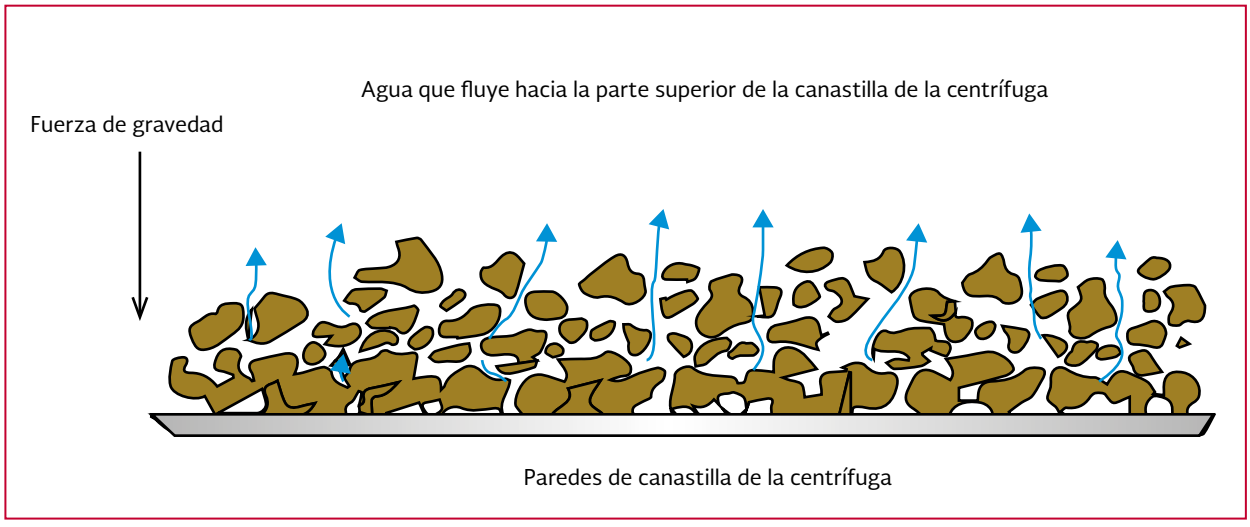


Tabla 12.5 Datos del desempeño de las centrífugas de tornillo para diferentes tipos de lodos, (Metcalf & Eddy, , 2003)

Tipo de lodo	Sólidos en la torta, (%)	Sólidos capturados, (%)	
		Sin acondicionamiento químico	Con acondicionamiento químico
Lodo primario sin tratamiento	25-35	75-90	>95
Lodo primario y biofiltros sin tratamiento	20-25	60-80	>95
Lodo primario y lodos activados con aire sin tratamiento	12-20	55-65	>92
Lodos de biofiltros	10-20	60-80	>92
Lodos del sistema de lodos activados con aire	5-15	60-80	>92
Lodos del sistema de lodos activados con oxígeno	10-20	60-80	>92
Lodo primario estabilizado anaerobiamente	25-35	65-80	>92
Lodo primario y de biofiltros estabilizado anaerobiamente	18-25	60-75	>90
Lodo primario y de lodos activados estabilizado anaerobiamente	15-20	50-65	>90
Lodo del sistema de lodos activados estabilizado aerobiamente	8-10	60-75	>90

Ilustración 12.10 Esquema de las dos configuraciones de la centrífuga de tornillo a) contracorriente y b) cocorriente, (Metcalf & Eddy, 2003)

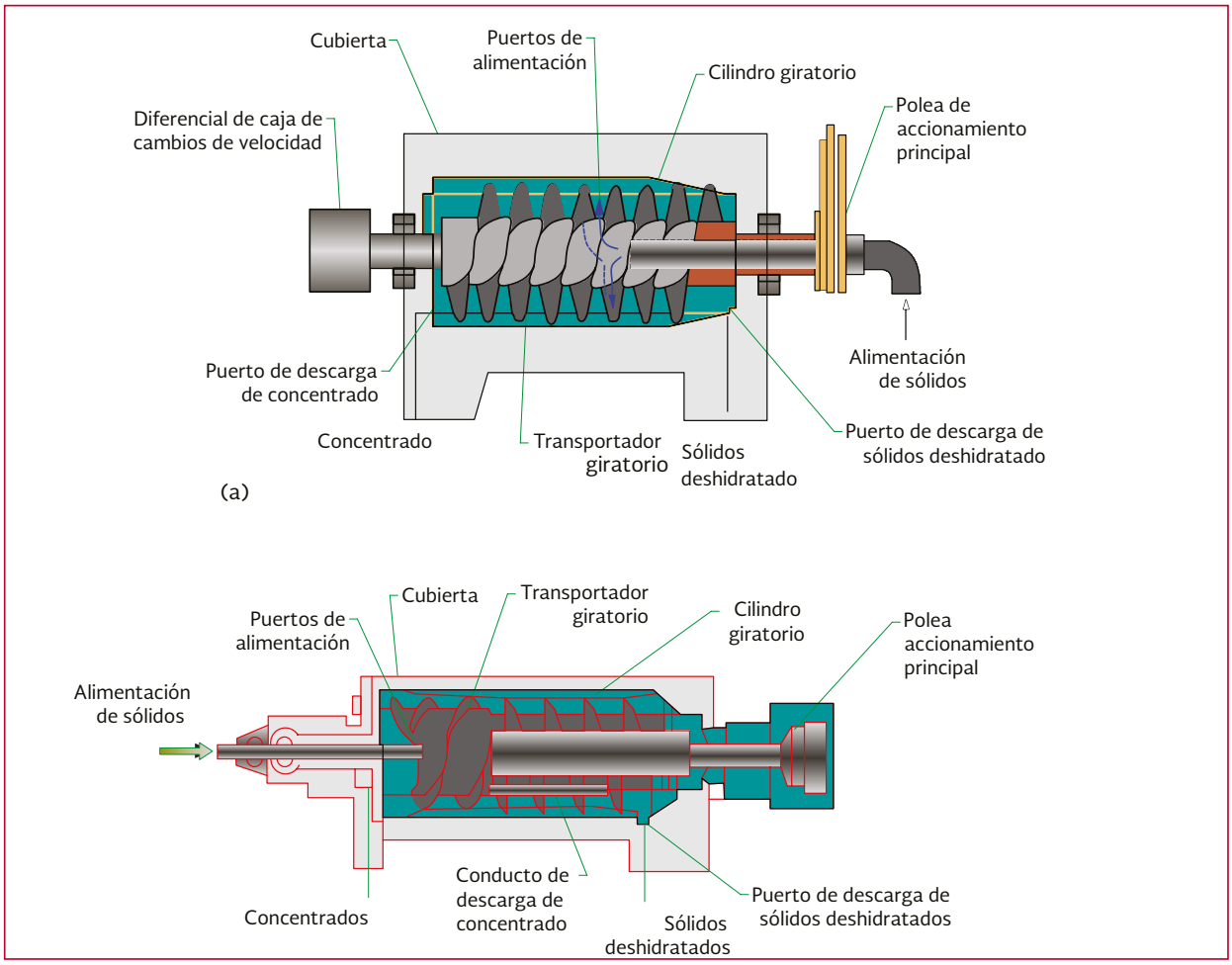


Ilustración 12.11 Ejemplo de una centrífuga de tornillo comercial

12.3.2.9. Centrífugas de alta concentración de sólidos o de alta torsión

Las centrífugas de torsión es una modificación de las centrífugas de tornillo que están diseñadas para producir una torta de sólidos seca. Estas unidades tienen un tazón ligeramente más largo para dar cavidad a una sección más, una menor en la velocidad del tazón incrementa el tiempo de residencia. Este tipo de centrífugas alcanzan un contenido de sólidos mayor de 30 por ciento en la deshidratación del lodo del agua residual municipal, pero requiere una dosis alta de polímero. (Metcalf & Eddy, 2003).

12.3.2.10. Sistemas de Filtración

La filtración se define como la remoción de sólidos del líquido por el paso de una corriente a través de un medio poroso el cual retiene los sólidos. En la Ilustración 12.12 se muestra el diagrama de flujo de un sistema de filtración. Como se indica, se requiere una caída de presión para que el líquido fluya a través del medio poroso. Esta caída de presión se alcanza de cuatro maneras: 1) creando un vacío sobre uno de los costados del medio poroso, 2) generando una fuerza centrífuga sobre el área del medio poroso, 3 aumentado la presión atmosférica en un lado del medio y 4) usando la fuerza gravitacional sobre el medio.

Toda la teoría de filtración se deriva de los trabajos originales de Darcy a mediados de 1850. Darcy encontró que la velocidad de flujo Q de un filtrado de viscosidad μ a través de una capa de espesor L y un área A fue relativa para el manejo de la presión ΔP. Esta relación se presenta en la Ecuación 12.7, (EPA, 1979).

$$Q = \frac{KA\Delta P}{\mu L}$$

Ecuación 12.7

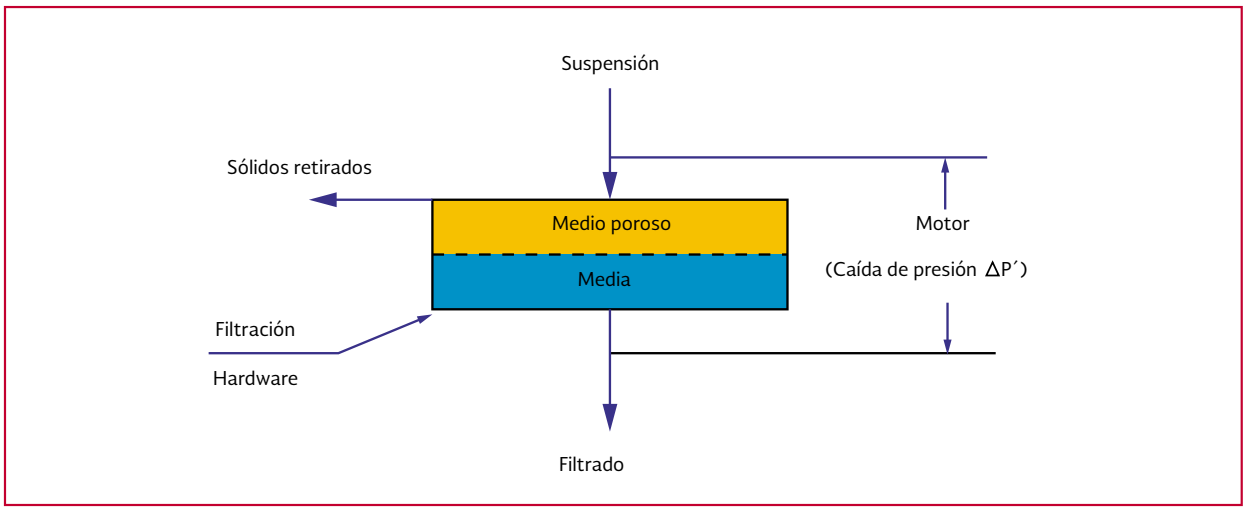
Donde *k* es una constante referida como la permeabilidad del lecho, mucho tiempo la ecuación fue escrita como:

$$Q = \frac{A\Delta P}{\mu R}$$

Ecuación 12.8

Donde R es la resistencia al medio y es igual a L/K, el espesor del medio dividido por la permeabilidad del medio.

Ilustración 12.12 Diagrama de flujo de un sistema de filtración, (EPA, 1979)



12.3.2.11. Filtro prensa de bandas

Los filtro prensa de bandas que se usan para la deshidratación de lodos tienen dos o tres bandas de movimiento y una serie de rodillos. Generalmente el lodo se acondiciona antes de ingresar a los filtro prensa de bandas. El agua se remueve de los lodos a través de la banda o de la estructura de filtración mediante una combinación de drenado por gravedad y compresión. Después de la deshidratación, la torta del lodo se descarga por medio de la una banda transportadora o tolva. Capítulo 5. (WEF, *et al.*, 2012).

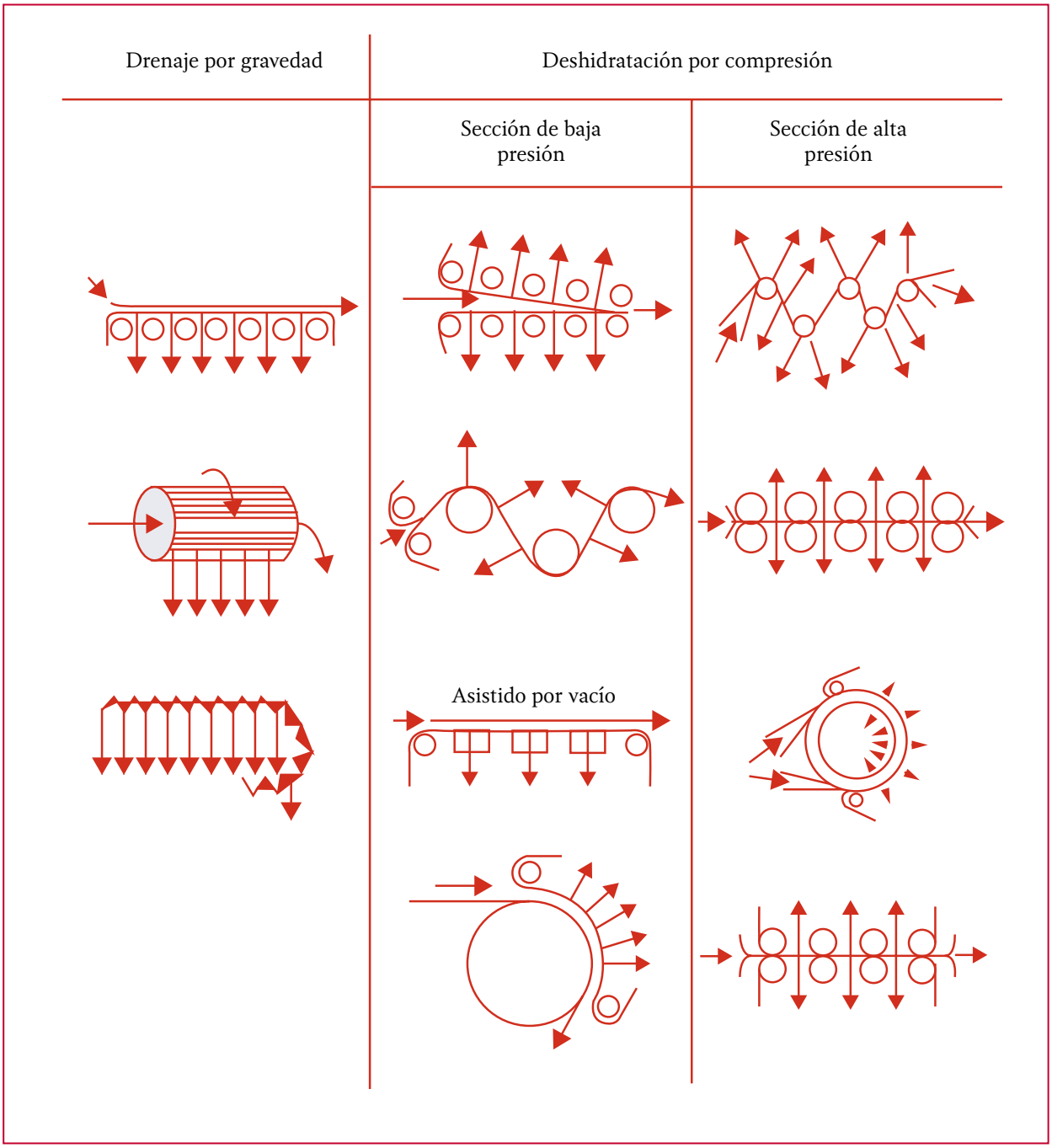
Existen muchos diseños de filtros prensa pero todos estos incorporan las siguientes zonas básicas: acondicionamiento con polímeros, drenado por gravedad, compresión a baja presión y compresión a alta presión. La presión varia dependiendo del diseño, como se muestra en la Ilustración 12.13 (EPA, 1979).

En la Ilustración 12.14 se muestra el esquema de un filtro prensa de bandas. Diseños avanzados tienen una mayor área de filtración, rodillos adicionales y velocidades de bandas variables que pueden incrementar la concentración de sólidos en la torta (EPA, 2012).

Un sistema de deshidratación con filtro de bandas esta integrado por: bombas de alimentación, equipo de alimentación de polímeros, tanque de acondicionamiento de lodos, filtro prensa, transportador de la torta del lodo y equipo periférico (bombas para agua de lavado, bombas para el agua residual y compresores de aire). Algunas unidades no utilizan tanques de acondicionamiento de lodos. Un diagrama esquemático de las instalaciones de un filtro prensa se presenta en la Ilustración 12.15. Muchas variables afectan el desempeño del proceso: características del lodo, métodos y tipo de acondicionamiento, desarrollo de la presión, configuración mecánica (incluyendo el drenado por gravedad), porosidad de la banda, velocidad de la banda y el ancho de la banda. El desempeño de este equipo (Tabla 12.6) depende de las características del lodo y del acondicionamiento seleccionado.

En la Ilustración 12.16 se presenta un filtro de prensa de bandas nuevo y en operación.

Ilustración 12.13 Diferentes diseños alternativos para la obtención de la descarga de agua en los filtros prensa de bandas



12.3.2.12. Filtros prensa de placas

La principal ventaja de los filtros prensa de placas es que produce una torta más seca que la producida por otros sistemas de deshidratación. Si el contenido de sólidos de la torta debe ser mayor que 35 por ciento, entonces este filtro prensa puede ser una buena opción. Los filtros prensa de placas pueden adaptarse a un amplio rango de características de los lodos y producen un filtrado limpio para recircularse a la planta de tratamiento. (US, EPA, 1978).

Ilustración 12.14 Filtro prensa de bandas, (WEF, et al., 2012)

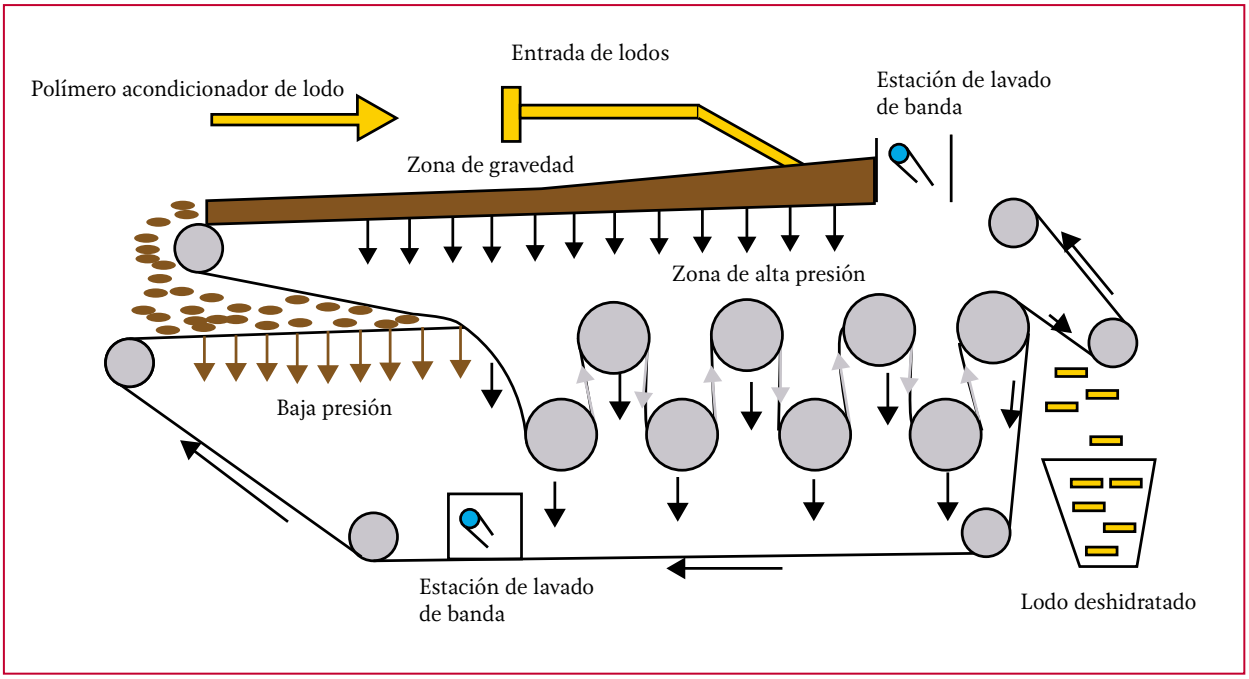


Ilustración 12.15 Esquema de las instalaciones de un sistema de filtro prensa de bandas, (Metcalf & Eddy, 2003)

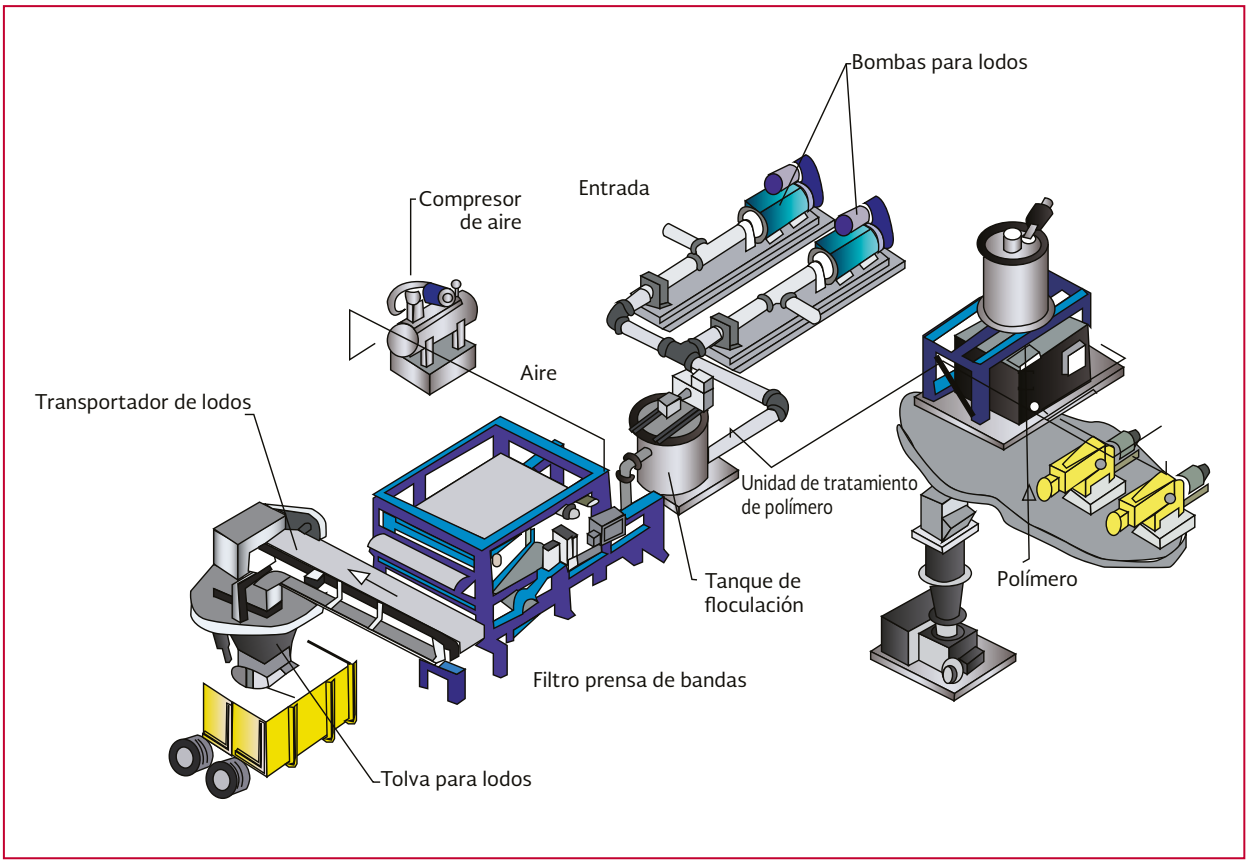


Tabla 12.6 Datos del desempeño de un filtro prensa de bandas para diferentes tipos de lodo, (Metcalf & Eddy, 2003)

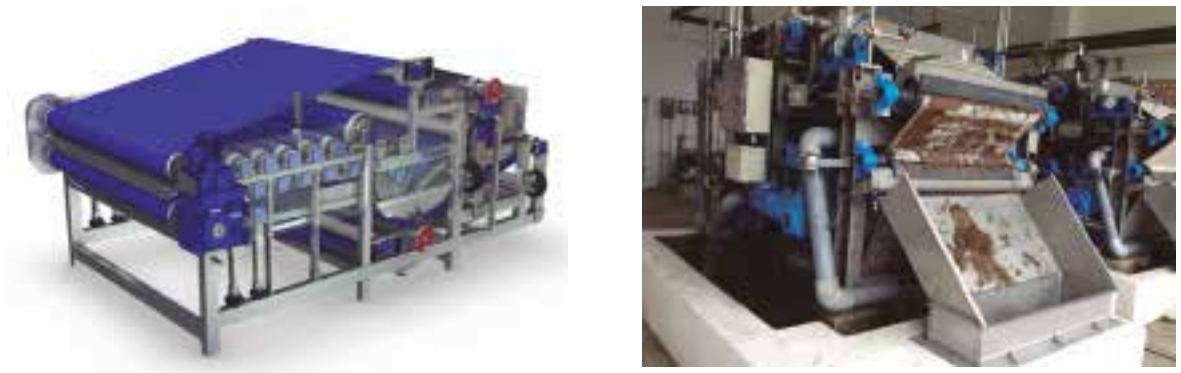
Tipo de lodo	Sólidos secos alimentados (%)	Carga por metro de longitud de la banda		Polímero seco[a], sólidos secos	Sólidos en la torta, (%)	
		$L\ s^{-1}$	$kg\ h^{-1}$	$g\ kg^{-1}$	Típico	Rango
Lodo primario sin tratamiento	3-7	1.8-3.2	360-550	1-4	28	26-32
Lodo del sistema de lodos activados (LSLA).	1-4	0.7-2.5	45-180	3-10	15	12-20
Primario + LSLA (50:50)	3-6	1.3-3.2	180-320	2-8	23	20-28
Primario + LSLA (40:60)	3-6	1.3-3.2	180-320	2-10	20	18-25
Primario + lodo de los filtros rociadores	3-6	1.3-3.2	180-320	2-8	25	23-30
Primario estabilizado anaerobiamente	3-7	1.3-3.2	360-550	2-5	28	24-30
LSLA estabilizado anaerobiamente	3-4	0.7-2.5	45-135	4-10	15	12-20
Primario + LSLA estabilizado anaerobiamente	3-6	1.3-3.2	180-320	3-8	22	20-25
Primario + LSLA estabilizado aerobiamente sin espesamiento	1-3	0.7-3.2	135-225	2-8	16	12-20
Primario + LSLA (50:50) estabilizado aerobiamente sin espesamiento	4-8	0.7-3.2	135-225	2-8	18	12-25
LSLA usando oxigeno estabilizado aerobiamente	1-3	0.7-2.5	90-180	4-10	18	15-23

Las principales desventajas de estos filtros son: altos costos de capital, mayor cantidad de químicos para el acondicionamiento, en algunos casos se requiere un recubrimiento especial, la remoción manual de la torta por adherencia y altos costos de operación y mantenimiento.

Varios tipos de filtros prensa de placas se han utilizado para la deshidratación de lodos. Los dos principales tipos de filtros prensa de placas son el de volumen fijo y el de volumen variable (Metcalf & Eddy, 2003).

Los filtros de volumen fijo consisten de una serie de placas rectangulares soportadas cara a cara en posición vertical sobre un marco con una cabecera fija o móvil, como se muestra en la Ilustración 12.17. Un filtro de tela se coloca sobre cada placa. Las placas se mantienen juntas con fuerza suficiente para sellar, lo que les permite

Ilustración 12.16 Filtro prensa de bandas nuevo y en operación y PTAR de Valle de Bravo Edo. de México



soportar la presión aplicada durante el proceso de filtración. Para sujetar y mantener las placas juntas se utilizan cilindros hidráulicos o tornillos de potencia. (Metcalf & Eddy, 2003).

En la operación el lodo acondicionado químicamente se bombea hacia los espacios entre las placas y se aplica de una a tres horas una presión de 690 a 1 550 kN m^{-2}, forzando al líquido a través de la tela del filtro y la placa de orificios de salida. Las placas se separan y se eliminan los lodos. El filtrado normalmente es retornado al afluente de la planta de tratamiento. El espesor de la torta varía alrededor de 25 a 38 mm, y el contenido de humedad varía entre 48 y 70 por ciento. El ciclo de filtrado varía entre 2 a 5 horas y este incluye el tiempo requerido para: 1) llenar la prensa, 2) mantener el lodo bajo presión, 3) abrir la prensa, 4) lavar y descargar la torta y 5) cerrar la prensa. Dependiendo del grado de automatización incorporado a la máquina, la atención del operador debe estar dedicada a la operación del filtro durante la alimentación, la descarga del lodo y los intervalos de lavado (Metcalf & Eddy, 2003).

Un lodo con malas propiedades de filtración puede ser deshidratado mediante el método de pre revestimiento, el cual consiste en aplicar una capa delgada de aserrín o ceniza en la prensa. El lodo que va a deshidratarse en las prensas se acondiciona normalmente con coagulantes inorgánicos (sales de aluminio y hierro, cal). El método de acondicionamiento térmico también ha dado buenos resultados. El proceso específico de acondicionamiento debe tener como objetivo alcanzar una resistencia a la filtración equivalente a 10^{12} cm^{-2} (Mijaylova, 1999).

Ilustración 12.17 Filtro prensa de placas, (Metcalf & Eddy, 2003)

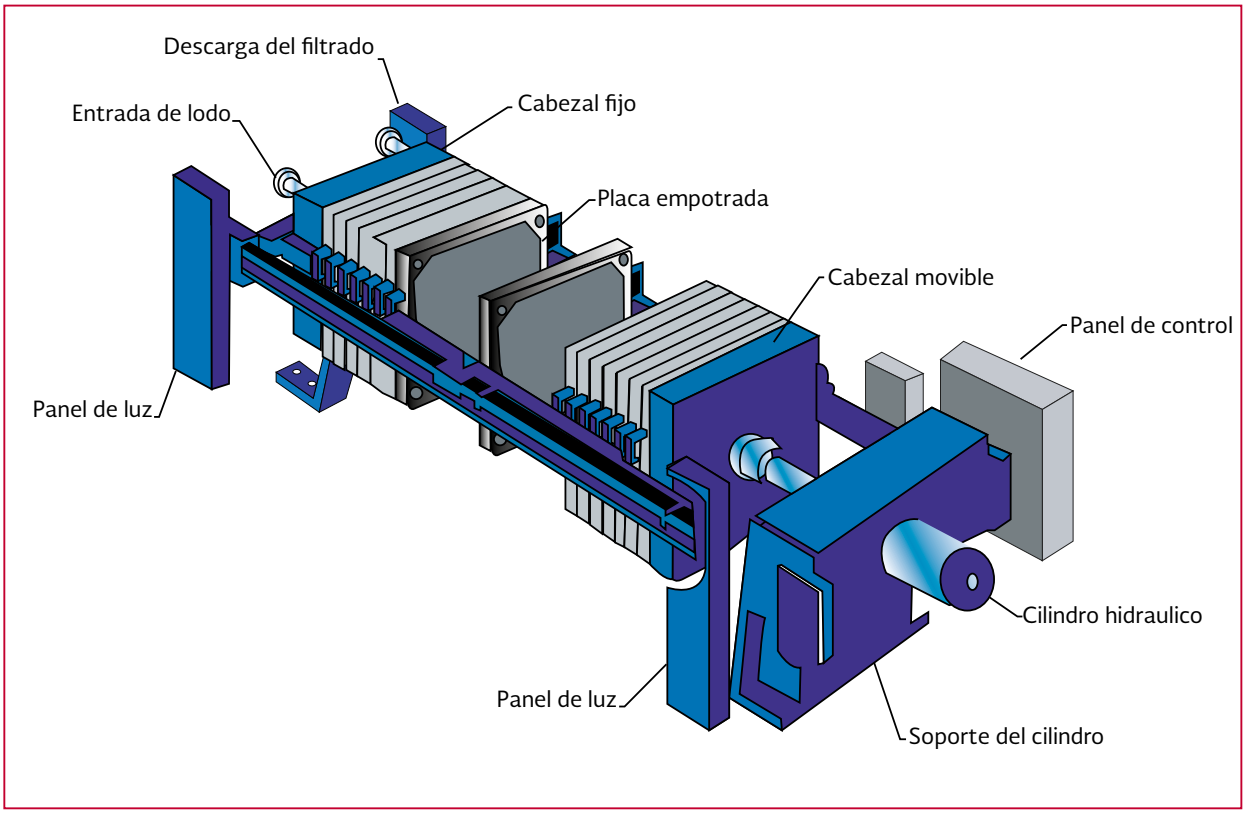
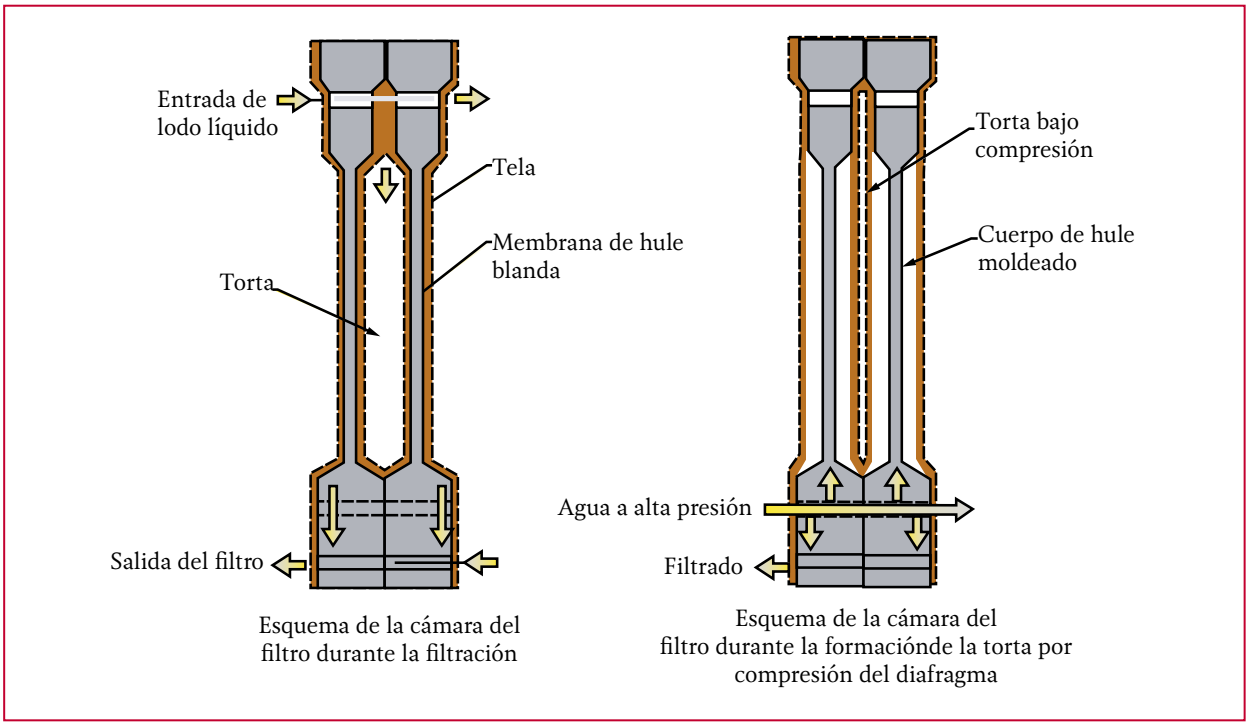


Ilustración 12.18 Filtro prensa de placas de volumen variable, (EPA, 1979)



Los filtros prensa de placas de volumen variable, también se conocen filtros prensa de diafragma. Este tipo de filtros prensa es similar a los filtro de volumen fijo excepto que un diafragma de goma se coloca detrás del mediofiltrante, como se muestra en la Ilustración 12.18. El diafragma de goma se expande para conseguir la presión de contracción, así durante el paso de compresión el volumen de la torta se reduce. Generalmente se requiere de 10 a 20 minutos para llenar la prensa y 15 a 30 minutos de presión constante para deshidratar la torta hasta el contenido de sólidos deseado. Los filtros prensa de placas de volumen variable operan con una presión entre 690 y 860 kN m^2 para el paso inicial de deshidratación, y de 1380 a 2070 kN m^2 para la compresión final. Este tipo de filtros pueden manejar un amplio rango de lodos con buenos resultados pero requiere de constante mantenimiento. (Metcalf & Eddy, 2003).

12.3.3. Secado solar de lodos

El secado de lodos es un método que tradicionalmente se utiliza para disminuir el volumen del lodo en las plantas de tratamiento. La radiación solar calienta la superficie de lodo. La elevación de la temperatura propicia el proceso de transferencia del agua del lodo al aire. Sin embargo la superficie del lodo se seca y las capas interiores del lodo permanecen húmedas, es lo que ocurre en los lechos de secado.

El término secado solar de lodos se aplica al utilizar la radiación solar para propiciar el secado de lodos, adicionando el volteo con el fin de obtener un secado homogéneo en toda la superficie del lodo y un producto granular que de acuerdo a sus características se podría utilizar.

12.3.3.1. Fundamento del proceso de secado

Cualquier proceso de secado se basa en el mecanismo donde las moléculas de agua pasen de la fase líquida a la fase vapor. Esto requiere energía. En esta tecnología se utiliza la energía solar.

La fuerza o gradiente de secado es la diferencia entre la presión parcial del vapor del sistema y del aire ambiente. Para evitar que se establezca un equilibrio entre la presión de vapor dentro y fuera del lodo, el aire debe renovarse, es decir retirar el aire húmedo y reemplazarlo por aire seco. Esto ocurre debido a que el vapor de agua es más ligero que el aire seco.

Entre más caliente sea el aire, más vapor de agua puede transportarse. Sin embargo la presión parcial de vapor en el aire eleva la cantidad de agua disuelta en el aire y disminuye el gradiente disponible para el secado. El secado siempre ocurre aunque se tenga poco sol. Los días muy húmedos son los que más interfieren con el proceso de secado.

12.3.3.2. Teoría del secado de sólidos

El secado es una operación unitaria en la que se remueve el líquido de un material a través de la aplicación de calor: La humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, trasladándola a un medio no saturado.

12.3.3.3. Mecanismos que intervienen en el proceso

Existen muchos mecanismos posibles de secado, pero aquellos que controlan el secado de una partícula dependen de su estructura y condiciones de secado.

El secado de un sólido consta de un fenómeno complejo que involucra el transporte de calor hacia dentro del material y el transporte de agua hacia el exterior, es decir la transferencia simultánea de calor y masa.

Transmisión de calor

En un principio la mayor parte de la energía que aporta el aire se usa para evaporar el agua contenida en el sólido, con lo que se supone que la temperatura de bulbo húmedo permanece constante durante el proceso (Valiente, 2002). En estas condiciones debe cumplirse que:

$$m_a(\Delta h^*_2 - \Delta h^*_1) \approx ms\ \Delta W_s\ c_w(T_h)\ T_h$$

Ecuación 12.9

donde:

$\Delta h^*_2 - \Delta h^*_1$ = Variación de entalpía específica que sufre el aire

$ms\ \Delta W_s$ = Agua evaporada del sólido e incorporada al aire

$cw(T_h)$ = Calor específico del agua líquida a la temperatura del termómetro húmedo

Esta transferencia de energía en forma de calor del ambiente al material depende de las condiciones externas de temperatura, humedad, flujo del aire, presión, área de exposición y tipo de secador empleado. Los mecanismos de transferencia conocidos son: por conducción, convección o mediante radiación.

Ilustración 12.19 Mecanismos durante el secado solar de lodos, (Thermo - System, 2013)

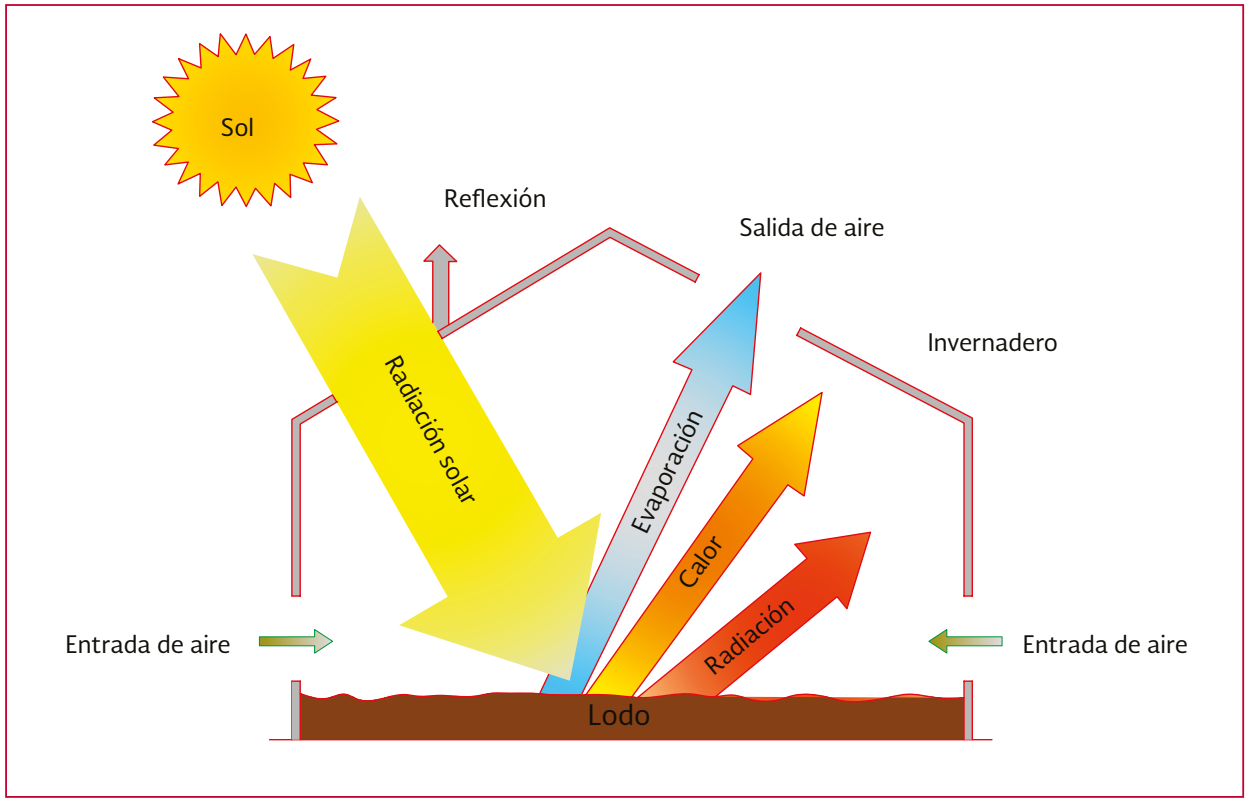
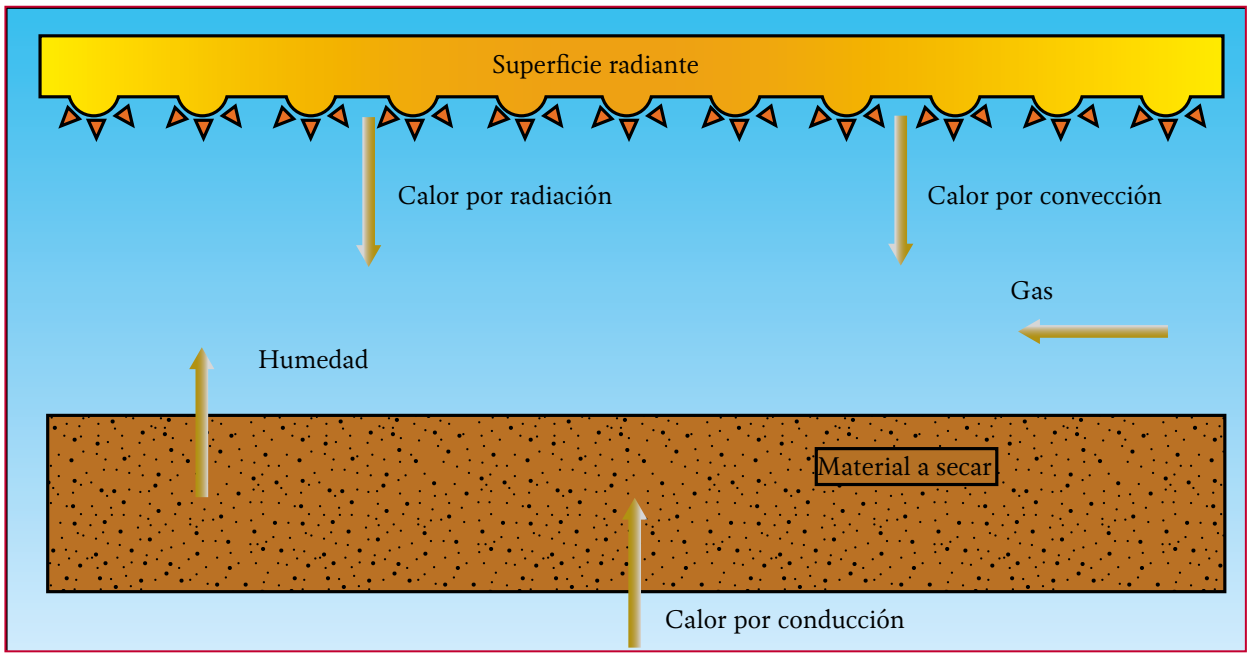


Ilustración 12.20 Mecanismos de transferencia de calor, (Valiente, 2002)



Conducción

La transferencia de calor por conducción se efectúa a través de la interacción molecular. A medida que una partícula incrementa su nivel de energía por motivo de una elevación en su temperatura, ésta imparte la energía adquirida a las partículas adyacentes que tienen un nivel de energía menor. Este mecanismo es característico de sistemas conformados por moléculas de líquido, sólido o gas.

De igual manera, la conducción presenta transmisión de calor por medio de electrones libres, este mecanismo es propio en sólidos metálicos. La capacidad que tienen los sólidos de conducir calor varía en proporción a la cantidad de electrones libres, es por ello que los metales puros son mejores conductores de calor.

Convección

Por convección, la transferencia de calor se produce debido al intercambio de energía que ocurre entre una superficie y un fluido adyacente. En este caso, la circulación de aire se produce por la diferente densidad que ocasiona la variación de temperatura en determinada región de este. Cuando se utiliza un mecanismo externo para propiciar esta circulación, ventiladores por ejemplo, el mecanismo se denomina convección forzada.

Radiación

La radiación es toda clase de proceso que transmite energía por medio de ondas electromagnéticas. La transferencia de energía se efectúa en forma de unidades de energía pequeñas (quantos).

Cuando un haz de energía radiante incide sobre un cuerpo, una parte de la energía se absorbe, otra se refleja y el resto lo atraviesa. Un cuerpo absorbe tanta energía por radiación como puede emitir, siempre y cuando exista un equilibrio calorífico. La transferencia de calor por radiación no necesita de un medio para la propagación de calor (Kreit, 1965).

Transmisión de la masa

En el proceso de secado, se supone también que toda el agua que sale del producto pasa al aire, entonces debe cumplirse que:

Disminución de agua en el producto = Aumento de agua en el aire

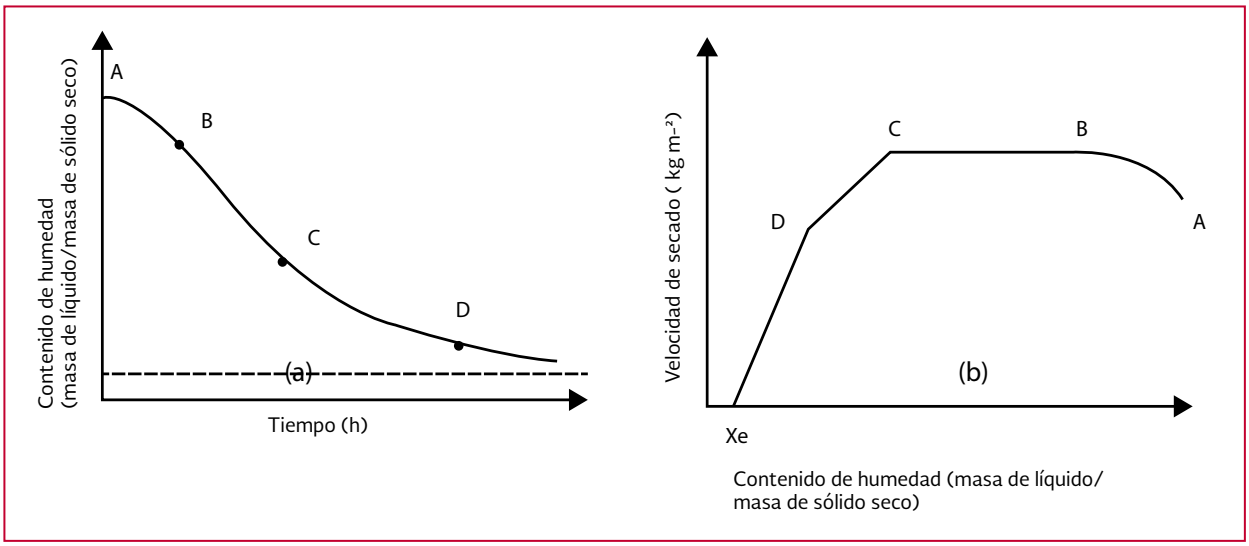
$$mw = ms\ \Delta Ws = ma\ \Delta X \qquad \text{Ecuación 12.10}$$

donde:
mw = masa de agua
ms = masa de producto seco
ma = masa de aire seco
ΔWs = humedad perdida por el producto en base seca
ΔX = humedad ganada por cada kilogramo de aire seco

El movimiento de la humedad dentro del sólido es función de la estructura de este, su temperatura y contenido de humedad. Durante el secado se elimina sólo el agua enlazada con el material de forma físico-química y mecánica.

Existe una porción de agua que no se puede eliminar por secado sino únicamente por reacciones químicas o sometiendo al material a muy altas temperaturas.

Ilustración 12.21 Curvas típicas de secado para condiciones constantes: (a) Contenido de humedad en función del tiempo; (b) velocidad de secado en función del contenido de humedad, (Valiente, 2002)



12.3.3.4. Etapas del Proceso de Secado

El comportamiento del sólido en el secado, es medido como la pérdida de humedad en función del tiempo.

A temperatura y humedad fijas se obtienen dos curvas típicas de secado, una sobre la base de contenido de humedad en función del tiempo y la otra sobre la base de velocidad de secado en función del contenido de humedad (Ilustración 12.21). De la primera se obtienen datos de prueba de secado, mientras que la segunda es más descriptiva del proceso (Foust, 1990).

Durante el secado siempre aparece un patrón general de comportamiento en el que el sólido en contacto con el medio de secado, en un principio, ajusta su temperatura con este hasta alcanzar un estado estable, este fenómeno se muestra en la Ilustración 12.21, está representado en el segmento A-B de la curva típica.

Posteriormente se presentan dos periodos de secado dados por la velocidad de secado, cuya determinación se ha hecho en base a varias observaciones experimentales junto con el desarrollo teórico de los fenómenos de secado, estos son: (Valiente, 2002):

- Periodo de secado a velocidad constante
- Periodo de secado decreciente o postcrítico

12.3.3.5. Periodo de secado a velocidad constante

Durante este periodo se evapora la humedad libre o no ligada del material. El sólido no influye de forma directa sobre la velocidad de secado y la superficie alcanza la temperatura de bulbo húmedo.

En la etapa de secado a velocidad constante, existe una transferencia de la humedad interna del sólido hacia la superficie formándose una capa de agua superior, por lo que en este caso, el mecanismo de secado equivale a la evaporación de agua desde una superficie plana. En la Ilustración 12.21, se muestra el segmento B-C corresponde a este periodo.

Periodo de secado decreciente

Generalmente, este periodo se divide en dos partes: la primera denominada primer periodo de velocidad decreciente y correspondiente al segmento C-D de la curva típica.

En este periodo la velocidad de movimiento del agua hacia la superficie es menor que la velocidad de evaporación, por lo que empieza a agotarse el agua en la superficie y esta no se reemplaza más. La velocidad de secado comienza a decaer, llegando a un valor de humedad correspondiente a D donde no existe un área significativa de superficie saturada de líquido.

El segundo periodo de secado decreciente se presenta para valores de humedad menores al que corresponde al punto D y se caracteriza debido a que toda la evaporación se da desde el interior del material. La humedad mínima alcanzada al final de este periodo es llamada humedad de equilibrio, y una vez llegado a este valor, el material no puede ceder más humedad al ambiente. El periodo de secado decreciente es variable y depende del mecanismo con el cual se lleve a cabo el secado (Valiente, 2002):

Secado por capilaridad
Secado por difusión

Secado por capilaridad

El secado por capilaridad se presenta en sólidos granulares que guardan humedad en los intersticios entre partículas, es decir, aquellos que poseen una estructura formada por poros y conectados entre sí por canales de diversos tamaños.

La humedad contenida en el sólido se mueve a través de este debido a una fuerza neta resultado de las diferencias de cargas hidrostáticas y de la tensión superficial. Al llegar a la superficie el líquido se evapora, con lo que en cada poro del sólido se forma un menisco que origina la creación de fuerzas capilares las cuales provocan el flujo de líquido a través de los poros. En la Ilustración 12.22 se presenta la curva típica de este mecanismo.

Ilustración 12.22 Curva típica del mecanismo de capilaridad, (Valiente, 2002)

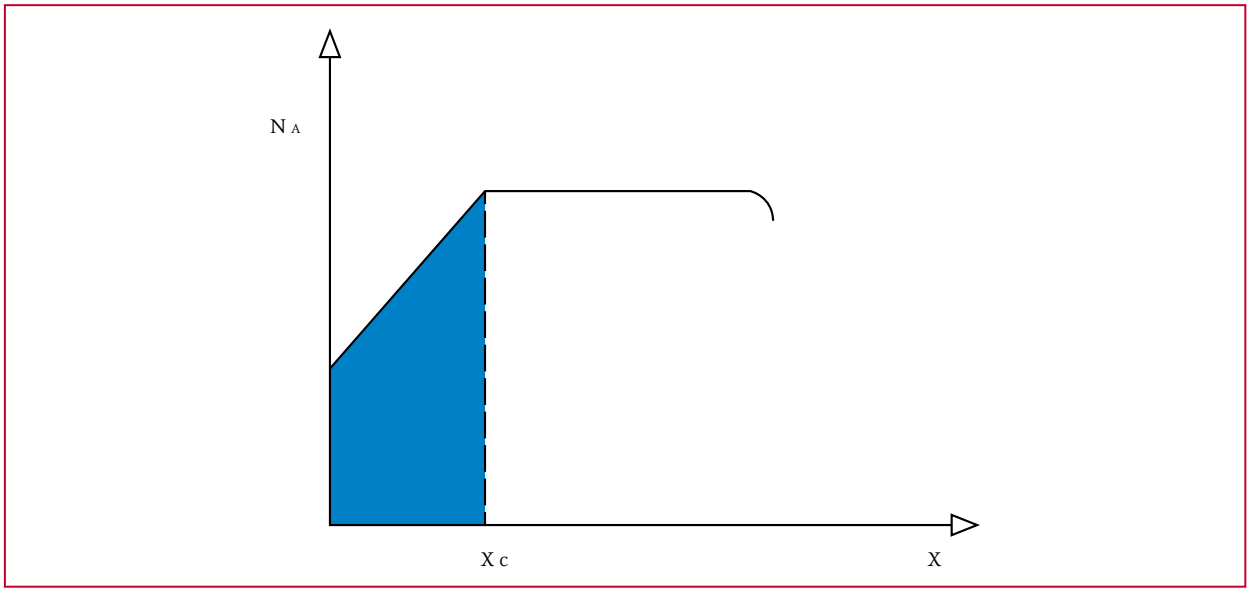
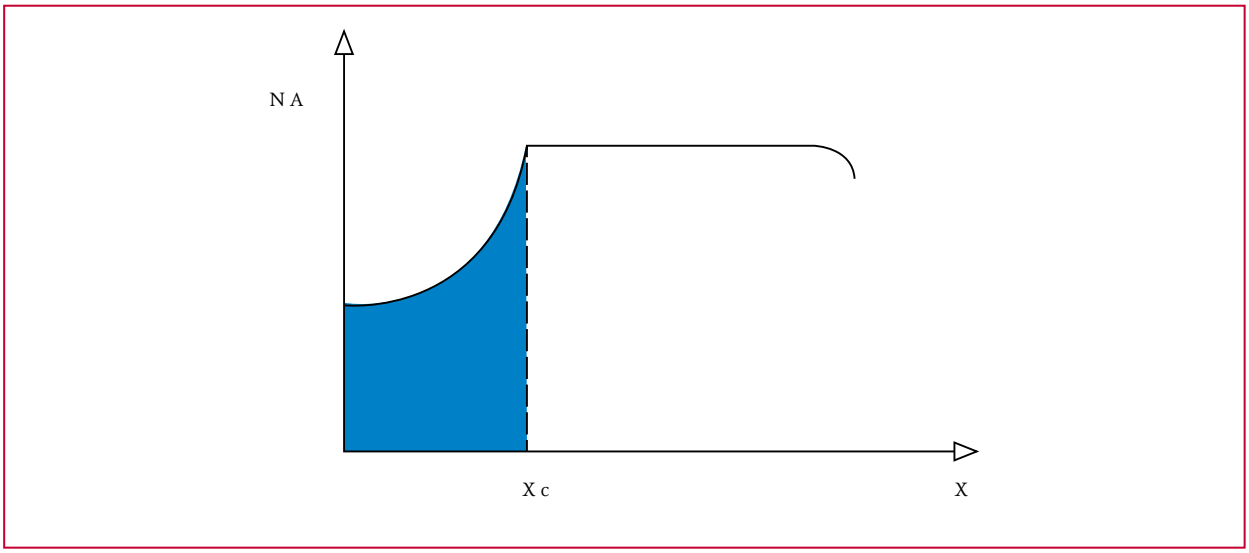


Ilustración 12.23 Curva típica del mecanismo de difusión, (Foust, 1990)



Secado por difusión

El secado por difusión se presenta generalmente en sólidos no porosos como gelatinas, pastas, pegamentos, etc. La difusión de la humedad se lleva a cabo cuando hay una diferencia de la concentración entre el fondo del sólido y la superficie, debido a este gradiente la humedad se difunde. En la Ilustración 12.23 se presenta la curva típica del mecanismo de difusión.

12.3.4. Tecnología utilizada para el secado solar de lodos y análisis de su eficiencia

El proceso de secado solar de lodos, puede realizarse bajo las siguientes condiciones:

12.3.4.1. Lechos de secado con ventilación natural

Estos lechos son ventilados por la acción del viento. Entre más alta sea la velocidad del viento sobre la superficie del lodo, más rápida es la velocidad de secado. En sitios donde llueve regularmente los lechos de secado deben cubrirse.

Algunos lugares de México son ideales para el secado solar de lodos por las altas temperaturas y los días con sol ocurren durante casi todo el año. Los fuertes vientos también ayudan al secado de lodo. Los factores que desfavorecen el secado son las lluvias frecuentes y la humedad relativa del aire con valores mayores de 60 por ciento. Sin embargo si se colocan lechos cubiertos para protegerse de la lluvia, el proceso de secado puede alcanzar altas eficiencias.

La eficiencia del secado de lodo será variable a la largo del año. En la época de fuertes lluvias y nortes la eficiencia de secado bajará y en época de verano y vientos moderados la eficiencia de secado será alta. Sin embargo se puede estimar obtener un lodo con un promedio de sólidos entre 50 y 60 por ciento en un período de secado de 1 mes.

Este proceso natural permite disminuir el volumen de lodo para disposición en relleno sanitario, en suelo o utilizarse para jardinería o agricultura dependiendo de las necesidades.

Para optimizar el sistema de secado se requiere de la mezcla de lodo. Esta se hace con un equipo especial como una máquina mezcladora y con ayuda de cargadores frontales, los cuales también ayudan al transporte el lodo de un lugar a otro.

El sistema de secado está constituido por:

- Superficie horizontal de concreto o asfalto para extender el lodo en capas no mayores de 16 cm de altura. Esta superficie debe tener una pendiente de 0.5 por ciento y una tubería para recolección de agua en caso de que se forme lixiviado. Este lixiviado sólo se forma por mala operación del sistema. El agua recolectada se regresa al inicio del sistema de tratamiento
- Cada módulo de secado debe estar techado con un material que permita el paso de la luz solar y que impida que la lluvia llegue al lodo que se está secando. Este material puede ser policarbonato que es el más utilizado, o materiales plásticos como los que se utilizan en los invernaderos. El policarbonato es muy resistente y puede alcanzar una vida útil de 15 años. Los plásticos de invernadero son de bajo costo y tienen una vida útil entre 4 y 5 años. Este último material no se recomienda utilizar en lugares con fuertes vientos y lluvias constantes
- Debe tener un sistema de mezclado de lodo para lo cual se pueden utilizar cargadores frontales con un dispositivo especial de mezclado llamado "tiller"

Este sistema de mezclado con cargadores frontales no permite que el lodo se granule en forma homogénea y el lodo muy seco puede generar problemas de polvo. Sin embargo es una opción económica para disminuir el volumen de lodo

12.3.4.2. Secado solar en invernadero bajo condiciones controladas

Actualmente se ha desarrollado tecnología para controlar y optimizar el secado de lodos. Estos sistemas usan invernaderos y controlan la ventilación dentro del mismo. También utilizan un sistema de mezclado de lodos. El mezclado continuo del lodo junto con el control de la ventilación en el sistema, permiten un secado rápido

Ilustración 12.24 Modelos en operación: (a) Secado solar en invernadero; (b) Secado solar con cubierta, (Valencia, 2008)

del lodo y también alcanzar un porcentaje de sólidos entre el 70 y 90 por ciento. La tecnología se ha desarrollado en Alemania y se comercializa bajo los siguientes nombres: Sistema Wendewolf y Thermo Systems. El principio es el mismo, la tecnología principalmente se diferencia en el equipo para mezclar y permitir que el lodo se granule y seque uniformemente.

El sistema de ventilación tiene dos componentes:

Techo con sistema de ventilación

En el techo se instalan aberturas o ventanas abatibles a lo largo del invernadero que pueden abrirse o cerrarse por medio de un motor, similares a las utilizadas en los invernaderos de plantas. Esto es con el fin de permitir la salida del aire saturado de humedad. También se pueden instalar extractores.

Ilustración 12.25 Sistema de ventilación dentro del área de secado (Thermo - Systems, 2013)

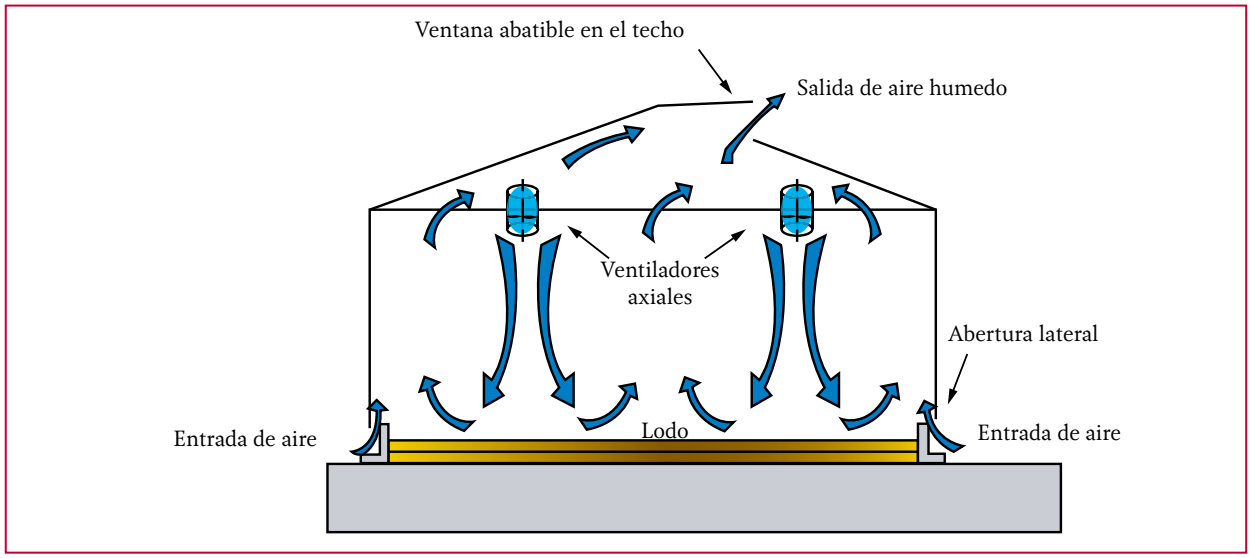
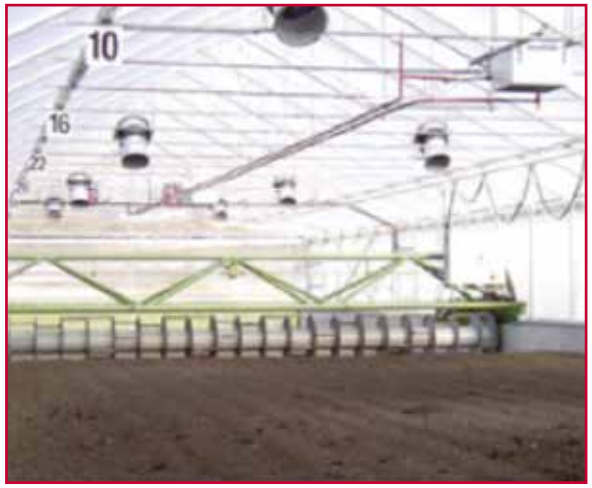


Ilustración 12.26 Invernadero con sistema de ventilación abatible, (WENDEWOLF, 2013)

Ilustración 12.27 Sistema Wendewolf para el movimiento y secado del lodo, (WENDEWOLF, 2013)



Ventiladores axiales

Estos ventiladores se colocan dentro del invernadero para que se forme una corriente de aire turbulento sobre la superficie del área de secado, destruyendo la capa de humedad que se forma sobre el lodo. Esta corriente artificial es importante para el secado ya que evita la estratificación de la temperatura y de la humedad.

12.3.4.3. Sistema de secado solar Wendewolf

Este sistema se desarrolló en Alemania (WENDEWOLF, 2013).

El sistema seca el lodo dentro de un invernadero y mueve la cama de lodo en forma continua por medio de un dispositivo o máquina similar a un rodillo. Como la velocidad radial es mayor que la velocidad con que se mueve, cada vez que el tornillo voltea el lodo este se mueve automáticamente de un lado a otro.

El sistema consiste en:

- Una superficie horizontal de concreto o asfalto, similar a un carretera
- Dos paredes paralelas de 12m de ancho y hasta 120 m de largo y 0.85 m de altura
- Energía eléctrica requerida 200 v, 12 kW
- Acceso al área por los dos extremos
- Máquina Wendewolf para el volteo de lodos
- Un panel de operación
- Invernadero con ventiladores (2-3 $W \cdot m^{-2}$ de área de secado)

12.3.4.4. Termo Systems

Este sistema también se desarrolló en Alemania y se utiliza en plantas de tratamiento de Europa y Estados Unidos (Thermo-System, 2013). El principio del sistema es similar al anterior solo que aquí el invernadero es completamente cerrado. El aire saturado (Ilustración 12.28) se saca por medio de extractores de aire.

Ilustración 12.28 Sistema de secado de lodos, (Thermo-System, 2013)

El sistema consiste de una cámara translúcida, sensores para el monitoreo de las condiciones de secado, ventiladores, extractores de aire, móvil eléctrico (Mole) y un microprocesador el cual controla todas las condiciones ambientales para el secado. La principal fuente de energía para el secado es la radiación solar. El microprocesador evalúa un número de variables climáticas e inicia una o más operaciones la cuales optimizan las condiciones para el secado que depende de las condiciones del medio ambiente.

El microprocesador también envía señales al Mole para indicar los ciclos de operación. El mole seca la cama de lodo, sacando la humedad a la superficie, y cuando el proceso avanza convierte el lodo en pequeño gránulos. El microprocesador es el cerebro que controla y optimiza la operación de secado para producir un lodo seco en un tiempo relativamente corto entre 15 y 30 días.

12.3.4.5. Componentes del sistema

Cámara de secado

La cámara de secado es rectangular construida de acero galvanizado y cubierta con hojas de policarbonato transparente y perfectamente selladas con el fin de colectar la luz solar y evitar que los cambios en las condiciones ambientales externas afecten el sistema.

Ventilación e intercambio de aire

El clima en la cámara se controla a través de un complejo sistema de secado que considera parámetros internos y externos que se deben controlar para incrementar la velocidad de secado y reducir el consumo de energía.

Un sistema de ventiladores colocados dentro de la cámara suministra aire a la superficie del lodo, dependiendo de las características del mismo.

El sistema de aireación se combina introduciendo aire fresco por medio de unas rejillas o ventilas, y sacando el aire saturado de humedad por medio de los ventiladores. Ilustración 12.29 e Ilustración 12.30.

Sistema de mezclado automático, mole eléctrico

Un mezclado y volteo eficiente del lodo se garantiza por medio del dispositivo que aparece en las Ilustraciones 12.31 y 12.32, denominado Mole Eléctrico. Cada cámara de secado cuenta con un MOLE, que es un pequeño microprocesador que controla un robot de 4 ruedas el cual mezcla, voltea y airea el lodo. Este aparato se desplaza a lo largo y ancho de la celda y el mismo se orienta por medio de un sensor ultrasónico, además logra una operación eficiente con bajo consumo de energía

La Tabla 12.7, muestra la eficiencia del proceso en tres experimentos realizados in Fussen, Alemania.

El experimento 1, se realizó con temperaturas de 5.1 ºC, baja radiación solar y durante un período de secado de 52 días solo se consigue secar el lodo, hasta alcanzar 42 por ciento de sólidos totales al final del experimento. Cuando la temperatura es más alta de 26.1ºC, que corresponde al experimento 2, se tiene mayor intensidad de radiación solar y un período de secado de solo 13 días alcanza un porcentaje de sólidos totales en el lodo de 55 por ciento.

Cuando la radiación solar aumenta y la temperatura también aumenta, experimento 3, se ob-

serva que con un período de secado de 32 días se consigue una concentración final de sólidos totales en el lodo de 80 por ciento. Este último experimento se realizó con las mejores condiciones para este tipo proceso: temperatura media de 18.3 ºC, radiación solar 111 W m^{-2}, carga de lodo de 74 kg m^{-2} y concentración de sólidos totales después de 32 días de proceso de 80 por ciento. Estas condiciones ambientales son comunes en muchas regiones de México.

Ilustración 12.29 Vista del invernadero utilizado para el secado de lodos y el sistema de extracción de aire, (Thermo-System, 2013)

Ilustración 12.31 Carro eléctrico (Mole) para mover y secar el lodo, (Thermo-System, 2013)

12.3.4.6. Secado solar sin cubierta o al aire libre

En lugares donde la precipitación es baja, se puede realizar el secado al aire libre, como se muestra en la Ilustración 12.34. De esta forma la intensidad de los rayos solares es mayor ya que caen directamente sobre la superficie de secado. Los resultados obtenidos para un lodo industrial con una concentración inicial de 12 por ciento

Ilustración 12.30 Invernadero con ventilas laterales para entrada de aire, (Thermo-System, 2013)

Ilustración 12.32 Carro eléctrico en operación, (Thermo-System, 2013)

Ilustración 12.33 Sistema de aspas mecánicas para el mezclado de lodo, (Thermo-System, 2013)

Tabla 12.7 Resultados obtenidos de secado solar, (Thermo-System, 2013)

Nº Exp	Periodo de secado (d)	Radiación solar media ($W \cdot m^{-2}$)	Temperatura media (°C)	Cantidad de sólidos ($kg \cdot m^{-2}$)	ST inicial (%)	ST final (%)
1	52	67	5.1	58	26	43
2	13	111	26.1	45	28	55
3	32	144	18.3	74	28	80

de sólidos totales y con temperatura ambiente promedio de 33 °C., fueron los siguientes:

A los 18 días el lodo alcanzó una concentración de sólidos totales de 91 por ciento. La temperatura que se muestra en la Ilustración 12.35, es la que se alcanza en la interfase del sólido, la cual varió entre 30 y 43 grados centrígrados.

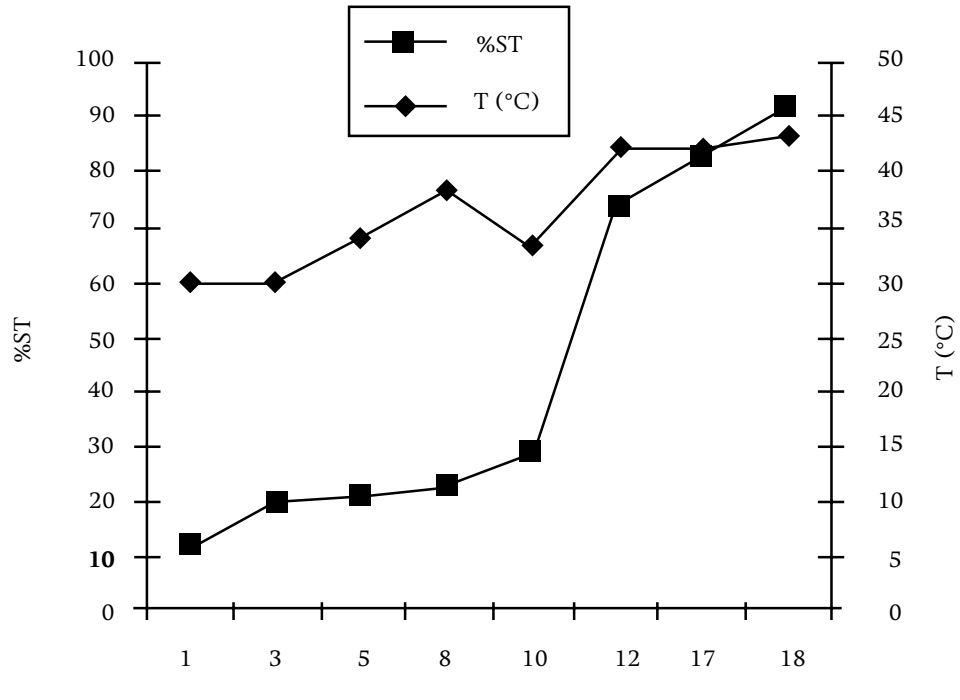
12.3.5. Ventajas y desventajas

La deshidratación es una operación unitaria usada para reducir la humedad contenida en el lodo y biosólidos por una o más de las siguientes razones:

1. El costo de transporte de lodos y biosólidos al sitio de disposición final se reduce sustancialmente cuando se utiliza el proceso de deshidratación
2. Los lodos y biosólidos deshidratados son generalmente más fáciles de manejar que los lodos espesados. En la mayoría de los casos, los lodos deshidratados se mueven con pala, con tractores equipados con cubos y palas y se transporta por cintas transportadoras
3. Normalmente la deshidratación se requiere antes de la incineración de los lodos para incrementar el valor calorífico removiendo el exceso de humedad

Ilustración 12.34 Secado solar sin cubierta, (Valencia, 2008)

Ilustración 12.35 Secado solar de lodos industriales al aire libre. (Cardoso *et al.,* 2007)



4. La deshidratación se requiere antes del composteo para reducir la cantidad de materiales acondicionadores
5. La deshidratación remueve el exceso de humedad disminuyendo la generación de olor y la putrefacción
6. Se requiere de la deshidratación de lodos y biosólidos antes de disponerlos en rellenos sanitarios para reducir la producción de lixiviados (Metcalf & Eddy, 2003)

Se recomienda realizar pruebas piloto para el diseño final. Esto, sin embargo, no siempre garantiza el funcionamiento eficaz del sistema a gran escala. Como se verá, hay muchos problemas relacionados con la aplicación de los equipos de deshidratación, y esto, combinado con las características cambiantes de los lodos de aguas residuales municipales, causan problemas significativos. Los diseñadores deben ser conscientes de estos problemas. Los equipos de deshidratación comúnmente usados incluyen: centrífugas, filtro prensa de bandas, filtro prensa de placas, lechos de secado y lagunas. En la Tabla 12.8 se resumen las ventajas y desventajas de los diferentes métodos de deshidratación de lodos.

12.4. Criterios de diseño

12.4.1. Lechos de secado

La operación de lechos de secado depende de (Mijaylova, 1999):

- La concentración de los sólidos en el lodo
- La profundidad de la capa de lodo aplicada
- La pérdida de agua a través del sistema de bajo dren
- El grado y tipo de acondicionamiento y estabilización de lodos
- La tasa de evaporación, que la determinan los factores ambientales
- El método de recolección o retiro del lodo
- El método de disposición final utilizado

Todas las consideraciones mencionadas arriba determinan la carga óptima de lodos, los requerimientos de área y otros criterios de diseño para un lecho de secado. Otra consideración muy importante es el sitio o lugar donde se instalará el lecho.

12.4.1.1. Lechos con cubierta

Siempre existe la posibilidad de largos períodos de lluvia, nieve o el frío; el problema de olores, insectos, o un problema con la estética del lugar, por lo que se debe considerar el empleo de cubiertas para los lechos de secado. Los lechos cubiertos deben estar bién ventilados, para que el aire pueda fluir sobre la superficie de los lechos y requieren del 25 a 33 por ciento menos de área que los lechos de arena abiertos (US, EPA, 1979).

Los lechos se pueden cubrir con plástico reforzado con fibra de vidrio. Los techos colocados solamente sobre la parte superior del lecho protegen al lodo de la precipitación, pero proporcionan poco control de la temperatura. Los lechos totalmente cubiertos, en cambio, permiten mayor número de ciclos por año, en la mayoría de los climas, debido a un mejor control de temperatura.

Los lechos cubiertos normalmente requieren menos área que los abiertos. Sin embargo, si las condiciones climatológicas son favorables en los lechos abiertos la humedad de la torta se evapora más rápido. Una combinación de lechos abiertos y cubiertos puede lograr un uso más eficiente de las instalaciones para el secado de lodos (Mijaylova, 1999).

12.4.1.2. Acondicionamiento de lodos

El acondicionamiento ayuda a mejorar la capacidad de secado de lechos y a contrarrestar las condiciones impredecibles del clima y la varia-

Tabla 12.8 Comparación de los diferentes tipos de deshidratación, (WEF, 1998) y (US, EPA, 1979)

Métodos de deshidratación	Ventajas	Desventajas
Centrífugas	Buena contención de olores, da una apariencia limpia, arranque rápido Produce una torta de lodo relativamente seca Bajo costo de capital en relación con la capacidad de tratamiento Necesita poco espacio de construcción	Problemas de mantenimiento por un alto desgaste de las piezas Requiere desarenado y posiblemente un desmenuzador o triturador en la línea de alimentación Requiere de personal experto para el mantenimiento El centrífugado contiene una concentración de sólidos suspendidos moderadamente alta
Filtro prensa de bandas	Requerimientos bajos de energía Costos de capital y operación relativamente bajos Mecánicamente menos complejos y su mantenimiento es fácil de realizar Máquinas de alta presión son capaces de producir un lodo muy seco Requiere un mínimo esfuerzo para el paro del equipo	Problemas de olores Requiere un desmenuzador o triturador de lodos en la línea de alimentación Sensible a las características del lodo alimentado El funcionamiento automático no es recomendable
Filtro prensa de placas	Alta concentración de sólidos en la torta Sólidos suspendidos bajos en el filtrado	Operación por lotes Altos costos de equipo Altos costos de mano de obra Requiere de una estructura de soporte especial Requiere de una gran área para la instalación del equipo Requiere personal especializado para el mantenimiento Se incrementa la cantidad de sólidos debido a la adición de productos químicos
Lechos de secado	Método de bajo costo de capital, donde la tierra está disponible Requiere poca atención y habilidades del operador Consumo de energía bajo Bajo o ningún consumo de productos químicos Mayor contenido de sólidos que los métodos mecánicos	Requiere grandes extensiones de tierra Requiere un lodo estabilizado En el diseño se requiere considerar los efectos del clima
Lagunas	Bajos consumos de energía No consume químicos La materia orgánica se estabiliza aún más Bajo costo de capital, cuando hay disponibilidad de terreno Se requiere poca habilidad para la operación	Problemas potenciales de olores y vectores Problemas de contaminación del agua subterránea Se necesitan mayores extensiones de terreno que los medios mecánicos Puede tener un aspecto sucio En el diseño se deben considerar los efectos del clima

bilidad de las características del lodo. Los polímeros son los principales químicos utilizados para el acondicionamiento de lodos. Puede ocurrir el taponamiento de la arena si la dosis de polímero es muy alta.

Si el diseño del sistema de lechos incluye la adición de polímero, se requiere un mínimo de tres puntos de aplicación de polímeros para optimizar la efectividad. Uno debe estar cerca de la succión de la bomba, otro en la descarga de la bomba y el último cerca del punto de descarga de cada lecho. Se debe tener prevista la recirculación del lodo tratado con polímero para permitir la optimización de la dosis antes de la descarga inicial del lodo al lecho.

12.4.1.3. Recolección o retiro de lodo

Cuando la recolección del lodo en los lechos de secado es manual, se requiere una concentración de sólidos de un 30 al 40 por ciento. Actualmente, muchas plantas utilizan equipo mecánico, reduciendo los requerimientos de mano de obra. Generalmente, un contenido de sólidos secos de 20 a 30 por ciento es suficiente para la remoción mecánica (US, EPA, 1979).

12.4.1.4. Carga de lodos

La carga de lodos a los lechos de secado representa la cantidad depositada anualmente para su deshidratación en una superficie por metro cuadrado. Los requerimientos típicos varían de 50 a 125 kg m^2 $año^{-1}$ para lechos abiertos y de 60 a 200 kg m^2 $año^{-1}$ para lechos cerrados. Existen recomendaciones para seleccionar la carga dependiendo del tipo de lodo a tratar. El mejor criterio toma en consideración las condiciones climáticas como; temperatura, velocidad del viento, humedad y precipitación.

12.4.1.5. Requerimientos de área

En la Tabla 12.9 se muestran los criterios "per cápita" comúnmente utilizados para el dimensionamiento de los lechos de secado. La experiencia indica que se necesita un mínimo de 0.35 a 0.50 m^2 per cápita es necesario debido a los cambios en las características de los lodos (US, EPA, 1979).

La cantidad de sólidos secos deshidratados al año se calcula utilizando Ecuación 12.11 (Mijaylova, 1999).

$$SSD = SV \times SS \times SSG \times 1\,000 \times 1\,000/100$$

Ecuación 12.11

donde:

SSD = Sólidos secos deshidratados al año, kg·$año^{-1}$

SV = gasto volumétrico de lodo, miles de m^3 por año

SS = Contenido de sólidos suspendidos, por ciento

SSG = Gravedad específica del lodo

El cálculo del área requerida para los lechos de secado se hace utilizando la Ecuación 12.12.

$$A = SSD/(DBA \times 1\,000)$$

Ecuación 12.12

donde:

A = Área requerida en los lechos, 1 000 m^2

SSD = Sólidos secos deshidratados, t d^{-1}

DBA = Carga de lodos secos, kg m^2 $año^{-1}$

12.4.1.6. Efecto de la profundidad de aplicación

Las profundidades de aplicación (Ilustración 12.36) varían desde 200 hasta 400 mm y considerar una carga óptima de 10 a 15 kg m^2. El espesor de la torta seca es función de la concentración de sólidos y profundidad aplicada.

El contenido de humedad del lodo removido varía entre 44.5 a 55.5 por ciento. El secado se lleva a cabo a una tasa declinante. En general, mientras más bajo es el contenido final de humedad requerido, mayor es el tiempo de secado.

Tabla 12.9 Resumen de criterios de diseño para lechos de arena, (US, EPA, 1979)

Origen del lodo	Lechos descubiertos		Área de lecho cubierto, m^2 cap^{-1}
	Área, m^2 cap^{-1}	Carga de sólidos, kg m^{-2} $año^{-1}$	
Primario			
Referencia 1, (Imhoff & G.M., 1959)	0.09	134	
Referencia 2, (Water Pollution Control Federation, 1959)	0.09-0.14		0.07-0-09
Referencia 3, (Recommended Standards for Sewage Works, 1971)			
Latitud N° 45° N	0.12		0.09
Entre 40°-45° N	0.1		
Latitud S 40° N	0.7		0.05
Primario + químicos			
Referencia 1	0.2	110	
Referencia 2	0.18-0.21		
Referencia 3			0.09-0.12
Latitud N° 45° N	0.23		0.173
Entre 40°-45° N	0.18		0.139
Latitud S 40° N	0.14		0.104
Primario + filtro rociador de baja tasa			
Referencia 1	0.15	110	
Referencia 2	0.15	110	
Referencia 3	0.12-0.16		0.09-0.12
Latitud N° 45° N	0.173		0.145
Entre 40°-45° N	0.139		0.116
Latitud S 40° N	0.104		0.086
Primario + lodo activado purgado			
Referencia 1	0.28	73	
Referencia 2	0.16-0.23		0.12-0.14
Referencia 3	0.202		0.156
Latitud N° 45° N	0.162		0.125
Entre 40°-45° N	0.122		0.094
Latitud S 40° N	0.32-0.51	35-59	

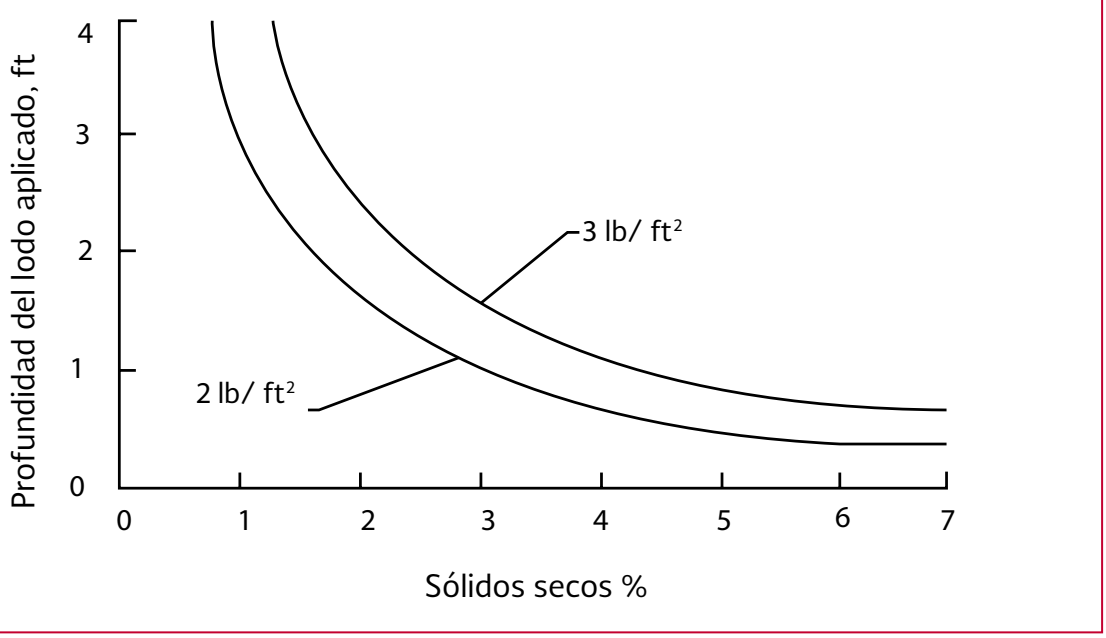
12.4.1.7. Efectos climáticos

El tiempo de secado es más corto en regiones con mayor luz solar, menor lluvia y menor humedad. La duración y velocidad del viento también afecta la tasa de evaporación de los lechos de secado. Por consiguiente, las condiciones climáticas pueden justificar algunas modificaciones en los criterios de diseño.

12.4.2. Centrífugas

Las variables del proceso que afectan el desempeño de las centrífugas, son la concentración de los sólidos en la torta del lodo y la recuperación de SST. Estas variables están relacionadas con el flujo de alimentación, la velocidad de rotación, el diferencial de la velocidad de desplazamiento, la profundidad de la zona de decantación, el

Ilustración 12.36 Secado solar de lodos industriales al aire libre. (Cardoso et al., 2007)



acondicionamiento químico y las propiedades fisicoquímicas de los sólidos y del líquido suspendido. Algunas propiedades importantes son el tamaño y la forma de la partícula, la densidad de la partícula, la temperatura y la viscosidad del lodo.

La mayor dificultad encontrada en la operación de las centrífugas ha sido la disposición del concentrado, el cual puede tener altas concentraciones de sólidos suspendidos no sedimentables, que al recircularse reducen la calidad del efluente de la planta de tratamiento. El incremento en el tiempo de residencia y un mejor acondicionamiento del lodo, son los métodos que se utilizan para el control de la descarga de sólidos finos y para incrementar la captura de los mismos. El tamaño de partícula puede incrementarse por la coagulación del lodo previo a la centrifugación. La captura de sólidos (porcentaje de sólidos en la descarga de la centrífuga) puede incrementarse del 50 a 80 por ciento hasta un rango del 80 al 95 por ciento por el aumento el tiempo de residencia y el acondicionamiento químico.

La adición de cal también puede ayudar en el control de olores que se puede desarrollar cuando un lodo sin tratamiento se alimenta a la centrífuga. Como es el caso de los lodos primarios sin tratamiento, que pueden ser deshidratados para obtener un lodo con bajo contenido de humedad. El acondicionamiento químico debe realizarse cuando la deshidratación combina un lodo primario y un lodo secundario del sistema de lodos activados, independientemente si se ha estabilizado o no. La selección del equipo depende de las características y del desempeño del equipo que ofrece cada fabricante. Algunos fabricantes tienen unidades portátiles, las cuales pueden ser utilizadas para realizar pruebas con el lodo a tratar. Los lodos de aguas residuales de los procesos de tratamiento similares, pero de diferentes localidades, pueden ser notablemente diferentes. Por esta razón, se deben realizan pruebas piloto antes de tomar decisiones finales sobre el diseño y selección del equipo.

El área requerida para la instalación de las centrífugas es menor que el requerido por otros

equipos de deshidratación con la misma capacidad, y el costo inicial es bajo. Sin embargo los costos de energía son altos. Se deben considerar instalaciones especiales, como cimientos resistentes y aislamiento acústico debido a las vibraciones y ruidos que resultan de la operación de algunos tipos de centrífugas. Además, una fuente de energía apropiada cuando se utilizan grandes motores.

Ya que las centrífugas son cerradas, la generación de olores no es un problema en comparación con otro tipo de sistemas de deshidratación. La ventilación de las centrífugas facilita el control de olores y debe considerarse también la acumulación de humedad. (Metcalf & Eddy, 2003).

12.4.2.1. Elementos estructurales

Prácticamente todas las centrífugadoras son de acero inoxidable. Las técnicas actuales para la fabricación de las centrífugas, permiten tener un equipo de mejor calidad, de mayor durabilidad y resistencia que las anteriores. La protección contra la erosión es importante. Las zonas de las paredes del recipiente que necesitan protección son el recipiente debajo de la zona de alimentación y en la base. La zona donde los sólidos salen del recipiente es otro punto de desgaste. El interior del tazón de la centrífuga normalmente está protegido con recubrimiento ahulado. En algunos casos, la pared del tazón incluye recubrimientos de acero inoxidable o cerámica (WEF, *et al*., 2012).

La abertura por donde los sólidos salen de la centrífuga está sujeto a abrasión severa y a fallas estructurales. El carburo de tungsteno es el mejor para la protección contra el desgaste, pero su fragilidad es a veces un problema. Por otro lado, el área de descarga de sólidos tiene una velocidad lineal superior a 240 km h^{-1}. Los recubrimientos de caucho y de uretano proporcionan el mejor servicio, seguido por un recubrimiento de acero. La centrífuga requiere de ventilación. Una ventilación inadecuada puede ocasionar que la carcasa se llene de sólidos, lo cual causa daños graves a la centrífuga. El ingeniero de diseño debe seguir los requerimientos de ventilación recomendados por el fabricante (WEF, *et al*., 2012).

12.4.2.2. Carga dinámica

La carga dinámica sobre los rodamientos influye sobre la vida media de estos. Una centrífuga grande con un peso estático de 9 100 kg operando a 2 600 rpm con un 0.5 kg de desbalanceo ejerce a 43 Hz una carga dinámica de 1 392 kg. La carga dinámica es proporcional a las vibraciones generadas por la centrífuga, al balance de la centrífuga y al sistema de suspensión (WEF, *et al*., 2012).

12.4.2.3. Control de vibraciones y ruido

Todas las centrífugas generan ruido y vibraciones. En la medida en la que el fabricante haya realizado un buen trabajo con el diseño, el ruido y las vibraciones se minimizan. En la mejor práctica, el peso de los rotores es aproximadamente la mitad del peso total de los aisladores. Minimizar el ruido y las vibraciones es muy caro, por lo que en la práctica se construye la estructura de la centrífuga más pesada para suprimir vibraciones (WEF, *et al*., 2012).

Cuando las instalaciones son nuevas cumplen con los decibeles que marca la normatividad, sin embargo el ruido puede incremente a través

del tiempo. EL colocar cubiertas de amortiguamiento y páneles sobre las paredes y techos para contrarrestan el ruido de las centrífugas es caro y engorroso. La mejor solución para los operadores, es minimizar el tiempo que se pasa en el cuarto de la centrífuga o incluso en el mismo piso. La sala de control, la recepción del concentrado y de la torta lodo, el proceso de muestreo y la instrumentación deben colocarse por fuera, generalmente debajo, del cuarto de la centrífuga (WEF, *et al*., 2012).

12.4.2.4. Carga hidráulica

Como en todos los dispositivos de deshidratación, cuando la carga hidráulica se incrementa el desempeño del equipo decrece. El rendimiento de las centrífugas puede variar de 76 a 6800 L min^{-1}. Típicamente las centrífugas están menos limitadas por la carga hidráulica que por la carga de sólidos por el polímero extra que se adiciona para una buena sedimentación y secado de la torta de lodos. (WEF, *et al*., 2012).

La carga hidráulica a la centrífuga afecta la capacidad de clarificación. Al aumentar la carga hidráulica se disminuye la claridad del concentrado y puede incrementar el consumo de químicos (US, EPA, 1985).

12.4.2.5. Carga de sólidos

El volumen del manto o capa de lodo dentro de la centrífuga es más o menos fijo. Una torta húmeda se obtiene cuando se incrementa la carga de sólidos, y se disminuye el tiempo de residencia de sólidos. Esto se puede compensar con el incremento de polímero o de la fuerza de aceleración. Cuatro parámetros de desempeño se consideran para la centrífuga: el secado de la torta, la dosis del polímero, la velocidad de alimentación y la calidad del líquido concentrado. El operador puede mejorar un parámetro a expensas de otro. Por ejemplo: reducir la velocidad de alimentación puede incrementar el tiempo de residencia de sólidos, lo cual da como resultado un mejor drenado de la torta, disminuye el consumo de polímeros y se obtiene un líquido concentrado más limpio (WEF, *et al*., 2012).

La carga de sólidos es una función de la capacidad de transportación. Cuando se presentan cambios en la carga de sólidos, se requiere el cambio correspondiente en la velocidad diferencial. La concentración más alta se logra a una velocidad diferencial mínima y a una tasa de alimentación que corresponde a la capacidad de transportación volumétrica menor. La mayoría de las centrífugas que operan en plantas de tratamiento de aguas residuales alimentan un lodo con una concentración de sólidos entre 0.75 y 4 por ciento. (US, EPA, 1985).

12.4.2.6. Velocidad de rotación

La velocidad de rotación es muy importante para la calidad del proceso. Las centrífugas que pueden operar continuamente a una fuerza de aceleración alta están mejor diseñadas que las centrífugas que no pueden. Estas son de alto costo. Por lo que un aspecto muy importante es escoger entre un precio alto y un mejor desempeño de la centrífuga.

12.4.2.7. Requerimientos de área

El espacio requerido para la centrífuga incluyendo áreas de acceso y mantenimiento, para

equipos grandes (10 a 40 L s^{-1} lodo afluente) es aproximadamente 40 m^2. Otros elementos requeridos, pero contabilizados en los requerimientos de área mencionados anteriormente, incluyen: (US, EPA, 1985):

- Equipo y tubería para la alimentación del polímero
- Tubería para agua de lavado y limpieza
- Bombas y tubería para la alimentación del lodo
- Malacate y sistemas de apoyo
- Transportador y controlador de los sólidos espesados, equipo para trituración o reducción de tamaño de partícula del lodo afluente, dispositivo electrónico para monitoreo del balance de masa a través de la centrífuga, sistemas de venteo y control de olores, y limpieza de la tubería de alimentación, entre otros

12.4.2.8. Acondicionamiento químico

Todas las centrífugas y filtros utilizados para la deshidratación de lodos requieren acondicionamiento químico de lodos para alcanzar los resultados requeridos. En algún punto, los flóculos del polímero son los suficientemente fuertes para lograr la clarificación del agua y permitir que los lodos resultantes puedan desplazarse fuera de la centrífuga. Al adicionar una mayor cantidad de polímero se obtiene una mejor compactación del lodo y una torta más seca. Cuatro parámetros de desempeño que afectan económicamente el proceso están relacionados con el acondicionamiento químico (WEF, *et al*., 2012):

- Los sólidos en la torta
- La dosis del polímero
- La velocidad de alimentación y
- La calidad del concentrado

Algunas veces, se utilizan químicos inorgánicos como el cloruro férrico y aluminio. El cloruro férrico mejora la deshidratación, pero rara vez es suficiente para justificar su costo. Los operadores que usan cloruro férrico en el proceso de tratamiento del agua para la remoción de fósforo o para el control del olor, han notado el lodo es más fácil de deshidratar en proporción a la dosis del cloruro férrico. (WEF, *et al*., 2012). Adicionar ácido a los residuos también puede ayudar y puede ser una opción menos costosa. La adición de peróxido de hidrógeno y permanganato de potasio también pueden mejorar la deshidratación.

12.4.3. Filtros prensa de bandas

Los principales conceptos que se consideran en los filtros prensa de bandas son: la capacidad de rendimiento hidráulico y de sólidos, la alimentación de polímeros y lodos, el lavado de la banda, filtrado y el transporte de los lodos deshidratados, los equipos de acceso y disposición y de control de olores. También se consideran las características del lodo alimentado y el uso del lodo deshidratado. (WEF, *et al*., 2012).

12.4.3.1. Capacidad

La capacidad de manejo de lodos en un filtro prensa de bandas depende de la concentración de sólidos en el afluente, ya que limita la carga hidráulica y de sólidos. De las dos limitaciones, los sólidos son normalmente más críticos. Los filtros de banda, para un determinado ancho de banda, tienen una capacidad máxima de carga de líquido o sólidos, que puede lograrse solo con el acondicionamiento correcto del lodo.

Para calcular la cantidad diaria de lodos deshidratados se utiliza la siguiente ecuación:

$$DSS = SV \times SS \times SSG \times \frac{1\,000}{100 \times 365}$$

Ecuación 12.13

donde:

DSS = Sólidos secos deshidratados diariamente, t d^{-1}

SV = Volumen diario de lodos, miles de m^3 $año^{-1}$

SS = Contenido de sólidos suspendidos, por ciento

SSG = Gravedad específica del lodo

Para determinar el ancho de la banda, dependiendo de la carga de los sólidos se utiliza la ecuación:

$$TBFW = DSS \times 365 \times \frac{1\,000}{BFLR \times HPD \times DPY}$$

Ecuación 12.14

donde:

TBFW = Ancho de la banda requerido, m

DSS = Sólidos secos deshidratados diariamente, t d^{-1}

BFLR = Tasa de carga de lodos secos por metro de ancho de banda, K h^{-1} m^{-1}

HPD = Horas de operación al día, h d^{-1}

DPY = Días de operación al año, días por año

12.4.3.2. Carga hidráulica

El rendimiento de un filtro prensa de bandas es el primer criterio de diseño para su selección. EL rendimiento permite determinar el límite hidráulico o de sólidos, dependiendo de la concentración de los lodos alimentados.

La tasa de carga hidráulica típica para un filtro prensa de bandas está dentro del rango de 3 a 4 L s^{-1} por metro de ancho de banda. El límite de carga hidráulica es de 6 a 9 L s^{-1} por metro de ancho de banda.

12.4.3.3. Carga de sólidos

Las características de los sólidos, el origen, y el grado de estabilización tienen un efecto significativo sobre la carga de los filtros prensa de bandas y sobre las características obtenidas en el lodo deshidratado. Un lodo diluido de 0.5 a 1 por ciento de sólidos totales, requiere un mayor drenado por gravedad y más polímero y un mayor tiempo de deshidratación que un lodo con una mayor concentración. Muchos fabricantes indican el porcentaje esperado de sequedad de la torta de acuerdo al incremento de sólidos en la alimentación. El proceso de estabilización del lodo también influye en el contenido máximo de sólidos en el lodo después de la deshidratación. Generalmente cuando el contenido de sólidos volátiles en un lodo estabilizado es bajo, es posible alimentar una mayor cantidad de lodos. Las variables que afectan la máxima carga de sólidos son: el grado de estabilización del lodo, la cantidad y tipo de fibra en el lodo, la resistencia del lodo al corte, el tipo de acondicionamiento químico, el tipo de banda, y la presión máxima aplicada al lodo (WEF, *et al.*, 2012).

La tasa de sólidos secos aplicada está dentro del rango de 150 a 300 kg m^{-1} h^{-1}. La máxima carga de sólidos es de 450 kg m^{-1} h^{-1}. El límite de carga recomendado varía por el fabricante y se debe tener en cuenta se realizan los cálculos del tamaño y la comparación de unidades.

12.4.3.4. Modelo y número de rodillos

Cada fabricante tiene diferentes modelos de filtros prensa con diferentes configuraciones de rodillos. Generalmente, los filtros prensa estan equipados con 7 o 8 rodillos (WEF, *et al*., 2012).

Después de la sección de drenado por gravedad, el lodo entra en la sección de baja presión, donde las bandas convergen y la presión se incrementa sobre el material drenado. Esta sección puede ser configurada para permitir que el líquido escape a través de ambas bandas.

En la siguiente sección de compresión, el lodo entra a la sección de deshidratación en donde cada vez hay una mayor presión, donde dos bandas pasan secuencialmente por encima de unos rodillos de menor diámetro. El diámetro de los rodillos y la tensión del sistema de bandas externo incrementan la presión cuando el líquido se separa del lodo, proporcionando una deshidratación y captura de sólidos eficiente.

12.4.3.5. Zona de alta presión

Diferentes fabricantes de filtros prensa proveen la opción para incrementar el número de rodillos, expandiendo la sección de presión de la prensa. Esta zona de alta presión puede estar equipada con el original y en algunos casos se en algunos casos se pueden agregar máquinas externas. El número de rodillos adicionales varía dependiendo del fabricante y de la aplicación. Los rodillos adicionales incrementan la presión aplicada sobre el lodo y el potencial de extrusión del lodo entre las bandas.

12.4.3.6. Sistema de acondicionamiento de lodos

El sistema de acondicionamiento de lodos debe contar con: bombas de medición de químicos, equipo de almacenamiento y mezclado de polímero, mezclador de polímero con el lodo y controles. Las instalaciones muy pequeñas, pueden tomar directamente el polímero de los tambores, lo que elimina la necesidad de tanques de mezclado y de bombas de alimentación. Las variables que más afectan en el desempeño y económica son: el tipo de polímero, el punto de inyección y la energía de mezclado (Mijaylova, 1999).

Las bombas de dosificación son generalmente de desplazamiento positivo (diafragma, émbolo giratorio o cavidad progresiva). Las transmisiones deberán proporcionar una salida variable. El equipo de mezclado puede variar dependiendo del polímero seleccionado (seco o líquido), viscosidad y características del lodo. Antes de la inyección para el acondicionamiento del lodo, los polímeros se mezclan para formar una solución diluida normalmente entre 0.25 y 0.5 por ciento por peso. Además, se recomienda disponer de agua limpia, conectada a la descarga del tanque de mezclado, para diluir aún más la solución de polímero (es decir, hasta 0.01 por ciento por peso) y lograr una dispersión completa del polímero en la corriente del lodo. Las especificaciones precisas las proporciona el fabricante del polímero.

12.4.3.7. Instalaciones para el manejo de lodo

El diseñador deberá considerar con cuidado el tipo de lodo que se va a deshidratar, los cambios concentración de sólidos en el lodo y la unidad

del proceso que produce los lodos. Los filtros prensa de banda funcionan mejor cuando las fluctuaciones en la concentración de sólidos en el lodo son mínimas. Se recomienda la extracción de los lodos desde el fondo de un recipiente mezclado o de un espesador con rastras, para que la concentración permanezca constante.

12.4.3.8. Bombas de alimentación de lodos

Estas son bombas de alimentación continua con gasto ajustable, normalmente de cavidad progresiva, utilizadas para alimentar el lodo al filtro prensa de banda. No se recomienda las bombas centrífugas debido a que pueden dañar la formación de flóculos. Ver capítulo cinco.

12.4.3.9. Suministro de agua de lavado

Se refiere a una fuente de agua de lavado limpia, para asegurar el lavado adecuado de la banda, especialmente cuando se está deshidratando lodo secundario, que tiende a tapar el medio. Esta fuente de agua, que asciende del 50 al 100 por ciento del gasto del lodo afluente al equipo, normalmente se presuriza a 700 KPa, a veces, se requiere una bomba adicional para incrementar la presión. El agua de lavado puede contener de 2 a 3 veces los sólidos contenidos en el filtrado. El agua de lavado puede ser potable, del efluente secundario de la plante de tratamiento pero se prefiere una fuente de agua limpia.

12.4.3.10. Tubería de alimentación de lodos

Se deben considerar las presiones, velocidades y el taponamiento. Al igual que otros sistemas de manejo de lodos, se pueden utilizar tuberías con recubrimientos lisos, incluyendo sistemas de acero dúctil o acero recubierto de vidrio. La velocidad debe mantenerse de 1 m s^{-1} o mayor, para evitar la sedimentación de sólidos y problemas de taponamiento. Se requieren conexiones para limpieza y vaciado de los lodos.

Se recomienda que los sistemas de tuberías tengan puertos múltiples para la inyección de polímeros de tal manera que se puedan elegir diferentes tiempos de retención, igualmente, establecer puntos de adición a intervalos de 0.5 a 1 minuto a lo largo del sistema de tuberías, hasta un máximo de 5 minutos, con base en la relación del volumen de la tubería y de la capacidad de descarga de la bomba.

12.4.3.11. Molienda

Las unidades de molienda o trituración reducen el tamaño de los sólidos que entran a la banda y evitan la entrada de piezas que pueden desgarrar la tela de la banda, además forman una torta con mayor concentración de sólidos. El equipo de molienda debe localizarse en la succión de la bomba de alimentación a la banda, aunque otros equipos de molienda estén instalados en distintas partes de la planta (Mijaylova, 1999).

12.4.3.12. Disposición de equipos en la planta

Entre las consideraciones de diseño se incluyen las siguientes recomendaciones: (Mijaylova, 1999):

- No montar los tableros de control sobre el marco del filtro, debido a que existe la posibilidad de contaminarse durante la

operación de lavado. El tablero de control deberá estar localizado de tal forma que pueda observarse desde donde está situado el filtro, especialmente desde la sección de mayor presión

- Considerar las construcciones NEMA 4X para el tablero de control, para proteger los componentes del ambiente de operación húmedo y corrosivo
- Proporcionar sardineles alrededor del filtro prensa de bandas, para proteger el área circundante contra derrames
- Proporcionar pendientes y canales de drenaje sobre diseñados alrededor del filtro prensa de bandas para facilitar la limpieza. También se requieren numerosas salidas y ganchos para mangueras
- Montar el filtro prensa de bandas de tal manera que el operador tenga acceso para ubicar todos los baleros
- Instalar el filtro prensa de bandas con suficiente espacio libre entre las unidades, para permitir la remoción de los rodillos individuales
- Proporcionar plataformas de operación para que el operador pueda observar la parte de gravedad de la prensa de banda.
- Proporcionar una grúa viajera para manejar el rodillo más grande de la prensa de banda
- Proporcionar andadores antiderrapantes, recubrimiento superficial o ambos debido a que la mezcla de lodo y polímero es resbalosa

12.4.3.13. Transporte de la torta

La configuración específica del filtro prensa, el sitio de disposición y la diferencia en elevación o altura deberán ser consideradas al seleccionar el equipo requerido para remover la torta de lodo en el punto de descarga del filtro prensa de bandas. Los sistemas de transporte típicos incluyen bandas, tornillos y bombas, capítulo 5.

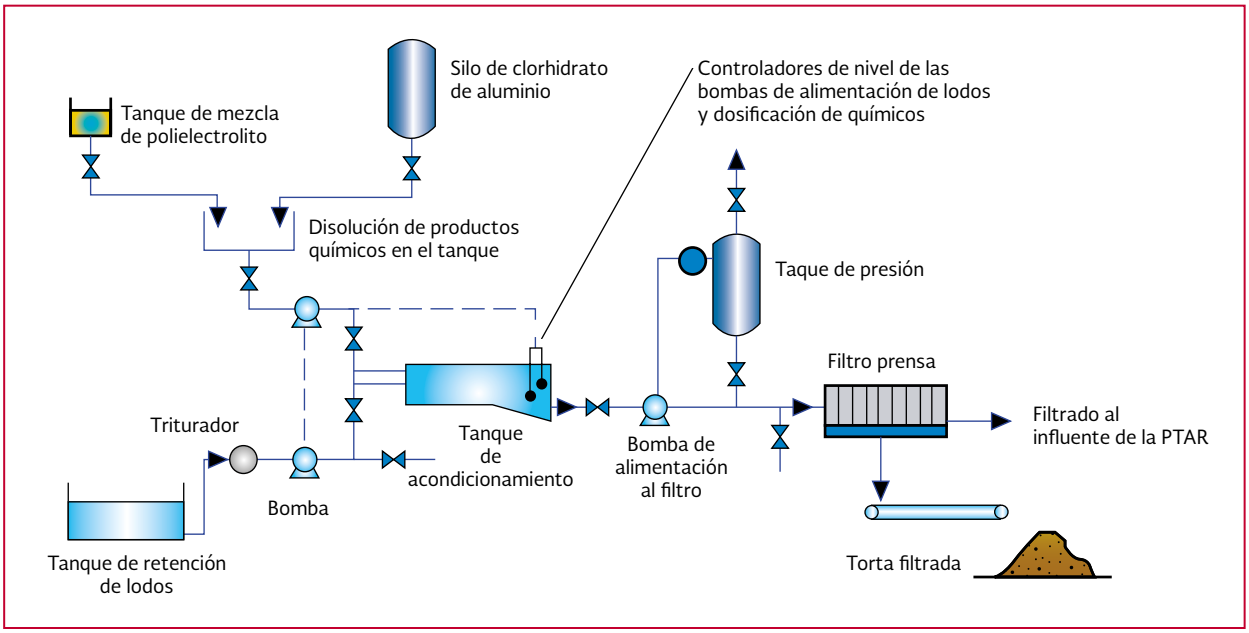
12.4.4. Filtros prensa de placas

Los criterios de desempeño y las condiciones de diseño del proceso, son críticas para la selección de los filtros prensa de placas. Los conceptos que se consideran en el diseño incluyen: La presión de operación, el número de platos, la forma y tipo de sistema de alimentación, la disposición y el acceso, el tipo de prensa, las características mecánicas y la seguridad (WEF, *et al*., 2012).

Como ya se ha mencionado, existen filtros prensa de placas de volumen fijo y/o variable. Ambos tipos pueden ser confiables cuando tienen una apropiada operación y mantenimiento. La principal dificultad encontrada en la operación de los filtros prensa instalados, es la separación de la torta de los medios filtrantes. Este problema puede indicar la necesidad de lavar el medio filtrante o incrementar la dosis de químicos para el acondicionamiento del lodo.

Los principales componentes mecánicos de los filtros prensa de placas incluyen: la estructura del bastidor, el filtro prensa de placas, diafragmas, la tela fiñtrante, los platos de repuesto. Se utilizan equipos periféricos y de control en el sistema de alimentación, en el sistema de presión, en el sistema de lavado,en la remoción de la torta, en el acondicionamiento químico,en el ciclo de operación, en la disposición final. También se deben considerar vías de acceso y seguridad. Varias opciones son posibles para cada componente. (WEF, *et al*., 2012).

Ilustración 12.37 Esquema de un sistema de acondicionado en línea de un filtro prensa de placas, (US, EPA, 1979)



12.4.4.1. Proceso del acondicionamiento de lodos

La mayoría de los sistemas están diseñados de manera que el cloruro férrico y la cal se añaden en tandas a los lodos contenidos en un tanque agitado, y el lodo acondicionado se bombea desde el depósito hacia el filtro cuando sea necesario. Sin embargo, la experiencia indica que la agitación prolongada y el tiempo de almacenamiento del lodo acondicionado, puede dar lugar a una variación en las características del lodo e interferir con el proceso de deshidratación. Por esta razón, los procesos de acondicionamiento están con frecuencia diseñados para proporcionar un acondicionamiento en línea. Esto se puede lograr ya sea por un bombeo continuo de lodos en un pequeño tanque y la adición de productos químicos, o la inyección directa de productos químicos por medio de mezcladores en línea, acondicionado el lodo en su camino hacia el filtro. El acondicionamiento en línea elimina los problemas de almacenamiento y de agitación prolongada. La Ilustración 12.37 se muestra un esquema para el acondicionamiento en línea (US, EPA, 1979).

12.4.4.2. Sistema de bombeo para la alimentación

Un gran problema con los filtros de presión ha sido la necesidad de diseñar un sistema para bombear de 1.9 a 12.6 L s^{-1} de una suspensión viscosa y abrasiva a una presión de 276 a 1 551 kN m^{-2} (US, EPA, 1985).

Idealmente, el sistema de alimentación debe inyectar lodo acondicionado en la cámara tan rápidamente como sea posible, pero lo suficientemente lento como para permitir la formación de una torta uniforme y gruesa para evitar cualquier incursión de partículas de lodo en la tela del filtro. El desequilibrio entre la alimentación de los lodos y las tasas de formación de la torta pueden dar como resultado una alta resistencia en la torta, o en tela filtrante y/o una mala calidad de filtrado. Si se forma una torta no uni-

forme o muy fina, se puede tener un ciclo de filtrado muy largo o habrá un taponamiento de la tela de filtrado (US, EPA, 1979). El método de alimentación usado en los filtros prensa de placa son una combinación de bombas y recipientes a presión. Esta combinación se usa para obtener una alta velocidad de alimentación de aproximadamente 12.6 L s^{-1} a través del recipiente de presión, seguido por el uso de bombas pistón de alta presión alternando para bombear a una presión de 1551 kN m^{-2} a velocidades de alimentación de 6.3 a 12.6 L s^{-1}. En algunos casos se usa una combinación de bombas de cavidad progresiva y recipientes a presión.

12.4.4.3. Lavado y limpieza de la tela filtrante

Debido a que el filtro prensa de placas operan a altas presiones y porque muchas unidades utilizan cal para acondicionamiento, el diseñador debe asumir que los paños requerirán rutina de lavado con agua a alta presión, así como un lavado periódico con ácido. Las prácticas varían de acuerdo con el lodo en particular y del proceso patentado. Los diseñadores deben pedir a los proveedores de los equipos las recomendaciones para frecuencias de lavado. (US, EPA, 1979).

12.4.5. Secado solar de lodos

Factores que influyen en el secado

Los principales factores que afectan el proceso de secado son:

- Temperatura del aire
- Humedad relativa del aire
- Velocidad del aire

Temperatura del aire

A medida que se aumenta el valor de este factor se incrementa la eliminación de la humedad del lodo dentro de los límites posibles.

Durante el proceso de secado se origina un gradiente de temperatura a lo largo del espesor del material el cual tiende a disminuir a medida que se reduce el contenido de humedad.

Humedad relativa del aire

Definida como la razón entre la presión de vapor de agua presente en ese momento y la presión de saturación del vapor de agua a la misma temperatura (Perry & Chilton , 1982).

La capacidad de absorción de humedad del aire es directamente proporcional a su temperatura. El aire se satura cuando es incapaz de absorber humedad adicional.

Velocidad del aire

La velocidad del aire es un factor importante ya que transmite la energía requerida para calentar el agua contenida en el material y evaporarla. Adicionalmente, se encarga de transportar la humedad saliente del material.

La tasa de evaporación es directamente proporcional a la velocidad del aire. Sin embargo, las ventajas de las velocidades altas del aire dismi-

nuyen cuanto mayor es el espesor del material a secar y menor el contenido de humedad inicial.

Algunos parámetros que intervienen en el proceso son:

Humedad en base seca

Indica el contenido de humedad de un material. Kilogramo de agua/kilogramo de sólido seco

Humedad en base húmeda

Expresa la humedad de un sólido mojado. Kilogramo de agua/kilogramo de sólido húmedo

Humedad de Equilibrio

Es la mínima humedad que puede tener un sólido que está en contacto con aire húmedo

Humedad Libre

Es aquella que resulta de la diferencia entre la humedad total y la humedad de equilibrio, y corresponde a la cantidad de líquido removible a una temperatura y humedad determinadas

Humedad Crítica

Se presenta cuando el movimiento del líquido en la superficie del sólido a secarse es insuficiente para reemplazar el líquido que se está evaporando

Temperatura de bulbo seco

La temperatura de bulbo seco corresponde a la temperatura ambiente, es decir la temperatura del aire. Se la puede medir con un termómetro de mercurio

Temperatura de bulbo húmedo

Es la temperatura de equilibrio dinámi co obtenida por una superficie de agua cuando la velocidad de transferencia de calor es igual a la transferencia de masa que se aleja de la superficie (Perry & Chilton , 1982)

Entalpía

Llamada también contenido de calor. En un sistema termodinámico, es la cantidad de energía que éste puede intercambiar con su entorno

12.5. Ejemplos de diseño

12.5.1. Ejemplo de diseño de un filtro prensa de bandas

Diseñar un filtro prensa de bandas para deshidratar el lodo espesado que produce una PTAR. Calcular el número y tamaño de los filtros, la cantidad de lodo a la salida del filtro (torta de lodo) y determinar las horas diarias de operación requeridas si se producen cargas de sólidos pico durante tres días. El diseño se realizará tomando en cuenta los siguientes datos: (Metcalf & Eddy, 2003).

Tabla 12.10 Datos para el ejemplo del diseño de un filtro prensa de bandas, (Metcalf & Eddy, 2003)

Datos	Cantidad
Caudal, L d^{-1}	72 000
Contenido de sólidos en el lodo alimentado, por ciento	3
Tiempo de operación, h d^{-1}	8
Días a la semana, d	5
Carga, kg h^{-1} por metro de ancho de banda	275
Sólidos totales en el lodo deshidratado, por ciento	25
SST en el filtrado, mg L^{-1}	900
SST en el filtrado, por ciento	0.09
Flujo de agua de lavado, L min^{-1} por metro de ancho de banda	90
Gravedad específica de lodo alimentado	1.02
Gravedad específica de la torta deshidratada	1.07
Gravedad específica del filtrado	1.01

Solución.

1. El primer paso, calcula el promedio semanal del lodo producido, de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$Biosolidos\ humedos = (Q)(7\ dias\ por\ semana)(1\,000\,g\ L^{-1})(0.001)(\rho) = kg\ por\ semana$$

Ecuación 12.15

donde:

Q = Caudal de lodo para deshidratar, L d^{-1}

7 = Es por los 7 días que tiene una semana, d $semana^{-1}$

1 000 = Es la densidad del agua, g L^{-1}

0.001 = Factor de conversión

p = Gravedad específica del lodo alimentado

$$Biosolidos\ humedos = (72\,000\ L\ \ d^{-1})(7d\ \ semana^{-1})(1\,000g\ L^{-1})(0.001)(1.02) = 514\ 080\ kg\ por\ semana$$

Ecuación 12.16

$$Biosolidos\ secos = (Biosolidos\ humedos) \times (contenido\ de\ solidos\ en\ el\ lodo) = (514\ 080 \times 0.03) = 15\ 422.4\ kg\ por\ semana$$

Ecuación 12.17

2. Segundo paso, se calcula la cantidad lodos secos procesados por día y hora.

$$tasa\ diaria = \left(\frac{15\ 422\ kg\ por\ semana}{5\ días\ por\ semana} = 3\ 084\ kg\ \ d^{-1}, operando\ 5\ días\ a\ la\ semana \right)$$

Ecuación 12.18

$$tasa\ por\ hora = (3\ 084/8) = 385.5\ kg\ \ h^{-1}, operando\ 8\ horas\ al\ dia$$

Ecuación 12.19

3. Tercer paso, se calcula el tamaño del filtro prensa de bandas, en términos del ancho de banda.

$$ancho\ de\ la\ banda = \left(\frac{tasa\ por\ hora}{carga\ por\ metro\ de\ ancho\ de\ banda} \right) = \frac{(385.5\ kg\ \ h^{-1})}{(275\ kg\ \ m^{-1}\ \ h^{-1})} = 1.40\ m$$

Ecuación 12.20

De acuerdo al resultado del ancho de banda obtenido, se debe usar un filtro prensa de bandas de 1.5 m y tener uno del mismo tamaño en almacén o ya instalado disponible para su utilización.

4. Cuarto paso, se calcula la velocidad de flujo del filtrado por medio del desarrollo del balance de masas y el balanceo de las ecuaciones de flujo.

Desarrollo del balance diario de los sólidos.

$$Solidos\ en\ el\ lodo\ alimentado = solidos\ en\ la\ torta\ del\ lodo + solidos\ en\ el\ filtrado$$

Ecuación 12.20

$$3\ 084\ kg\ \ d^{-1} = (Q_T)(1.07)(0.25) + (Q_F)(1.01) \times (0.0009)$$

Ecuación 12.21

dónde:

Q_T = Flujo de sólidos en la torta, L d^{-1}. (lodo deshidratado)

Q_F = Flujo del filtrado, L d^{-1}.

1.07 = Gravedad específica de la torta des hidratada

0.25 = ST en el lodo deshidratado, fracción (25/100)

1.01 = Gravedad específica del filtrado

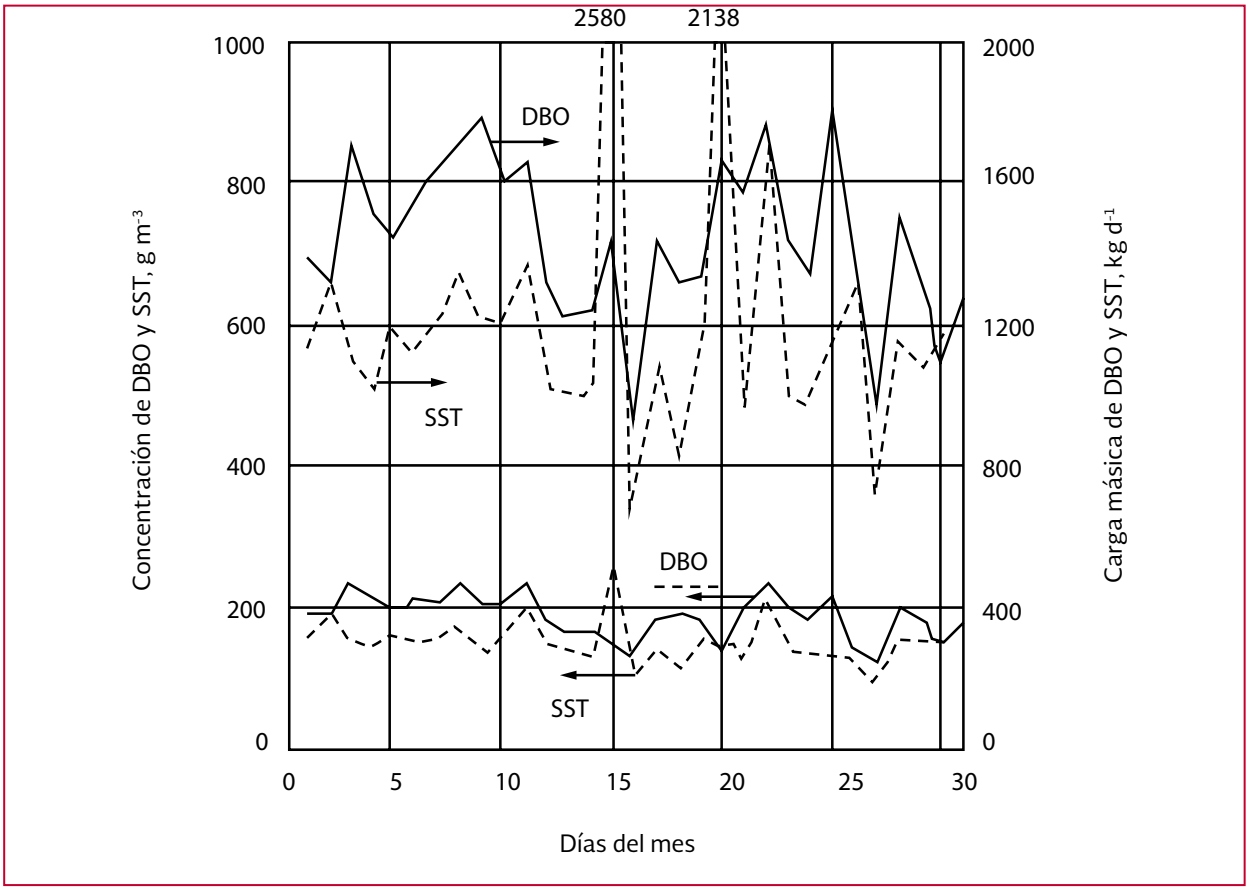
0.0009 = ST en el filtrado, fracción (0.09/100)

$$3\ 084 = (0.2675\,Q_T) + (0.00091\,Q_F)$$

Ecuación 12.22

Desarrollo de las ecuaciones de flujo.

Ilustración 12.38 Ejemplo de la variación de la concentración y carga másica de la DBO y SST durante un mes, (Metcalf & Eddy, 2003)



$$Flujo\ de\ lodo\ alimentado(Q_L) + flujo\ de\ lavado(Q_{Lav}) = flujo\ de\ filtrado(Q_F) + flujo\ de\ la\ torta(Q_T)$$

Ecuación 12.23

$$Q_L = Flujo\ diario\ del\ lodo = (72\ 000\ L\ \ d^{-1})\left(\frac{7\ dias\ que\ tiene\ la\ semana}{5\ dias\ que\ se\ opera}\right) = 100\ 8000\ L\ \ d^{-1}$$

Ecuación 12.24

$$Q_{Lav} = Flujo\ de\ lavado = \left(\frac{Q}{m}\right)(ancho\ de\ banda)(60)(horas\ operadas\ por\ dia) = L\ \ d^{-1}$$

Ecuación 12.25

donde:

Q/m = Flujo de agua de lavado, L min^{-1} por metro de ancho de banda (Flujo específico de agua de lavado)

60 = Factor de conversión de minutos a horas

$$Q_{Lav} = Flujo\ de\ lavado = (90\ L\ \ min^{-1}\ \ m^{-1})(1.5\ m)(60\ min\ \ h^{-1})(8\ h\ \ d^{-1}) = 64\ 800\ L\ \ d^{-1}$$

Ecuación 12.26

Sustituyendo los valores calculados en la Ecuación 12.24, se tiene:

$$100\ 800 + 64\ 800 = 165\ 600 = Q_F + Q_T$$

Ecuación 12.27

Del balance de sólidos y flujo, se obtiene la Ecuación 12.29 y la Ecuación 12.30. Resolviendo estas dos ecuaciones se obtiene el valor de QF que es el flujo del filtrado y QT que es el flujo de lodo deshidratado.

$$3\ 084 = (0.2675\, Q_T) + (0.00091\, Q_F)$$

Ecuación 12.28

$$100\ 800 + 64\ 800 = 165\ 600 = Q_F + Q_T$$

$$Q_F = 154\ 600\ L\ \ d^{-1}$$

$$Q_T = 11\ 000\ L\ \ d^{-1}$$

Ecuación 12.29

5. Una vez realizado el balance de sólidos y flujo se determina la captura de sólidos.

$$Captura\ de\ sólidos = \frac{Sólidos\ en\ la\ alimentación - Sólidos\ en\ el\ filtrado}{Sólidos\ en\ la\ alimentacion} \times 100\%$$

Ecuación 12.30

Para determinar la captura de sólidos es necesario determinar los sólidos en el filtrado lo cual se realiza con la siguiente ecuación.

$$Masa\ de\ Solidos\ en\ el\ filtrado = (Q_F)(Fraccion\ SST\ en\ el\ filtrado)(1000)(0.001)(\rho\ filtrado) = kg\ \ d^{-1}$$

Ecuación 12.31

donde:

Q_F = Flujo del filtrado, L d^{-1}

Sólidos en el filtrado, en fracción

1 000 = Es la densidad del agua, g L^{-1}

0.001 = Factor de conversión

ρ = Gravedad específica del filtrado

$$Masa\ de\ Solidos\ en\ el\ filtrado = (154\ 600\ L\ \ d^{-1})(0.0009)(1000)(1.01)(0.001) = 140.53\ kg\ \ d^{-1}$$

Ecuación 12.32

Sustituyendo los valores en la Ecuación 12.31 tenemos:

$$Captura\ de\ solidos = \frac{(3\ 084\ k\ \ d^{-1}) - (140.53\ kg\ \ d^{-1})}{(3\ 084\ k\ \ d^{-1})} \times 100\% = 95.4\%$$

Ecuación 12.33

6. Determinar los requisitos de funcionamiento de los biosólidos para una carga pico.

Primero se determina la carga pico para 3 días.

De la Ilustración 12.38, se tomó que la relación pico promedio de la carga másica durante tres días consecutivos es dos.

Por lo tanto:

$$Carga\ pico = (Caudal\ de\ lodos\ tratados) \times (2) = 72\ 000\ L\ \ d^{-1} \times 2 = 144\ 000\ L\ \ d^{-1}$$

Ecuación 12.34

Posteriormente se determina el tiempo de operación diario requerido para la carga pico

$$Tiempo\ de\ operacion = \frac{(Solidos\ secos\ por\ dia)}{(carga, kg\ \ h^{-1} por\ metro\ de\ ancho\ de\ banda)(ancho\ de\ banda\ calculado)}$$

Ecuación 12.35

Con la Ecuación 12.37 se determinan los sólidos secos por día.

$$Solidos\ secos\ por\ dia = (carga\ pico)(\rho_{lodo\ alimentado})(fraccion\ de\ solidos\ contenida\ en\ lodo) = 144\ 000\ L\ \ d^{-1}(1.02)(0.03) = 4\ 406\ kg\ \ d^{-1}$$

Ecuación 12.36

Sustituyendo los valores calculados en la Ecuación 12.38, se tiene:

$$Tiempo\ de\ operacion = \frac{(4\ 406\ kg\ \ d^{-1})}{(275\ kg\ \ m^{-1}\ \ h^{-1})(1.5)} = 10.7\ h$$

Ecuación 12.37

El filtro prensa de bandas debe operar 10.7 horas por día, lo cual se puede realizar en un jornada de trabajo, o por turnos. Se debe de contemplar el tiempo requerido para la limpieza de las bandas.

En la deshidratación de lodos es importante definir la cantidad de lodo que se debe almacenar, para programar la operación del sistema de deshidrtación contemplando la disponibilidad de mano de obra y así realizar las actividades de manera más eficiente. Es conveniente programar las operaciones de deshidratación durante el turno de día, si el lodo tiene que ser transportado fuera de la planta.

12.5.2. Estudio piloto de secado solar

En el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua se realizó un proyecto para el estudio de secado de lodos municipales. Se utilizó un lodo estabilizado y deshidratado en filtro de bandas.

En la Ilustración 12.24 se muestra el estudio que se realizó utilizando dos módulos de secado.

- Modelo de secado solar en invernadero
- Modelo de secado solar con cubierta

En la Tabla 12.11 se muestran los parámetros que se monitorearon durante los experimentos.

En la Ilustración 12.39 se muestra como para tener un monitoreo continuo de las condiciones ambientales se instalaron dos estaciones meteorológicas para una medición continua de los siguientes parámetros: temperatura ambiente, radiación solar y velocidad del viento.

En la Tabla 12.12 se muestran los principales resultados obtenidos durante 40 días de experimentación.

De acuerdo a los resultados se puede concluir lo siguiente:

La primera etapa del experimento se realizó en época de lluvia y con menores temperaturas y mayor porcentaje de humedad ambiente de 71 y 76 por ciento respectivamente. La etapa 2 se trabajó durante los meses en que hubo menor humedad en el ambiente de 34 y 30 por ciento respectivamente. La velocidad del aire también fue mayor en la segunda etapa de secado.

Secado de lodo

Existe diferencia entre los resultados obtenidos en la primera etapa experimental y en la segunda. Se observa que en época de calor se obtienen mejores resultados tanto en la velocidad de secado como en el volumen de lodo final obtenido, lográndose reducción de 93.33 y 90 por ciento para los modelos secado solar con cubierta 2 y secado solar en invernadero 2 respectivamente, en comparación con lo conseguido en la primera fase de los mismos experimentos que fue de 66.67 por ciento para el secado solar con cubier-

Tabla 12.11 Parámetros monitoreados en los experimentos de secado solar, (Valencia, 2008)

Parámetro	Punto de Muestra	Periodicidad	Método
Sólidos totales	Muestra Compuesta	Diaria*	Método estándar
Temperatura Ambiente	Local	Diaria*	Estación Meteorológica
Radiación Solar (promedio 24h)	Bajo cada estructura	Diaria*	Estación Meteorológica
Velocidad del viento	Local	Diaria*	Estación Meteorológica
Coliformes Fecales	Muestra Compuesta	Diaria*	Procedimientos de la Norma Oficial Mexicana **
Salmonella	-----	Al inicio y final del periodo	
Huevos de Helmintos	Muestra Compuesta	2 veces por semana	

Ilustración 12.39 Instrumentos de Medición de la Estación Meteorológica Automática: (a) sensor de temperatura; (b) sensor de radiación solar; (c) sensor de dirección y velocidad del viento, (Valencia, 2008)

Tabla 12.12 Resultados obtenidos durante los experimentos de secado solar, (Valencia, 2008)

Parámetro Modelo	Secador solar con cubierta 1	Secado solar invernadero I	Secador solar con cubierta 2	Secado solar invernadero 2
Tiempo de Experimentación [días]	40	40	41	41
Temperatura Ambiente Promedio [°C]	19.74	23.14	22.98	27.21
Humedad Ambiente Promedio [por ciento]	71.23	66.04	34.04	30.49
Velocidad del Viento Promedio [m s^{-1}]	0.34	--	1.87	--
Radiación Solar Promedio [W m^{-2}]	66.05	149.69	85.47	160.59
Concentración de Sólidos Inicial [por ciento]	13.76	13.76	10.90	10.90
Concentración de Sólidos Final [por ciento]	52.70	48.50	89.10	88.10
Coliformes Fecales Inicial [NMP/$g_{(ST)}$] Log [NMP/$g_{(ST)}$]	3.9×10^6 6.6	3.9×10^6 6.6	1.4×10^7 7.1	1.4×10^7 7.1
Coliformes Fecales Final [NMP/$g_{(ST)}$] Log [NMP/$g_{(ST)}$]	2.3×10^3 3.4	2.1×10^4 4.3	9.3×10^4 5.0	4.3×10^5 5.6
Huevos de Helmintos Inicial [HH/2g(ST)]	1	1	1	1
Huevos de Helmintos Final [HH/2g(ST)]	0	0	0	0
Salmonella	ND	ND	ND	ND
Velocidad de Secado [kgH_2O/m_2/d]	1.08	0.93	3.89	3.13
Volumen Inicial de Lodo [m^3]	0.30	0.30	0.30	0.30
Volumen Final de Lodo [m^3]	0.10	0.18	0.02	0.03

ta 1 y de 40 por ciento para el secado solar con invernadero 1.

Velocidad de secado

El modelo de secado solar con cubierta alcanzó una velocidad de secado 1.08 kg H_2O m^{-2} d^{-1} y 3.89 kg H_2O m^{-2} d^{-1} en la primera y segunda etapa respectivamente; mientras que el modelo secado en invernadero registra velocidades de 0.93 kg H_2O m^{-2} d^{-1} y 3.13 kg H_2O m^{-2} d^{-1} respectivamente, logrando así el modelo con cubierta un reducción de volumen en menor tiempo que el secado en invernadero.

Reducción de volumen de lodo

La reducción de volumen de lodo obtenida en la segunda etapa experimental es mayor que en la primera etapa, obteniéndose valores de 0.02 m^3 y 0.03 m^3 de lodo residual en el modelo de secado solar con cubierta y en el modelo de secado solar con invernadero, respectivamente. Esta reducción de volumen está directamente relacionada con las condiciones ambientales (temperatura, humedad ambiente y velocidad del viento).

Radiación solar

El modelo de secado en invernadero, permite una mayor incidencia de la radiación solar sobre el lodo: 149.69 W m^{-2} y 160 W m^{-2} promedio 24 horas en cada una de las etapas experimentales respectivamente; y se consigue una mayor temperatura promedio, que en el modelo de secado con cubierta: 23.1 °C y 27.21 °C en cada una de las fases respectivamente, frente a 19.74 °C y 22.98 °C del modelo con cubierta; pese a esto, no se consigue mejorar la velocidad de secado obtenida en el modelo con cubierta debido a la nula velocidad del aire registrada.

Para obtener mejores resultados en la velocidad de secado en el invernadero es necesario mejorar el diseño del mismo que puede ser de 2 formas:

- Aumentando la ventilación natural dentro del mismo, lo cual se logra con una mayor área para la entrada del aire exterior
- Colocar un extractor dentro del invernadero para propiciar la entrada de aire seco y la salida del aire húmedo del mismo

Volteo

La acción de realizar el volteo diario del lodo, cumple un papel fundamental en el proceso de granulado y secado homogéneo del material, ya que mediante esta acción se trasladan diariamente las capas inferiores del lecho (el cual contiene mayor humedad) a la superficie, logrando evaporar el agua en forma continua y en todo el espesor del material, e impidiendo que se forme una costra como ocurre en los lechos de secado tradicionales.

Se recomienda que el lodo se seque hasta una concentración de sólidos totales entre 70 y 80 por ciento, con el fin de dejar una humedad residual que impida que el grano se rompa y se formen partículas de polvo.

Microorganismos patógenos

La reducción de coliformes fecales es parcial durante el proceso de secado de lodos. La tem-

peratura no se eleva durante el proceso y no se alcanza el rango termofílico, que permitiría la inactivación total de estos microorganismos.

Durante el experimento hubo una reducción de 3.2; 2.3; 2.1 y 1.5 log (NMP g^{-1}) respectivamente. Esta reducción no es suficiente para que el lodo sea considerado como clase A, de acuerdo a la (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002).

Para que el lodo durante el proceso de secado alcance mayor reducción de microorganismos patógenos, se debe implementar una etapa termofílica o una estabilización alcalina con adición de hidróxido de calcio u óxido de calcio, para obtener la remoción de patógenos que se requiere para obtener un lodo tipo A o tipo B.

Durante este experimento no se pudo observar el efecto del secado solar sobre la remoción de huevos de helminto debido a que en el lodo residual deshidratado solo se detectó 1 HH $2g^{-1}$ (ST), tampoco se detectó la presencia de Salmonella en estos lodos.

Dimensionamiento de un sistema de secado de lodo con ventilación natural

Dimensionar un sistema de secado solar para deshidratar 21.8 m^3 d^{-1} de lodo residual para una jornada de trabajo de seis días a la semana. Cada celda de secado tendrá capacidad para tratar el lodo de 5 días.

Cantidad de lodo deshidratado por día

$$21.8\ m^3\ d^{-1}$$

Jornada de trabajo de 6 días a la semana

$$21.8\ m^3\ d^{-1} \times 24\ d\ mes^{-1} = 523.2\ m^3\ mes^{-1}$$

El lodo se llevará del sistema de deshidratación a la celda de secado. Cada celda tendrá capacidad para tratar el lodo de 5 días

Considerando que el tiempo de secado es de 1 mes se requerirán de 5 celdas.

Dimensiones de la celda

V lodo = 21.8 × 5 días = 109 m^3 en 5 días
Largo de la celda = 62 m
Ancho de la celda = 12
Altura de la cama de lodo = 109/ 12 × 62= 0.15 m

Se requieren 5 celdas de estas dimensiones para realizar el secado de lodo entre 1 y 1.5 meses.

Las celdas pueden generar lixiviado por lo cual cada celda debe tener una pendiente de 0.5 por ciento para recolectar el agua y llevarla hasta el inicio de la planta de tratamiento de agua. Este lixiviado solo se generará por mala operación del proceso.

Cada celda debe llevar un bordo de por lo menos 0.8 a 1.0 m, para delimitar el área de secado y protegerla de la lluvia

Las celdas de secado deberán cubrirse con un techo de material que permita el paso de la luz solar, deberá contar con un sección adicional para proteger al material de la lluvia.

Ilustración 12.40 Cargador frontal con diferentes dispositivos que pueden utilizarse para el mezclado de lodo

Se requiere de dos cargadores frontales para extender, mover el lodo y trasladar el lodo cada semana de una celda de secado a otra. Estos movimientos permiten o aceleran el secado del material y se obtiene un lodo parcialmente granulado en menor tiempo. En la Ilustración 12.40 se presentan diferentes dispositivos que se podrían utilizar para mover el lodo.

El área requerida para el sistema de secado de lodos.

Largo = 62 m
Ancho = 12 m
Area = 12 x 60 x 5 = 3 600 m^2

12.5.2.1. Conclusiones

El proceso de secado solar de lodos residuales con los diferentes modelos planteados, constituye una opción a implementarse en regiones donde las características climáticas sean similares a las observadas en este trabajo.

La principal desventaja de este proceso es que el lodo debe estar estabilizado cumplir con lo establecido en la (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002) ya que el proceso de secado detiene todos los procesos que estabilizan el lodo. El proceso tiene baja eficiencia en la remoción de microorganismos patógenos especialmente de coliformes fecales.

Se requiere realizar más estudios e investigaciones para mejorar la eficiencia del proceso en la remoción de microorganismos patógenos.

12.5.3. Ejemplo de diseño de una centrífuga de tazón sólido o de tornillo

Diseñar una centrífuga para una planta que trata un caudal de 0.088 $m^3\ s^{-1}$ de agua residual y la cual debe deshidratar un caudal de 39.3 $m^3\ d^{-1}$ de lodo, que tiene 1 190 kg d^{-1} de sólidos en el lodo con una concentración de sólidos del 3 por ciento (US, EPA, 1985).

Determinar el tamaño y número de centrífugas

En base a la Tabla 12.13 para una planta que tiene que deshidratar un flujo de lodo de 40 m^3 d^{-1} el número el número de centrífugas es 2, 1 para servicio y 1 de repuesto, con un tiempo de operación de 7 horas. Esto es asumiendo que la centrífuga opere 7 h por día durante 7 días a la semana.

Tabla 12.13 Capacidad sugerida y número de centrífugas. (Von sperling & Augusto de Lemos Chernicharo, 2005)

Flujo del lodos, m^3 d^{-1}	Operación h d^{-1}	Número de unidades		m^3 h^{-1}
		En operación	En espera	
40	7	1	1	6
80	7	1	1	12
350	15	2	1	12
800	22	2	1	18
1 600	22	3	2	25
4 000	22	4	2	45

El tiempo de operación es tomado de la tabla. Sin embargo, también hay una fórmula para determinar el tiempo de operación, la cual se presenta a continuación:

$$Tiempo\ de\ operación\ (h\ d^{-1}) = \frac{al\ flujo\ promedio\ del\ lodo\ afluente\ (\ m^3\ d^{-1})}{(No.de\ unidades)\ (capacidad\ de\ la\ unidad\ (m^3\ h^{-1}))}$$
$$= \frac{(40 m^3\ d^{-1})}{(1 \times 6 m^3\ h^{-1})} = 6.66\ h\ d^{-1}$$

Ecuación 12.38

Comentarios

En el caso de que la producción de lodo para deshidratar sea continua, debe considerarse un tanque de acumulación de lodo con capacidad para almacenar el lodo durante el tiempo que no se opera la centrífuga.

Para un flujo específico de lodo, el tamaño requerido de la centrífuga (diámetro y longitud) varía de proveedor a proveedor. Las centrífugas de velocidad baja comparadas con las de alta velocidad de similar capacidad deben tener un diámetro grande.

El diseño típico de una instalación de deshidratación por medio de centrífugas, seleccionará el número de unidades y especificará el rendimiento que debe alcanzarse. Generalmente, el ingeniero de diseño no selecciona el modelo y el tamaño requerido de la centrífuga, a menos que, se hayan realizado pruebas con diferentes modelos de centrífugas.

12.5.4. Ejemplo de diseño de un lecho de secado

Diseñar un sistema de lechos de secado, usando el criterio de la tasa de carga. El periodo de secado ha sido estimado en 15 días, basado en el desempeño de un lecho de secado existente. El lodo seco se retira 5 días después. La carga de lodo es de 1 500 kg SS d^{-1} con un flujo de 40 m^3 d^{-1} (Von & Chernicharo, 2005).

Solución:

1. El primer paso es determinar el tiempo del ciclo de operación para el lecho de secado.
   En base a la siguiente ecuación se determina el tiempo del ciclo.

$$T = T_d + T_c$$

Ecuación 12.39

   Donde:
   T_d = Tiempo de secado, días
   T_c = Tiempo de limpieza, días

$$T = 15 + 5 = 20\,dias$$

Ecuación 12.40

2. El segundo paso es determinar el volumen de lodo deshidratado por ciclo, en base a la Ecuación 12.43

$$V_L = Q_L \times T = m^3 \;\; ciclo$$

Ecuación 12.41

   Donde:
   V_L = Volumen de lodo deshidratado por ciclo, m^3
   Q_L = Flujo de lodo, m^3 d^{-1}

$$V_L = 40\,m^3 \;\; d^{-1} \times 20\,dias = 800\,m^3 \;\; ciclo$$

Ecuación 12.42

3. El tercer paso es determinar el área del lecho de secado, en base a la Ecuación 12.45.

$$A = \frac{(M_L \times T)}{Carga}$$

Ecuación 12.43

   donde:
   A = Área del lecho de secado, m^2
   M_L = Masa del lodo alimentada al lecho, kg SS d^{-1}
   Carga = Es la tasa de carga asociada al lecho de secado, kg ST m^{-2}.
   Para este ejemplo se considera una carga de 15 kg de ST m^{-2}, el cual esta dentro del rango especificado en el punto 12.4.1.6 y el cual también es considerado en otras referencias (Von & Chernicharo, 2005).
   Sustituyendo los valores en la ecuación tenemos:

$$A = \frac{(1\,500\,kg \;\; d^{-1} \times 20\,dias)}{15\,kg \;\; m^2} = 2\,200\,m^2$$

Ecuación 12.44

4. Las dimensiones de las celdas del lecho de secado son:
   Un total de 22 celdas (mayor que el tiempo de ciclo de 20 días) con un área de 100 m^2 cada una. Cada celda será de 10 m de ancho por 10 m de longitud. Cada celda manejará el lodo de un día.
5. Para determinar la altura de la capa de lodo se puede utilizar la siguiente formula:

$$H_s = \frac{V_s}{A} = \frac{(800\,m^3 \;\; ciclo)}{2\,200\,m^2 por\; ciclo} = 0.36\,m$$

Ecuación 12.45

En base a los resultados obtenidos se obtiene que para tratar un caudal de lodo de 40 $m^3\ d^{-1}$ se necesita un lecho de secado con un área de 2 200 m^2 la cual tendrá 22 celdas de 100 m^2 cada una y la altura de la capa de lodo es de 0.36 metros.

12.5.5. Ejemplo de diseño de un sistema de acondicionamiento y deshidratación de lodos con filtro de bandas o centrífuga

Diseñar un sistema de deshidratación para un lodo residual que tiene un flujo de 89.1 $m^3\ d^{-1}$. Tiene una concentración de 3.5 por ciento de sólidos totales y una densidad de 1.02 t m^{-3}. El sistema de deshidratación operará 6 días a la semana, en un turno de 8 horas. Considerar las dos opciones: filtro de bandas y centrífuga.

Datos del lodo residual

Q_L = 89.1 $m^3\ d^{-1}$
C_L = 3.5 por ciento de sólidos totales
ρ_L = 1.02 t m^{-3}

12.5.5.1. Cálculo de la cantidad de lodo a deshidratar

12.5.5.2. Paso 1. Calcular la cantidad diaria y semanal de sólidos secos en el lodo.

Cálculo de los sólidos húmedos o masa de sólidos húmedos

$$M_L = Q_L \rho_L = 89.1 \times 1.02 = 90.9\, t\ \ d^{-1}$$

Cálculo de los sólidos secos o masa de sólidos secos

$$M_{LS} = Q_L \frac{C_L}{100} \rho_L = 89.1 \frac{3.5}{100} 1.02 = 3.18\, t\ \ \ d^{-1}$$

Cantidad semanal:

M_L × 7 días a la semana
Masa semanal de sólidos húmedos = 90.9 × 7 = 636.7 t por semana
Masa semanal de sólidos secos = 3.18 × 7 = 22.26 t por semana

12.5.5.3. Paso 2. Calcular las tasas diaria y horaria de tratamiento de lodos (basándose en los ciclos de operación aceptados 6 días por semana, 8 horas por día).

Ciclo operativo:
Semanal – 6 días por semana
Diario – 8 horas por día
Caudal diario Q_L'

$$Q_L' = \frac{Q_L \times 7 \frac{d}{semana}}{6 \frac{d}{semana}} = \frac{89.1 \times 7}{6} = 104\, m^3\ \ d^{-1}$$

Caudal horario Q_L''

$$Q_L'' = \frac{Q_L'}{8 \frac{h}{dia}} = \frac{104}{8} = 13.0\, m^3\ \ h^{-1}$$

Tasas diaria (M_L') y horaria (M_l") de sólidos húmedos

$$M_L` = \frac{M_L \times 7 \frac{d}{semana}}{6 \frac{d}{semana}} = \frac{90.9 \times 7}{6} = 106\, t\ \ d^{-1}$$

$$M_L`` = \frac{M_l`}{8\frac{h}{dia}} = \frac{106}{8} = 13.2\, t\ h^{-1}$$

Tasas diaria (M_{LS}') y horaria (M_{LS}") de sólidos secos

$$M_{LS}` = \frac{M_L \times 7\frac{d}{semana}}{6\frac{d}{semana}} = \frac{3.18 \times 7}{6} = 3.71\ \ t\ d^{-1}$$

$$M_{LS}`` = \frac{M_L`}{8\frac{h}{dia}} = \frac{3.71}{8} = 0.46\ t\ h^{-1}$$

Las cantidades de lodo a tratar de acuerdo al ciclo de operación establecido son de 3.71 t d^{-1} o de 0.46 t d^{-1} en base seca.

12.5.5.4. Sistema de acondicionamiento del lodo

De acuerdo al estudio de deshidratación, para el acondicionamiento de lodo, se utilizará un polímero catiónico de alto peso molecular, el cual se encuentra en el mercado en forma sólida. Se vende en sacos de 20 a 25 kilos. Sus características más importantes se muestran en la Tabla 12.14. Se utilizará en dosis variables de 200 a 250 mg L^{-1}, de acuerdo a los resultados del estudio de deshidratación.

Tabla 12.14 Características del polímero

Parámetro	Característica
Apariencia	polvo granular blanco
Grado de carga (por ciento molar)	55
Peso molecular relativo	alto
Densidad aparente, $kg{\cdot}m^{-3}$	750± 50
ph solución al 0.5 por ciento a 25ºc	3.0 – 5.0
Viscosidad al 0.5 por ciento ($N{\cdot}s{\cdot}m^{-2}$)	0.65

Paso 2 Equipo requerido para el acondicionamiento de lodo.

12.5.5.5. Tolva de dosificación de polímero seco

El polímero se puede guardar en un almacén que se debe ubicar dentro del mismo edificio de deshidratación. Diariamente se tomará este polímero y se pondrá en una tolva con la cantidad que se utilizará en un día, el cual se va a ir dosificando en forma continua. La tolva para la dosificación se podrá construir en acero inoxidable, plástico o fibra de vidrio y tendrá un dosificador automático del polímero seco.

12.5.5.6. Tanque de preparación de solución stock o madre

El polímero seco se dosificará a un tanque de preparación de solución stock o solución madre. Este tanque trabajará en continuo y preparará una solución de polímero al 0.5 por ciento (5 000 mg L^{-1}). El tanque se alimentará en forma continua, con el polímero seco y agua limpia o de primer uso. El tanque de preparación debe tener un tiempo de retención de 1 hora, para garantizar la dilución y maduración de la solución de polímero. Este tanque de preparación puede ser de plástico o de fibra de vidrio y debe tener un sistema de agitación para mantener la solución bien mezclada. También debe contar con medidores de flujo de agua e indicador de nivel en el tanque.

12.5.5.7. Bomba dosificadora o de transferencia de lodo del tanque de preparación de la solución madre al tanque de dilución de polímero

El polímero debe dosificarse a un concentración de 0.05 por ciento (500 mg L^{-1}). Por lo tanto la solución stock debe transferirse a otro tanque para preparar esta solución. La bomba requerida puede ser tipo diafragma o de cavidad progresiva y debe poder bombear el polímero con una viscosidad de 0.65 N s m^{-2}.

12.5.5.8. Tanque de preparación de la solución de polímero al 0.05 por ciento

El tanque de preparación de la solución de polímero al 0.05 por ciento (500 mg L^{-1}), es para un tiempo de retención de 10 minutos. Recibe la solución stock o solución madre y se diluye con agua limpia o agua tratada. Este tanque puede ser de plástico, metal o fibra de vidrio. Está provisto de un sistema de agitación mecánica para mantener la mezcla uniforme, medidor de flujo y sistema para el control de nivel.

12.5.5.9. Bomba para transferencia de lodos al tanque de floculación o separador centrífugo.

Estas son bombas de operación continua, con gasto ajustable, normalmente flujo pistón o cavidad progresiva, ver capítulo 5. No se recomiendan las bombas centrífugas debido a que pueden dañar la formación de flóculos.

12.5.5.10. Tanque de floculación.

El tanque de floculación se requiere si el equipo de deshidratación que se va a utilizar es un filtro prensa o filtro de banda, ya que el lodo debe llegar en forma de flóculos para separarlo fácilmente del agua. El tanque de floculación constará de un compartimiento para mezcla rápida, donde la mezcla lodo polímero entrará en contacto durante 1 minuto a una velocidad de 300 rpm. Posteriormente pasará a un tanque de floculación provisto de cuatro celdas con agitadores de velocidad variable para el mezclado lento de la solución y permitir la floculación del lodo durante 20 minutos. Después la coagulación - floculación el lodo se llevará a deshidratación en un filtro prensa. Esta unidad puede ser construída en material plástico, fibra de vidrio o acero o comprarse directamente todo el módulo de preparación y dosificación de reactivos y tanque de floculación.

12.5.5.11. Paso 3. Cálculo de la cantidad de polímero y dimensionamiento de las unidades de acondicionamiento de lodo

Determinación de la cantidad del polímero

Para calcular la cantidad de polímero se considera una dosis de 250 mg L^{-1} o 7.5 kg t^{-1} de lodo seco.

Masa polímero diario=104 m^3 d^{-1} × 250 g m^{-3} = 26 kg d^{-1}

Cantidad de polímero por mes

$Q_{\text{polimero mes}}$ = 26 kg d^{-1} × 24 días operación por mes

$Q_{\text{polimero mes}}$ = 624 kg por mes.

Almacén de reactivos (Considerar capacidad para almacenar el polímero de 1 mes)

Se requiere de un área de 3.00 × 2.00m aproximadamente

Equipo de preparación de reactivos

Tanque de preparación de la solución madre

Solución madre al 0.5 por ciento. Se requieren 5.2 $m^3\ d^{-1}$ de solución de polímero al día que se dosificará en 8 horas a razón de 0.65 $m^3\ h^{-1}$

Se necesita una cantidad de polímero de 26 kg d^{-1}

Tiempo necesario para la preparación de la solución 1h. TRH del tanque = 1 hora

V tanque = 0.65 $m^3\ h^{-1}$ x 1 h= 0.65 m^3

V recomendado = 1.0 m^3. Se requiere de un controlador de nivel.

Bomba de transferencia de la solución madre (2 bombas en operación y otra de reserva instalada)

Se recomiendan bombas de diafragma
Q bombas=5.2 $m^3\ d^{-1}$ /8h= 0.65 $m^3\ h^{-1}$
Se recomiendan 3 bombas, dos operando y 1 de reserva
Q de una bomba de 325 L h^{-1}

Tanque de preparación de la solución al 0.05 por ciento.

Tiempo residencia hidráulico necesario para la dilución del polímero 10 min= 0.16 h
Viscosidad de la solución =0.15 N s m^{-2}
Caudal de dosificación de la solución al 0.05 por ciento = 52 $m^3\ d^{-1}$ =6.5 $m^3\ h^{-1}$
Volumen del tanque =6.5 × 0.16= 1.0 m^3
Se requiere de un controlador de nivel.
Bomba dosificadora (3 en operación y una de reserva instalada)
Q bombas=6.5 $m^3\ h^{-1}$
Q de una bomba = 6500 L h^{-1}/3 bombas =2 200 L h^{-1}
Se recomiendan cuatro bombas. Tres en operación y una de reserva

Agitadores. Se requieren de 2 agitadores, uno para cada tanque.

La potencia se determina de acuerdo a la expresión:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} \qquad \text{Ecuación 12.47}$$

Donde G- gradiente de velocidad, s^{-1}
P-potencia - N m/s
V-volumen del tanque, m^3;
μ-viscosidad absoluta, N s/m^2

Agitador para el tanque de la preparación de la solución stock.

Gradiente recomendado para la preparación de la solución.
Se selecciona un G de 8.3 s^{-1}
$P=G^2\mu V$ = 8.3^2 s^{-2} × 0.65 N s m^{-2} ×1m^3 = 44.8 N m s^{-1}= 44.8 W × 1 HP/745.7 W = 0.06HP
Se requiere de un agitador de aproximadamente 0.1 HP. Uno en operación y otro en reserva

Agitador para el tanque de la solución al 0.05 por ciento

P=8.32 s^{-2} × 0.15 N s m^{-2} ×1 m^3 =10. 4 N m s^{-1}= 10.4 W × 1 HP/745.7 W= 0.014 HP

Para los dos tanques se recomiendan tres agitadores de 1/10 HP, con controladores de velocidad, uno para cada tanque (dos en operación y uno de reserva no instalado).

Tanque de coagulación- floculación

Unidad de coagulación o mezcla rápida

Se considera un tiempo de residencia del lodo de 1-3 min

Se considera el volumen del lodo y el volumen de la solución de polímero

El volumen del tanque de mezcla rápida será de

V= (Q_l''+Qpolímero al 0.05 por ciento)

TRH = (13 $m^3 h^{-1}$+6.5 $m^3 h^{-1}$) × 0.05 h = 0.975 =1.0 m^3

Agitador para el tanque

P=8.32 s^{-2} × 0.15 N s m^{-2} ×1 m^3 =10. 4 N m s^{-1}= 10.4 W × 1 HP / 745.7 W= 0.014 HP

Se requiere de un agitador de 1/10 HP

Unidad de mezcla lenta o floculación

La floculación del lodo requiere de un TRH de 20 - 30 min

Se selecciona TRH= 20 min= 0.3 h

Se considera el volumen del lodo y el volumen de la solución de polímero

Volumen del tanque

V= (Q_l''+Qpolímero al 0.05 por ciento)

Ilustración 12.41 Balance de sólidos en el filtro prensa

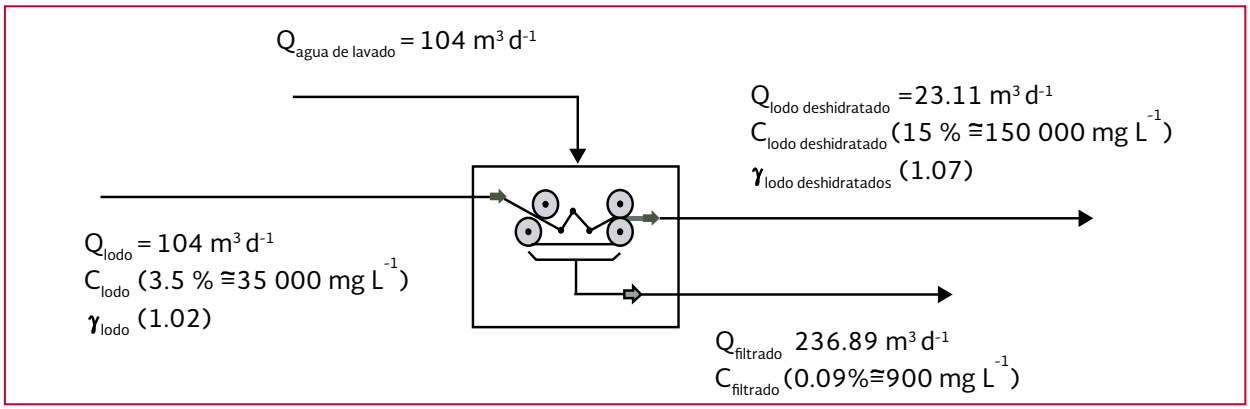
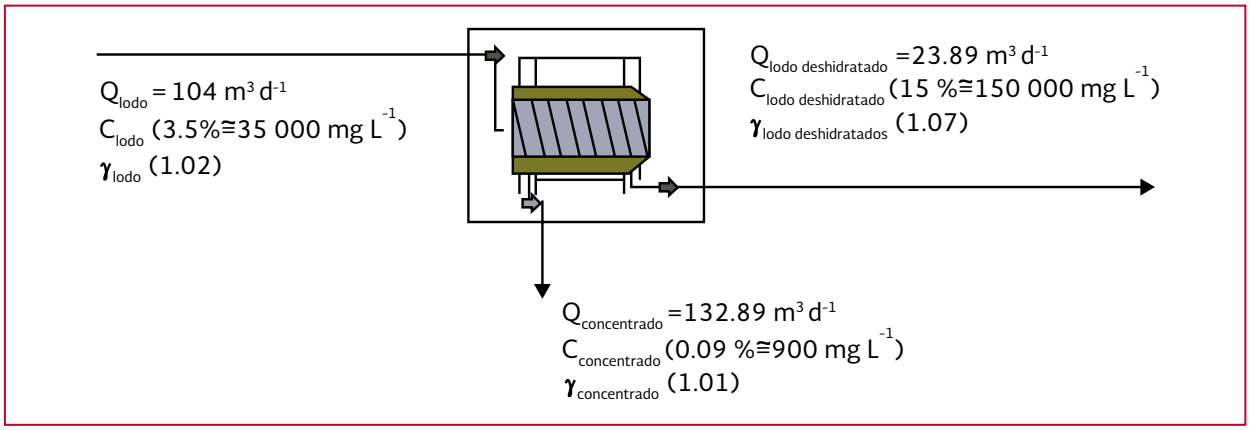


Ilustración 12.42 Balance de sólidos en la centrífuga



TRH = (13 $m^3 h^{-1}$ + 6.5 $m^3 h^{-1}$) × 0.3 = 5.85 m^3 = 6.0 m^3

El tanque de floculación tendrá cuatro módulos de 1.5 m^3 cada uno. Dimensiones de cada módulo de 1.2m/1.2m/1.1m

Borde libre de 0.5 m

Profundidad total de los tanques de 1.6 m

Se necesitan cuatro agitadores de 1/10 HP y dos agitadores de reserva no instalados

Bombas para transferencia de lodo

Se requiere una bomba flujo pistón de lodos (más una de reserva, instalada) para llevar el lodo al tanque de coagulación –floculación si se utiliza un filtro prensa de bandas, con las siguientes características:

Q de 13 $m^3 h^{-1}$

Presión de 160 kPa=23.5 psi

Límite max de presión 170 kPa (25 psi)

Se requiere una bomba de inyección del lodo floculado al filtro prensa de bandas con las mismas características para un caudal de 20 $m^3 h^{-1}$

12.5.5.12. Diseño del filtro prensa de bandas

Dimensiones de la banda

$$B = \frac{M_{LS}``}{P_u} = \frac{0.46}{0.30} = 1.5\,m \qquad \text{Ecuación 12.48}$$

B – Ancho de la banda, m;

P_u - Carga de sólidos al equipo,(90-680 kg $m^{-1} h^{-1}$), típico 300 kg $m^{-1} h^{-1}$)

Utilizar un filtro de banda de Ancho=1.5 m, instalando, otra unidad idéntica en espera

Agua de lavado

Como agua de lavado se puede usar agua residual tratada

Criterio: La cantidad de agua de lavado se estima de 50-100 por ciento del gasto de lodo afluente al equipo. El agua se presuriza a 700 kPa (100 psi)

Gasto diario: Qlodo =104 $m^3 d^{-1}$

Gasto horario: Qlodo=13 $m^3 h^{-1}$

Gasto diario: Qagua = 1.00 × 104= 104 $m^3 d^{-1}$

Gasto horario: Qagua =1.0 × 13= 13.0 $m^3 h^{-1}$

Cantidad mínima:

$Q_{\text{agua de lavado}}$ = 1.5m × 0.096 m^3/ (minm) x (60 min h^{-1}) × (8 h d^{-1})=69 $m^3 d^{-1}$

Se requieren 69 $m^3 d^{-1}$ de agua para lavado

Bomba para agua de lavado

Se selecciona una bomba en operación y otra de reserva instalada de capacidad

Q bomba= 15 $m^3 h^{-1}$ y presión de 700kPa= 100 psi

Caudal del líquido filtrado y volumen diario del lodo deshidratado

A) Ecuación de balance de sólidos

M_{LS}'- Tasa diaria de lodos, t d^{-1}.

M_{LS}' = Sólidos en la torta + Sólidos en el filtrado

$M_{LS}' = Q_{\text{lodo deshidratado}}\, C_{\text{lodo deshidratado}}\, \gamma_{\text{lodo deshidratado}} + Q_{\text{filtrado}}\, C_{\text{filtrado}} \gamma_{\text{filtrado}}$, t d^{-1}

3.71 (t d^{-1})=$Q_{\text{lodo deshidratado}}$ ($m^3 d^{-1}$) × 0.15 x 1.07 (t m^{-3}) + $Q_{\text{filtrado}}\, C_{\text{filtrado}} \gamma_{\text{filtrado}}$, t d^{-1}

$Q_{\text{lodo deshidratado}}$ = 23.11 $m^3 d^{-1}$

El segundo término puede despreciarse por la baja concentración de sólidos en el filtrado

Tabla 12.15 Equipo requerido para el sistema de deshidratación con centrífuga

Equipo	Cantidad
Tolva dosificadora de polímero seco con dosificador automático	1
Tanque de preparación de solución madre o stock, con agitador y control de nivel	1
Bomba de transferencia de solución madre	Mínimo 2. Una en operación y otra en espera
Tanque de preparación de solución de polímero al 0.5 por ciento, con agitador y control de nivel	1
Bomba de transferencia de solución de polímero a la centrífuga	Mínimo 2. Una en operación y otra en espera o reserva
Bomba de transferencia de lodo a la centrífuga	Mínimo 2. Una en operación y otra en espera o reserva
Centrífuga	Una en operación y otra en espera o reserva (opcional)
Tolva para almacenamiento de lodos	1
Contenedores para transporte de lodos o vehículo	2. Un en operación y otro en reserva (opcional)

Tabla 12.16 Equipo requerido para el sistema de filtro prensa de bandas

Equipo	Cantidad
Tolva dosificadora de polímero seco con dosificador automático	1
Tanque de preparación de solución madre o stock, con agitador y control de nivel	1
Bomba de transferencia de solución madre	Mínimo 2. Una en operación y otra en espera
Tanque de preparación de solución de polímero al 0.5 por ciento, con agitador y control de nivel	1
Bomba de transferencia de solución de polímero al tanque de mezcla rápida	Mínimo 2. Una en operación y otra en espera o reserva
Bomba de transferencia de lodo al tanque de mezcla rápida	Mínimo 2. Una en operación y otra en espera o reserva
Tanque de mezcla rápida, con agitador y control de nivel	1
Tanque de floculación	1
Bomba para transferencia del lodo floculado al filtro prensa	Mínimo 2. Una en operación y otra en espera o reserva
Filtro de banda	Mínimo 2. Una en operación y otra en espera o reserva
Tolva para almacenamiento de lodos	1
Contenedores para transporte de lodos o vehículo	2. Un en operación y otro en reserva (opcional)

B) Ecuación de equilibrio de caudales

$Q_L' + Q_{\text{agua polímero}} + Q_{\text{agua de lavado}} = Q_{\text{filtrado}} + Q_{\text{lodo deshidratado}}$, $m^3\ d^{-1}$

$104\ m^3\ d + 52\ m^3\ d^{-1} + 104\ m^3\ d^{-1} = Q_{\text{filtrado}} + Q_{\text{lodo deshidratado}}\ m^3\ d^{-1}$

$Q_{\text{filtrado}} = 236.89\ m^3\ d^{-1}$

$Q_{\text{filtrado}} = 29.6\ m^3\ h^{-1}$

considerando 8h de trabajo diario

El filtro prensa entregará un lodo con una concentración entre 15 a 20 por ciento de sólidos de acuerdo al estudio de deshidratación y se obtendrá un $Q_{\text{lodo deshidratado}} = 23.11\ m^3\ d^{-1}$ y un $Q_{\text{filtrado}} = 236.89\ m^3\ d^{-1}$ considerando 8h de trabajo diario.

El filtro prensa requiere de lavado continuo con un flujo de 104 m^3 por día.

Con los datos que aparecen en la Ilustración 12.41, los ciclos de operación y el ancho de la banda seleccionado, se puede solicitar a los proveedores la selección del filtro de bandas.

Paso 4. Diseño de la centrífuga

La centrífuga igual que el filtro de bandas entregará una torta de lodos entre 15 y 17 por ciento de sólidos

Caudal del líquido filtrado y volumen diario del lodo deshidratado

A) Ecuación de balance de sólidos

M_{LS}'- Tasa diaria de lodos, t d^{-1}

M_{LS}' = Sólidos en la torta + Sólidos en el concentrado

$M_{LS}' = Q_{\text{lodo deshidratado}} C_{\text{lodo deshidratado}} \gamma_{\text{lodo deshidratado}} + Q_{\text{concentrado}} C_{\text{concentrado}} \gamma_{\text{concentrado}}$, t d^{-1} (1)

3.71 (t d^{-1})=$Q_{\text{lodo deshidratado}}$ × 0.15 × 1.07 (t m^{-3})

$Q_{\text{lodo deshidratado}}$ = 23.11 m^3 d^{-1}

El segundo término puede despreciarse por la baja concentración de sólidos en el concentrado.

B) Ecuación de equilibrio de caudales

La centrífuga no usa el agua de lavado en forma continua, sólo al final de la jornada de trabajo se lava durante 10 minutos

$Q_L' + Q_{\text{agua polímero}} = Q_{\text{concentrado}} + Q_{\text{lodo deshidratado}}$, m^3 d^{-1} (2)

104+ 52 =Qconcentrado + 23.11

$Q_{\text{concentrado}}$ = 132. 89 m^3 d^{-1}

$Q_{\text{concentrado}}$= 16.61 m^3 h^{-1} considerando 8 h de trabajo diario

La centrífuga entregará un lodo con una concentración entre 15 y 20 por ciento de sólidos de acuerdo al estudio de deshidratación y se obtendrá un $Q_{\text{lodo deshidratado}}$ = 23.11 m^3 d^{-1} y un $Q_{\text{clarificado}}$= 16.61 m^3 h^{-1} considerando 8 h de trabajo diario.

Agua de lavado

La centrífuga se lavará diariamente durante 10 minutos con agua de primer uso o agua tratada con un flujo de 7-15 m^3 h^{-1}, requiriendo un volumen diario de 1-2.5 m^3

Con los datos que aparecen en la Ilustración 12.42, los ciclos de operación seleccionados se pueden solicitar a los proveedores la selección la centrífuga.

Paso 5. Determinación de diámetros de las tuberías

Diámetro del tubo para la alimentación del lodo

Velocidad de 1.0 m s^{-1}

Area= Q/v=13/3 600/1=0.00361 m^2

d=6.8 cm

El tubo será de un diámetro de 3".

Las pérdidas longitudinales serán de 1m por 100m de longitud.

Tubo de transferencia de la solución madre del polímero

Agua para preparación de la solución madre del polímero

Q_1= 0.65 m^3 h^{-1}

Agua para preparación de la solución del polímero al 0.05 por ciento

Q_2=6.5-0.65= 5.9 m^3 h^{-1}

Q=5.2/8 h= 0.65 m^3 h^{-1}

Velocidad de 1.0 m s^{-1}

Área=Q/v=0.65/3 600/1= 1.8cm^2

d=1.5 cm= 0.6"

El tubo será de un diámetro de 3/4"

Tubo de dosificación de la solución de polímero al 0.05 por ciento al floculador o a la centrífuga.

Q= 6.5 m^3 h^{-1}

Velocidad de 1.0 m s^{-1}

Area=Q/v=6.5/3600/1= 18 cm^2

d=4.8 cm= 2”
El tubo será de un diámetro de 2”

Tubo de transferencia del lodo floculado al filtro prensa

Q= 20 m^3 h^{-1} (incluye lodo y polímero)
Velocidad de 1.0 m s^{-1}
Area=Q/v=20/3 600/1=55 cm^2
d=8.4 cm= 3.5”
El tubo será de un diámetro de 3.5”

Tubo del agua de lavado

Q= 13m^3 h^{-1} (incluye lodo y polímero)
Velocidad de 1.2 m s^{-1}
Area=Q/v=13/3 600/1.2= 30cm^2
d=6.2 cm= 2.5”
El tubo será de un diámetro de 2.5”

Tubos para el agua para la preparación de soluciones del polímero

Agua para preparación de la solución madre del polímero
Q1= 0.65 m^3 h^{-1}
Velocidad de 1.2 m s^{-1}
Área=Q/v=0.65/3 600/1.2= 1.5 cm^2
d=1.38 cm= 0.5”
El tubo será de un diámetro de 0.5”.
Agua para preparación de la solución del polímero al 0.05 por ciento
Q2=6.5-0.65= 5.9 m^3 h^{-1}
Velocidad de 1.2 m s^{-1}
Area=Q/v=5.9/3 600/1.2=13.65 cm^2
d=4.16 cm= 1.64”
El tubo será de un diámetro de 2”.
Este cálculo sirve de base para el diseño Los datos se ajustarán al realizar la ingeniería de detalle

12.5.5.13. Ventajas y desventajas de los sistemas de deshidratación

Los dos sistemas de deshidratación anteriormente descritos pueden proporcionar un lodo deshidratado con una concentración de sólidos de por lo menos 15 por ciento. La selección del sistema dependerá de los resultados de los estudios realizados a nivel laboratorio y planta piloto y de la decisión final del usuario.

La Tabla 12.15 y Tabla 12.16 muestran el equipo requerido para cada una de las opciones de deshidratación. El equipo requerido es básicamente el mismo, sólo que la centrífuga no requiere la floculación previa del lodo. El contacto lodo - polímero se hace en línea un poco antes de la entrada a la centrífuga o en la cabeza de la misma.

Para el filtro banda es muy importante la formación de un flóculo grande y resistente para realizar de una forma eficiente la separación lodo - agua. Aquí es básico el control del proceso de floculación y el sistema de deshidratación requiere de esta unidad.

LECHADA DE CAL

13

Aplicación y Disposición de Lodo en Suelo

13.1. Aplicación del lodo residual en suelo

13.1.1. Introducción

El uso del lodo en el suelo y en la agricultura es importante debido a que los lodos municipales tienen un gran contenido de nutrimentos y materia orgánica, por otra parte la problemática del campo en México acerca del empobrecimiento del suelo por el uso agrícola intensivo, muestra al lodo como una alternativa para su uso en el acondicionamiento de suelo, sin embargo es necesario el control de las aplicaciones de lodo mediante una normatividad que incluya no sólo los límites máximos, sino también prácticas agronómicas adecuadas. Existen factores en el suelo que ayudan a controlar el efecto contaminante de los patógenos, metales pesados y tóxicos orgánicos contenidos en el lodo residual cuando son aplicados al suelo. Estos aspectos deben ser analizados en los sitios de disposición para poder tomar medidas de control y adecuar las dosis necesarias. En este capítulo se encuentran las principales consideraciones generales sobre el suelo, así como las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo; la microbiología y el comportamiento de los microorganismos patógenos; el comportamiento de los nutrientes y de los metales pesados; los factores reguladores de contaminantes; criterios y diseño de cálculo para la aplicación y algunos ejemplos de aplicación de lodo en México.

13.1.2. Objetivo

Conocer las propiedades del suelo y el comportamiento de diferentes parámetros e indicadores de contaminación.

- Aprender a desarrollar un esquema de aplicación de lodo al suelo
- Identificar las ventajas y desventajas de su aplicación
- Conocer las potencialidades del uso de los lodos como biosólidos útiles en la agricultura
- Conocer experiencias de aplicación de lodo en México

13.1.3. Bases teóricas

La aplicación de lodos al suelo consiste en extender o esparcir lodo sobre un suelo con el fin de aprovechar su contenido de materia orgánica y nutrientes (nitrógeno y fósforo), para los cultivos agrícolas, forestales, o también para recuperar o mejorar la calidad de un suelo.

Esta forma de uso del lodo es muy frecuente en las plantas de tratamiento de aguas residuales en México. Existen factores en el suelo que ayudan a controlar el efecto contaminante de los patógenos, metales pesados y tóxicos orgánicos contenidos en el lodo residual cuando son aplicados al suelo. Estos aspectos deben ser analizados en los sitios de disposición para poder tomar medidas de control y adecuar las dosis necesarias.

13.1.3.1. Consideraciones generales sobre el suelo

Es necesario antes de aplicar el lodo al suelo conocer sus propiedades y procesos físicos (textura, estructura, permeabilidad), químicos (pH, materia orgánica, mecanismos de adsorción, desorción, etc.); biológicos, (composición biológica del suelo, mecanismos de competencia y depredación, etc.,) y cómo estos factores se enlazan para regular la presencia de contaminantes vertidos en el suelo cuando son aplicados desechos residuales. Lo primero que se hace es definir el concepto de suelo, y después sus características y las propiedades del mismo.

Definición.-El término suelo se deriva del latín Solum que significa piso o terreno. En general, el suelo se refiere a la superficie suelta del terreno para distinguirlo de la roca sólida. A partir de esto, la definición de suelo más aceptable considera las siguientes acepciones, (Ortíz, 1987):

- El suelo es un mineral no consolidado sobre la superficie inmediata de la corteza terrestre que sirve como soporte para el desarrollo de la vegetación
- El suelo es el material mineral no consolidado sobre la superficie de la tierra que ha sido influenciado por factores genéticos del medio como son el material parental; el clima, que incluye efectos de temperatura y precipitación; los macro y microorganismos; y la topografía. Todos estos factores que actúan en un período de tiempo dan origen al suelo, el cual difiere del material del cual es derivado en muchas características físicas, químicas, biológicas y morfológicas

Otra definición que refuerza lo anterior es la del sistema de clasificación de (Canada Soil Survey Committee, 1978), la cual define el suelo como "un material no consolidado o un material orgánico a 10 cm de profundidad que se encuentra en la superficie terrestre y es capaz de soportar el crecimiento vegetal". Aunque la profundidad del material orgánico tiene sus variaciones de acuerdo a la región de que se trate. El suelo está formado de horizontes que tienen características propias y definidas. Los procesos que originan la formación del suelo dan lugar a la diferenciación de horizontes según el efecto de lixiviación o acumulación de materiales o sustancias en determinado lugar del suelo.

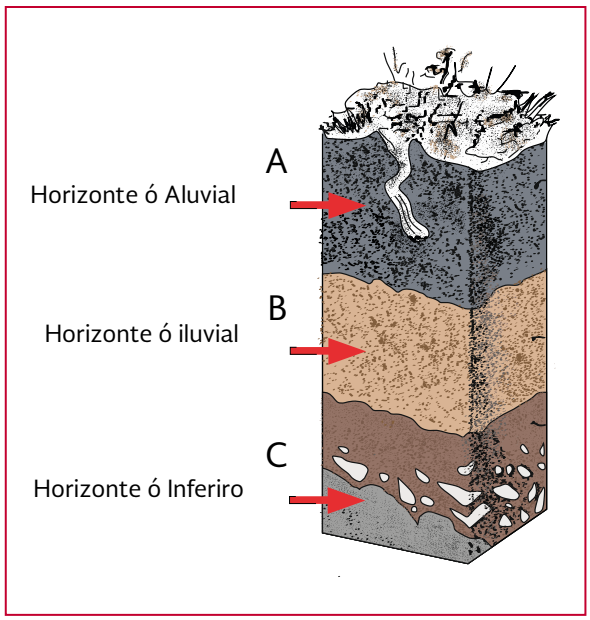
El perfil del suelo es un concepto que sirve como unidad básica de estudio para darnos conocimiento de su génesis, desarrollo e identificación. Sirve para explicar el movimiento de contaminantes dentro de un sustrato determinado. En la Ilustración 13.1, se observa un perfil típico que muestra la posición de los diferentes horizontes en relación con el subsuelo y la superficie vegetal.

13.1.3.2. Propiedades y procesos en el suelo

La contaminación del suelo se puede estudiar a través de procesos de transporte y acumulación

de compuestos. Este fenómeno de acumulación y movilidad es regido por la interacción de estos compuestos con la fase sólida del suelo y por su degradabilidad. Estas interacciones se describen en los siguientes incisos.

Ilustración 13.1 Perfil de suelo y su posición relativa con la capa vegetal y el subsuelo, Fuente: J. Ibáñez, 2008



Propiedades y procesos físicos del suelo

Los aspectos físicos de la aplicación de desechos en el suelo incluyen procesos de filtración y dilución. El agua residual se mueve a través del suelo, los sólidos suspendidos se remueven por filtración y el filtrado se diluye en la solución del suelo. Este proceso se encuentra afectado por las propiedades físicas del suelo.

El suelo está compuesto de material mineral, materia orgánica, agua que contiene sustancias disueltas (en solución) y aire. En la Tabla 13.1 se muestra la proporción aproximada de estos componentes en un suelo agrícola típico.

Tabla 13.1 Proporción de componentes en el suelo

Materia sólida		Espacio poroso	
Material orgánico	Material mineral	Solución	Aire
0	25	50	75 100

Textura

Se define como la proporción en que se encuentran los siguientes componentes: arena, arcilla y grava en el suelo como se muestra en la Ilustración 13.2. La textura es una combinación con otras propiedades físicas del suelo que afectan el movimiento del agua y las propiedades de retención del suelo. Esto influye en los procesos químicos tales como la adsorción de los solutos. En general, el movimiento del agua es lento y la retención y adsorción de los solutos se lleva a cabo en las partículas que forman la textura.

Estructura

La estructura del suelo se refiere a la disposición de arena, arcilla y grava en combinación con la materia orgánica dentro de estructuras secundarias llamadas agregados. En la Ilustración 13.3 se muestran algunas estructuras comunes de suelo y sus efectos en la infiltración del agua.

Infiltración y permeabilidad

La infiltración es el proceso de la entrada del agua al suelo a través de su superficie y verticalmente hacia abajo. El proceso es de gran significancia práctica debido a que éste pude determinar la cantidad de residuos líquidos que pueden ser aplicados al suelo.

La cantidad de infiltración está influenciada por la permeabilidad y el contenido de humedad del suelo. La permeabilidad se refiere a la facilidad con que el agua y el aire pasan a través del suelo. De acuerdo a la Tabla 13.2, esto puede ser cuantificado en términos de la cantidad de movimiento del agua a través de una sección transversal de suelo saturado en un tiempo dado.

Tabla 13.2 Clases de permeabilidad para suelo saturado

Permeabilidad del suelo	Clase de infiltración	Clase textural probable
<0.02	Muy lenta	Arcilla densa muy compacta
0.02-0.1	Lenta	Arcilla, limo, arcilla
0.1-0.3	Moderadamente lenta	Arcilla limo a limoso
1.0-3.0	Moderadamente rápida	Limoso arenoso a arenoso
3.0-10	Rápida	Arena gruesa
>10	Muy rápida	Grava

Fuente: (Service., U.S.D.A. Sóil Conservation, 1971)

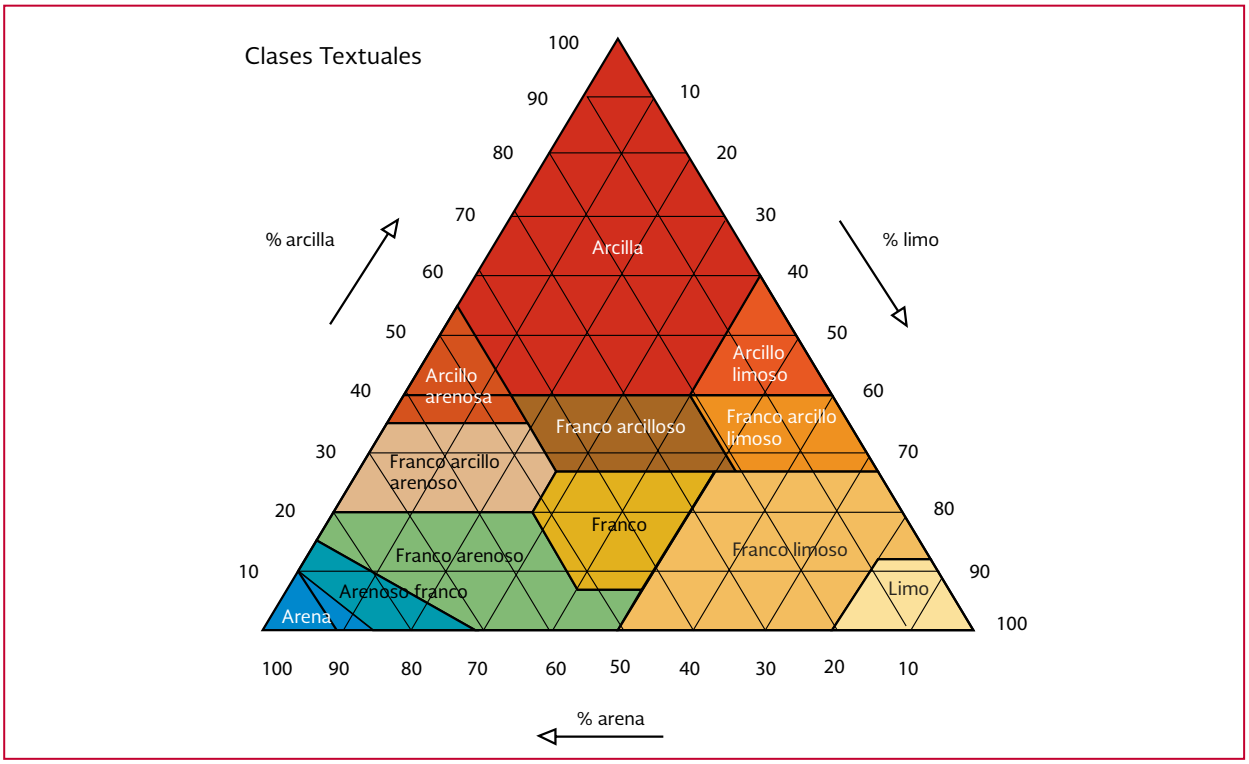
Retención de agua

El agua del suelo se caracteriza por la energía con la cual es retenida en las partículas del suelo. Un término que describe esta energía es la "tensión de humedad del suelo". En condiciones de campo, la tensión es ejercida sobre la humedad del suelo a través de: 1) Drenaje natural; 2) Evaporación, y 3) Uso de agua por las plantas. La curva característica de humedad en el suelo, Ilustración 13.4, ilustra la secuencia de movimientos de cómo la humedad del suelo drena libremente.

De esta forma el agua drenada deja la superficie del suelo; se desarrollan bajas tensiones y los poros grandes, los cuales retienen agua con bajas tensiones, se vacían primero.

Los poros pequeños retienen agua con mayor tensión y son capaces de retener agua en con-

Ilustración 13.2 Triángulo de texturas, Fuente: Crespo, 2008



tra de las fuerzas gravitacionales. El contenido de humedad del suelo después de estar siendo saturada y permitir su drenaje por 48 horas es denominado como capacidad de campo. Una porción de esta humedad es extractable para las raíces de las plantas mientras que otra porción es retenida fuertemente.

El umbral entre el agua disponible para la planta y la que no está disponible es llamado punto de marchitamiento. Para propósitos de diagnóstico, la capacidad de campo se considera como el contenido de agua del suelo a 33 kPa de tensión de humedad y el punto permanente de marchitamiento el contenido en 1 500 kPa de tensión.

El agua disponible para las plantas es la diferencia entre la cantidad de agua retenida por la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente y es una medida de la capacidad de almacenamiento de agua por el suelo, (Ilustración 13.5).

Además, esto define la cantidad de agua residual que se puede aplicar a un suelo seco sin drenaje directo al acuífero. La capacidad de agua disponible en suelo arenoso es relativamente baja (3 a 9 por ciento sobre el suelo en base seca), e incrementa en la medida que el tamaño de partícula disminuye, alcanzando un máximo de 12 por ciento para un suelo limo-arcilloso. Se requiere de 120 cm de suelo para proveer suficiente tiempo de retención para la renovación de agua residual.

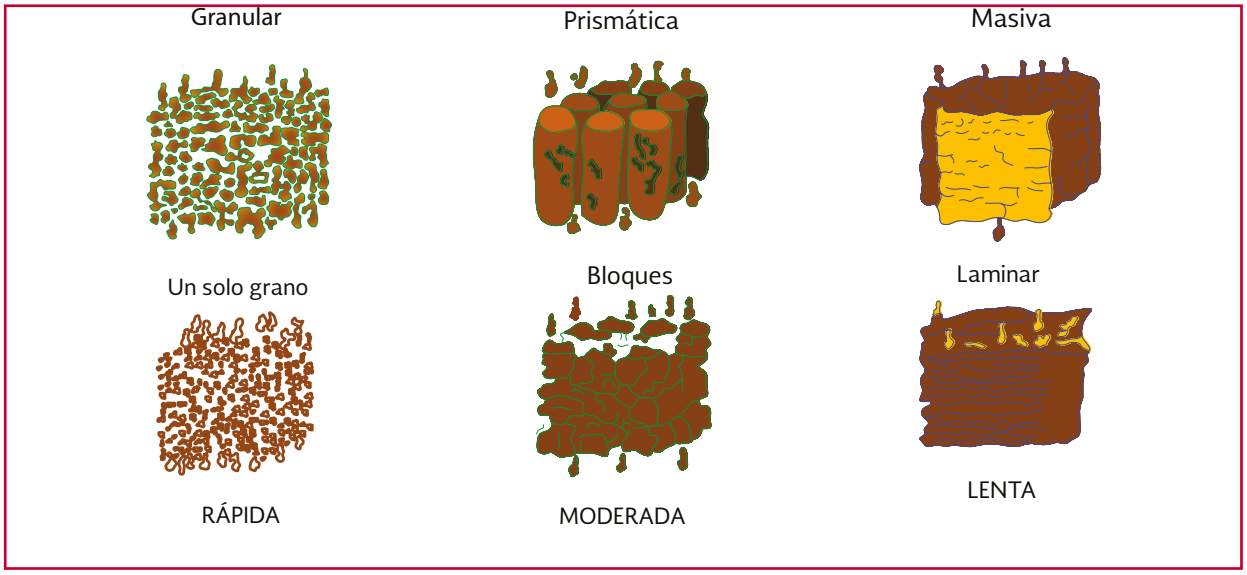
Movimiento del agua en el suelo

En suelo seco muchos de los espacios porosos se llenan con aire y cuando el agua entra por infiltración las partículas gaseosas son desplazadas rápidamente. Con una aplicación continua de agua, la cantidad de infiltración disminuye y se aproxima a un valor constante de la última capa permeable. Un exceso de agua conduciría a un encharcamiento o escurrimiento de agua. La cantidad de agua infiltrada depende de la permeabilidad del suelo y su topografía.

13.1.3.3. Propiedades y procesos químicos del suelo

Las reacciones químicas entre los iones disueltos y los compuestos del suelo alteran su movilidad

Ilustración 13.3 Estructura del suelo y su efecto en la infiltración del agua



y determinan la ruta de los residuos contaminantes. Muchas de estas reacciones, tales como la adsorción, precipitación e intercambio de cationes, dependen de la química de los coloides (partículas del suelo menores de <0.002 mm).

La fracción inorgánica coloidal incluye arcillas minerales (silicatos), óxidos e hidróxidos de hierro, manganeso y aluminio.

La fracción coloidal orgánica está compuesta principalmente por materiales húmicos que son sustancias cafés a café oscuras no cristalinas, modificadas de tejidos de origen animal o vegetal sintetizadas por organismos del suelo.

Los componentes de la fase sólida del suelo usualmente están presentes en forma combinada. Por ejemplo, la materia orgánica y minerales se encuentran como complejos órgano-minerales. Los óxidos de hierro, aluminio y manganeso pueden cubrir las superficies de las arcillas minerales que a su vez cubren los grandes componentes inorgánicos tales como arena y partículas de sedimento.

Desde un punto de vista de renovación del agua residual, tal vez la más importante reacción química es la adsorción y la precipitación. Ambas reacciones producen la remoción de sustancias contaminantes en la solución del suelo.

A continuación se enlistan los principales mecanismos químicos de comportamiento de los contaminantes en el suelo, (Bolt *et al*., 1978):

- La adsorción positiva. Se lleva a cabo por la atracción electrostática entre compuestos con carga opuesta en los constituyentes del suelo
- La repulsión electrostática. En esta la carga entre los compuestos y los elementos del suelo es la misma. Esto es el caso de ciertos aniones y la carga predomi-

Ilustración 13.4 Curva características de humedad en tres tipos diferentes de suelo, arcilloso, arenoso y limoso, Fuente: (Service., U.S.D.A. Sóil Conservation, 1971)

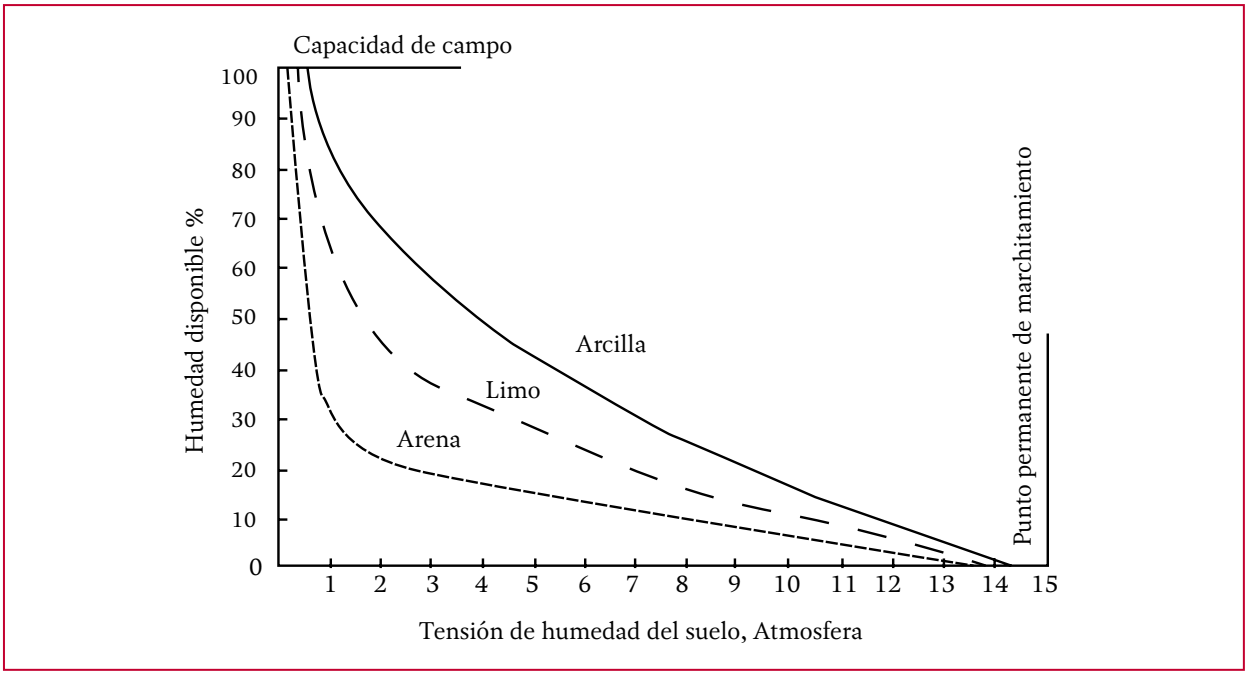
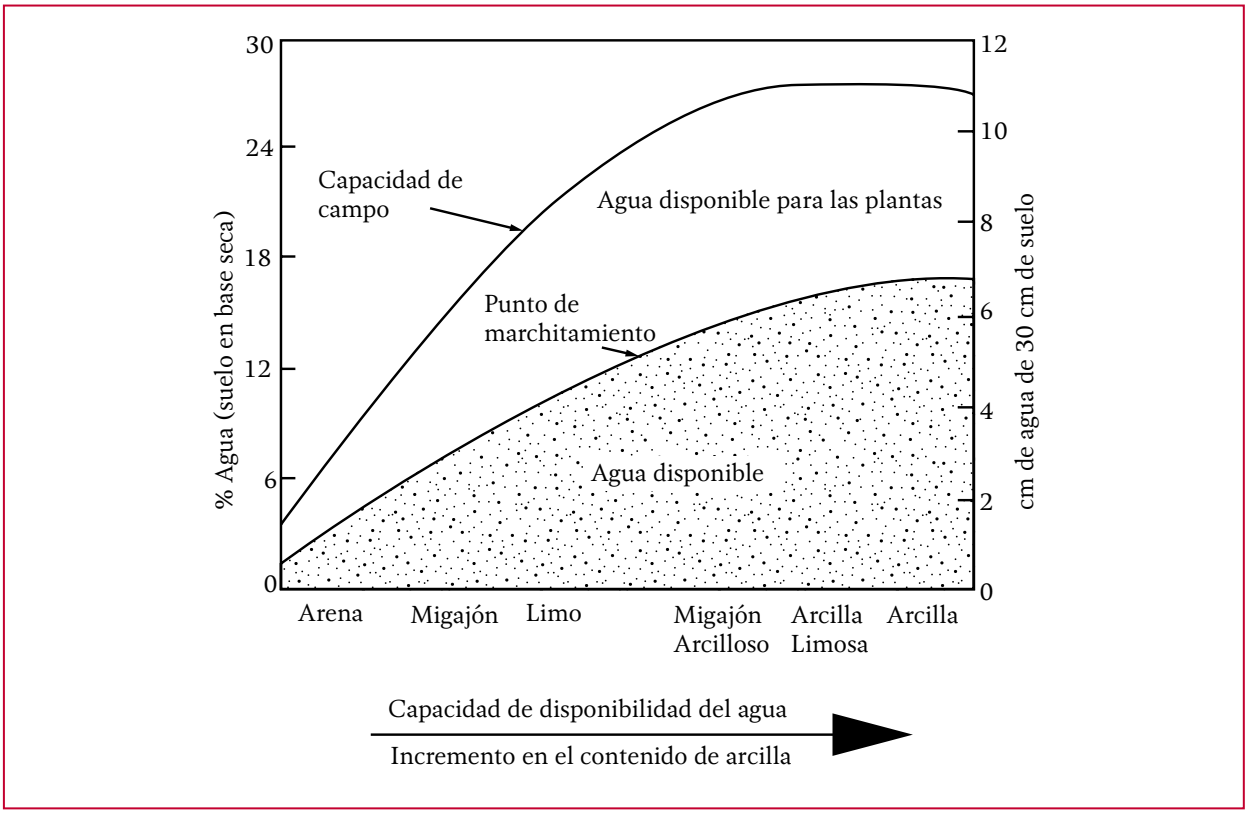


Ilustración 13.5 Relación entre las características de humedad del suelo y su textura



nantemente negativa de las arcillas minerales

- Quimiosorción. Este mecanismo de interacción se distingue de la adsorción electrostática positiva por el mayor valor de la energía de adsorción. La Quimiosorción se caracteriza también por un limitado intercambio con otros compuestos

Si bien los mecanismos anteriores constituyen la mayor parte de las interacciones que se producen en el suelo, otros mecanismos prevalecen con compuestos específicos. De esta manera en el caso de químicos orgánicos se forman puentes London-van der Waals, puentes de hidrógeno, enlaces con sales y metales.

- Reacción de precipitación y disolución. Juegan un papel predominante en el control de la movilidad de ciertos compuestos como los metales pesados y el fósforo
- Descomposición y reacciones de transformación. Muchos compuestos, cuando están presentes en el suelo, están sujetos a reacciones de degradación química, microbiana o una combinación de ambas Un ejemplo de esto son los pesticidas o algunos acondicionadores de suelo, su persistencia en el suelo está relacionada a su degradabilidad

Adsorción

La adsorción se conoce como porción, en un término general que se refiere a la captación y acumulación del material proveniente de un fluido sobre la superficie de un sólido. La adsorción se divide en intercambio iónico, adsorción específica y adsorción física. Cuando la adsorción

de una o más especies iónicas se acompaña por la deserción simultánea de una cantidad equivalente de otras especies iónicas, el proceso se llama intercambio iónico.

Los cationes retenidos por cargas negativas de partículas del suelo con fuerzas débiles son intercambiados y la cantidad de estos cationes es conocida como la capacidad de intercambio catiónico del suelo.

La capacidad de intercambio catiónico y la cantidad de cationes individuales intercambiables se expresan en miligramos equivalentes (meq) por 100 gr de suelo. La capacidad de intercambio catiónico del suelo mineral varía de 5 a 50 y es mayor en suelo orgánico. El intercambio de cationes absorbidos en la solución del suelo está de acuerdo a la ley de acción de masas. Por ejemplo:

$$CaX_2 + 2\,Na^{+} = 2\,NaX + Ca^{2+}$$

Ecuación 13.1

Donde la X denota un sitio de intercambio catiónico. La adsorción específica, también llamada Quimiosorción, resulta de la formación de complejos superficiales y de las fuerzas electrostáticas. Esto ocurre sobre la superficie de los hidróxidos de hierro, aluminio y manganeso, en asociación con grupos hidroxilos sobre los bordes de las arcillas minerales y los grupos funcionales de la materia orgánica del suelo.

Los iones específicamente adsorbidos no son fácilmente liberados, excepto por otros iones de gran afinidad, o por alteración de la química de la superficie, por ejemplo con un cambio de pH. La gran afinidad del suelo por los fosfatos y metales pesados es el resultado de la adsorción específica. La adsorción específica es efectiva principalmente en los procesos de purificación del agua residual.

La adsorción física involucra la unión de adsorbente-adsorbido a través de cadenas cortas y de fuerzas débiles de interacción molecular atómica, (fuerzas de van der Waal's) que operan cuando las nubes de electrones de los átomos no se traslapan de manera suficiente para causar fuerzas de atracción electrostática fuertes. De esta forma se facilita la deserción.

Así las fuerzas operan en toda la relacione adsorbente-adsorbido, pero parecen ser las principales fuerzas de adsorción para moléculas no polares no iónicas (ejemplo DDT).

La materia orgánica del suelo tiene superficies que son hidrofóbicas o "repelentes al agua". Las moléculas del agua compiten con desventaja con las moléculas no polares por estos sitios.

Por lo tanto, las moléculas no polares tales como el Aldrin e hidrocarburos clorinados muestran una fuerte conducta de adsorción en suelos ricos de materia orgánica.

Las moléculas polares no iónicas pueden también ser adsorbidas por enlaces de hidrógeno. Los grupos funcionales del suelo que son capaces de enlazar al hidrógeno también incluyes átomos de oxígeno sobre superficies de silicatos minerales, bordes de hidroxilos, y carboxilos y grupos amino de la materia orgánica.

Precipitación Química

Este concepto se refiere a la formación de un sólido que es poco soluble en el medio en el cual se formó. La precipitación es teóricamente un poco diferente de la adsorción, en la práctica no es

fácil de distinguir entre estos dos procesos en el suelo. Por ejemplo, la adsorción del fosfato sobre el carbonato de calcio puede conducir a la formación del fosfato de calcio que es poco soluble.

La precipitación ocurre cuando los productos de iones en la solución exceden la solubilidad del producto de un compuesto poco soluble. De manera inversa, la disolución ocurre cuando el producto iónico en la solución es menor que la solubilidad del producto. De esta forma, los sólidos poco solubles tienden a amortiguar la concentración de iones en la solución del suelo.

Algunos estudios hechos en Ontario han mostrado que el fosfato es precipitado como fosfato octacálcico en suelos tratados con lodo encalado. Es posible que los metales pesados y los iones fosfato coprecipiten hasta cierto punto con el hierro, aluminio y los hidróxidos de manganeso en el suelo.

La solubilidad de algunos precipitados del suelo o minerales está influenciada por su estatus de oxidación. Cuando los suelos se inundan y entran en condiciones anaerobias, Fe3+ se reduce a Fe2+ y el Mn4+ a Mn2+. Los estados de oxidación más bajos de los metales son más solubles que los estados de oxidación más altos. De esta forma, el hierro y los óxidos de manganeso se disuelven, liberando las especies adsorbidas o coprecipitadas tales como los metales y fosfatos dentro de la solución.

Formación de complejos

Es una reacción química que implica la combinación de cationes con moléculas o aniones que contienen pares libres de electrones que puede ser electrostática o covalente. La quelación ocurre cuando se forman más de un enlace entre un catión y un grupo funcional de agentes acomplejantes. Esto resulta en la formación de una estructura anillada la cual incorpora a un ión metálico. El complejo resultante se llama quelato. La estabilidad del quelato se incrementa con el aumento del número de estructuras anilladas. Sin embargo, esto no implica nada en relación con la solubilidad.

Es común clasificar los quelatos metálicos en los suelos en términos de solubilidad debido a que la solubilidad determina la movilidad de los metales y la disponibilidad de éstos en las plantas. Se han propuesto tres categorías (Hodgson, 1963), sin embargo debido a la complejidad de los sistemas del suelo resulta en una infinidad de subcategorías. Estas incluyen 1) el peso molecular relativamente alto de las sustancias húmicas que tienen una afinidad por los metales polivalentes pero que son muy insolubles en el suelo; 2) ácidos y bases de bajo peso molecular (ejemplo, ácido cítrico, málico y aminoácidos) que tienen una alta solubilidad en asociación con los metales; y 3) ligaduras con iones solubles.

La formación de quelatos solubles puede incrementar la movilidad y reducir la capacidad del suelo para retener fuertemente estos constituyentes por adsorción específica y precipitación.

13.1.3.4. Propiedades y procesos biológicos del suelo

Una parte de la materia orgánica del suelo es tejido vivo (1 a 4 por ciento). Una gran parte consiste de residuos modificados de plantas y células microbianas. Ésta es una parte muy importante de la fracción orgánica del suelo. Consiste de microflora, que incluye bacterias, virus, actinomicetos, hongos y algas; y una población

de animales que comprende los protozoarios, nemátodos, gusanos segmentados y artrópodos. En la Tabla 13.3 se presenta el número aproximado de organismos excluyendo los gusanos segmentados., que se encuentran comúnmente en suelos.

Tabla 13.3 Número aproximado de organismos encontrados comúnmente en la superficie del suelo

Organismo	Número estimado /g
Bacterias	3 000 000 – 500 000 000
Actinomicetos	1 000 000 – 20 000 000
Hongos	5 000 a 900 000
Levaduras	1 000 a 100 000
Algas	1 000 a 500 000
Protozoarios	1 000 a 500 000
Nemátodos	50 a 200

Los datos de bacterias, actinomicetos, hongos y levaduras se basan en cuenta en placa y se refiere a los propágalos viables. Además de estas especies se encuentra un gran número de mohos (Mixomicetos) virus, insectos, artrópodos, lombrices de tierra, micoplasmas y otros organismos.

Fuente: (Martin, 1977)

Si bien los hongos son menos numerosos que las bacterias y actinomicetos, el crecimiento excesivo de micelios constituye una gran masa de tejidos. La observación directa y por métodos fisiológicos ha indicado que en muchos suelos agrícolas los hongos representan el 75 por ciento y las bacterias más actinomicetos el 25 por ciento del total de la masa microbiana (Anderson, 1979).

La población biológica en el suelo cambia continuamente con el cambio en las condiciones ambientales. Sólo una fracción del total de la población está activamente involucrada en el crecimiento y en la descomposición de la materia orgánica y en la transformación de los nutrientes.

Las poblaciones restantes que se encuentran disminuidas están en espera de condiciones favorables.

Los microorganismos son más numerosos y metabólicamente más activos en la superficie del suelo donde las condiciones ambientales cambian frecuente y drásticamente. Debajo de la capa arable la cantidad de microorganismos y su actividad disminuye rápidamente con la profundidad.

Muchas reacciones biológicas están involucradas en la descomposición de la materia orgánica en el suelo. La descomposición se considera como un esfuerzo en equipo de diferentes organismos.

En el estado inicial, los organismos atacan el material más fácilmente degradable. Los microorganismos consumen el oxígeno y liberan agua y CO_2 por lo que hay una rápida acumulación de biomasa.

En la segunda etapa, el número de organismos declina tan rápidamente como la fracción orgánica es consumida. La masa resultante del tejido microbiano muerto, los productos intermedios de la degradación y los compuestos más resistentes del material orgánico original, son parcialmente degradados a sustancias húmicas.

En el estado final, los microorganismos del suelo disminuyen en la misma proporción en que disminuye el material fresco. Las sustancias húmicas son degradadas lentamente por organismos altamente especializados en una cantidad de 2 a 5 por ciento por año dependiendo de las condiciones ambientales.

Este proceso de degradación del material orgánico crudo se puede acelerar con técnicas como el composteo. En la Ilustración 13.6 se presenta el ciclo de la materia orgánica en el suelo.

En los sistemas naturales estas tres etapas se traslapan y los procesos que las identifican suceden simultáneamente.

La mayoría de las bacterias del suelo son heterotróficas y requieren de compuestos orgánicos para sus necesidades de carbón y energía.

Muchos compuestos orgánicos que se adicionan al suelo con el agua o lodo residual son dispuestos por las bacterias heterotróficas. Solamente pocas bacterias son autotróficas y obtienen energía de transformaciones de compuestos inorgánicos y carbón de CO_2. Sin embargo, las bacterias nitrificantes, que oxidan el amonio a nitrato, son autotróficas y tienen una gran importancia agronómica y ambiental.

En el suelo se pueden encontrar bacterias anaerobias, aerobias y facultativas, muchas crecen en condiciones de neutras a ligeramente alcalinas.

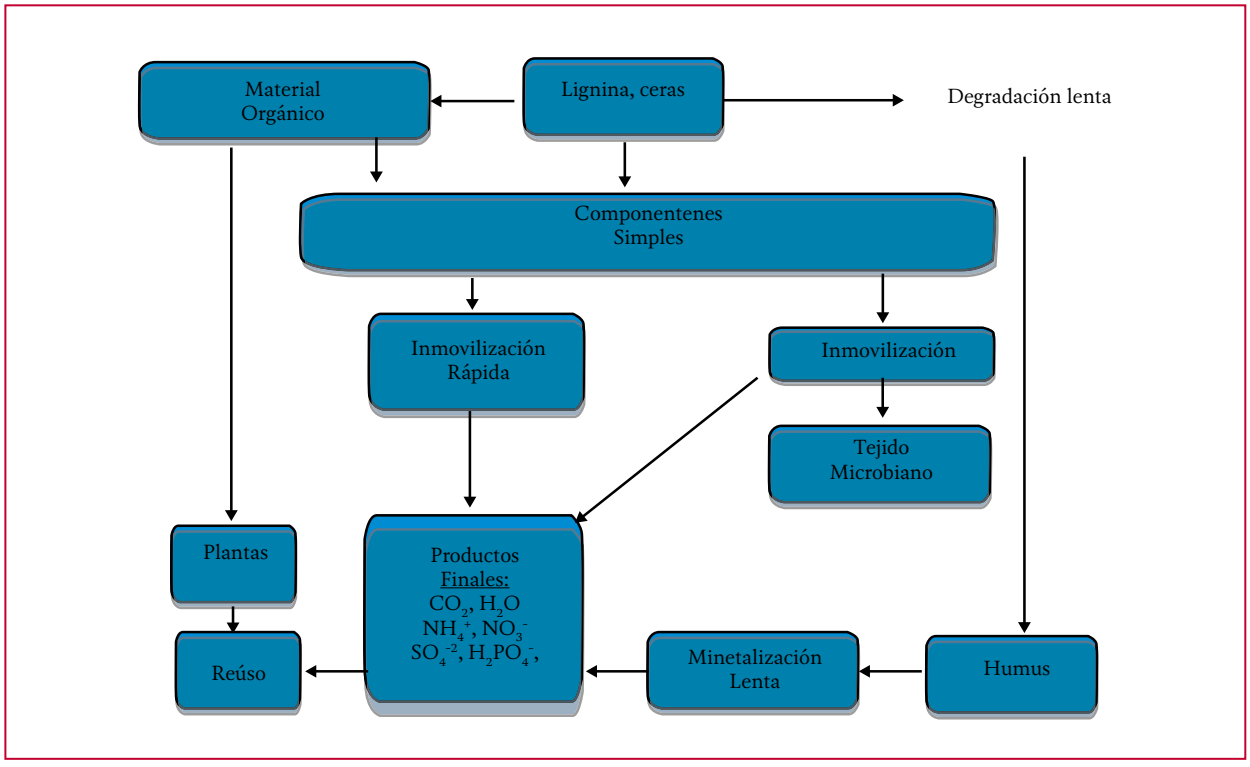
Con valores de pH de 5.5 a 5.0 el número de bacterias comienza a declinar y debajo de un pH 4 la actividad microbiana disminuye bruscamente.

Los actinomicetos son aerobios, heterotróficos y están relacionados a la descomposión del humus. Su crecimiento está restringido por la acidez del suelo y muy pocos logran crecer con un pH de 5. Todos los hongos son heterotróficos y muchos son aerobios y crecen bien cerca de suelos neutros. Algunos están adaptados a pH bajo y don dominantes en suelo ácido.

La cantidad de materia orgánica que es descompuesta y los productos finales que se forman dependen del grado de aeración y de la temperatura del suelo.

En la etapa inicial de descomposición bajo condiciones aerobias, arriba de un 60 por ciento de

Ilustración 13.6 Ciclo de la materia orgánica en el suelo



carbón orgánico puede ser consumido por organismos y ser convertido a dióxido de carbono. Mucho del carbón remanente se incorpora dentro de las células microbianas y lago de éste se consume cuando las poblaciones declinan.

En condiciones anaerobias, la descomposición es generalmente muy lenta y los productos finales son diferentes. Se produce algo de CO_2 y metano (CH_4); aunque, mucho del carbón, tal vez el 70 por ciento, permanece parcialmente degradado como ácidos orgánicos y alcoholes. Cuando sólo pocos organismos pueden degradar estos productos en ausencia de oxígeno, estos se acumulan.

En condiciones aerobias, el nitrógeno orgánico y el amoníaco son transformados a nitratos, el sulfuro orgánico a sulfato, mientras que en condiciones anaerobias se forman el amoníaco, el óxido nitroso, el gas nitrógeno y el sulfuro de hidrógeno.

Los olores nauseabundos se asocias frecuentemente con la descomposición anaerobia de los compuestos orgánicos, particularmente cuando el contenido de nitrógeno y sulfuros es grande.

Los organismos que realizan la descomposición requieren de nutrientes tal como los necesitan los animales o plantas superiores. Si la cantidad de residuos orgánicos adicionados al suelo son bajos, los nutrientes deberán ser obtenidos del suelo o de los fertilizantes; de otra forma la descomposición demorará.

La relación carbono nitrógeno del residuo es especialmente importante. Si ésta es mayor que 25, la descomposición inicial será lenta debido a la deficiencia de nitrógeno.

13.1.3.5. Comportamiento de patógenos en el suelo

Además de los microorganismos que pueden encontrarse en un suelo en forma natural, después de aplicarse un desecho como el agua o lodo residual, o basuras se localizan patógenos humanos. El comportamiento de patógenos en el suelo está regulado por condiciones físicas, químicas y biológicas presentes en determinado tipo de sustrato o suelo.

Algunas de las variables físicas son: contenido de humedad, temperatura, luz solar, permeabilidad y aeración. Entre las variables químicas y biológicas se encuentra el pH, materia orgánica y los microorganismos del suelo.

Temperaturas bajas provocan que las bacterias entren en un estado de latencia, temperaturas altas provocan una disminución en las poblaciones microbianas.

En suelos ácidos (pH 3.5), el tiempo de supervivencia es más corto que en un suelo alcalino o neutro, ya que la mayor parte de los patógenos toleran pH's en un rango de 6.5 y 7.7 (Pelczar, 1991)

La competencia y depredación entre los microorganismos en el suelo disminuyen el tiempo de supervivencia bacteriana, los protozoarios son el principal depredador de las bacterias coliformes.

Supervivencia

Los tratamientos aplicados al lodo residual reducen el número de patógenos. Muchos de los microorganismos se mueren durante el tratamiento

o al ser aplicados en el suelo. Por ejemplo las enterobacterias o los virus no tienen estructuras esporuladas que los defiendan contra la desecación, como sucede con las bacterias y hongos. Los virus además no se replican fuera de su hospedero.

De las bacterias patógenas solamente la Salmonella y Shigella son capaces de crecer tanto en el lodo como en el suelo. Además estos organismos presentan competencia entre sí y con otros microorganismos saprófitos o termofílicos, lo que hace difícil su supervivencia. Sin embargo, es posible encontrarlos en el lodo tratado y suelo donde es aplicado (Pan American Health Organization, 1989).

Los factores que causan la inactivación de las bacterias y virus en el sistema lodo/suelo han sido poco estudiados. Sin embargo se han encontrado indicios de que la concentración de amoníaco y la depredación se encuentran entre los más importantes.

El amoníaco producto de la descomposición microbiana de los compuestos nitrogenados presentes en el agua y lodo residual incrementa su nivel a medida que este proceso se lleva a cabo. Esto provoca la elevación del pH con la conversión de una cantidad considerable de ión amonio, que tiene una alta solubilidad en el agua. El amonio es efectivo en la inactivación de las cadenas de RNA de los virus (Pan American Health Organization, 1989).

Los quistes de los protozoarios son susceptibles a la destrucción por secado. Se han encontrado que los protozoarios de Entamoeba histolytica son capaces de persistir ocho días en el suelo, pero menos de tres días cuando han sido expuestos sobre la superficie de los vegetales.

Los huevos de Ascaris, son los que tienen mayor tiempo de supervivencia (Tabla 13.4), más de siete años en el suelo.

En la Tabla 13.5 se describen los factores que influyen en la supervivencia de bacterias y virus en el suelo.

Movilidad

La movilidad de los patógenos, a través del suelo, comienza cuando entran en contacto con el suelo y durante la erosión del mismo.

El transporte de patógenos en el suelo se ve favorecido por el movimiento del agua. La infiltración y percolación a través del suelo provocan una selección de patógenos. Los más grandes como los huevos de helminto y quistes de protozoarios se quedan retenidos en las capas superficiales, en suelos arenosos su paso se ve facilitado, (Pan American Health Organization, 1989). En la Tabla 13.6 se describen los factores que influyen en el movimiento de los virus hacia el acuífero.

13.1.3.6. Distribución de algunos compuestos en el suelo

Nutrimentos

El agua y lodo residual contienen cantidades variables de nitrógeno orgánico, nitratos, nitritos amoníaco. El camino que sigue el nitrógeno en el suelo, Ilustración 13.7. Las principales etapas de la transformación del nitrógeno en el suelo son: mineralización, inmovilización, nitrificación, desnitrificación, volatilización del amoníaco y lixiviado.

Tabla 13.4 Supervivencia de patógenos en diferentes sustratos

Organismo	Medio	Supervivencia (días)
Coliformes	Superficie del suelo	38
	Vegetales	35
	Pasto y trébol	6-34
Streptococcus	Suelo	35
Streptococcus faecalis	Suelo	26-77
Salmonella, sp.	Suelo	15-280
	Vegetales y frutos,	3-49
	Pasto y trébol	12-42
Salmonella typhy	Suelo	1-120
	Vegetales y frutos	<1-180
Shigella, sp.	Pasto (lodo crudo)	42
	Vegetales	2-10
	Suelo con humus	160
Bacilo de tuberculosis	Suelo	1-120
	Pasto	10-49
Vibrio cholerae	Vegetales y frutos	<1-29
	Agua y lodo	5-32
Leptospira, sp.	Suelo	15-43
	Agua	5-32
	Lodo	30
Quistes de *Entamoeba histolytica*	Suelo	6-8
	Vegetales	<1-3
	Agua	8-40
Enterovirus	Suelo	8
Huevos de Ascaris	Suelo	Más de 7 años
	Vegetales y frutos	27-35
Larvas de anquilostoma (lombriz intestinal)	Suelo	42
Poliovirus	Agua contamina a 20°C	Pocas semanas
Cisticercos de tremátodo (parásito del hígado)	En pasto seco	Pocas semanas
	En pasto que no ha sido secado	Más de un año

Fuente: (Epstein, J.M., & R.L. , 1976).

Tabla 13.5 Factores que influyen en la supervivencia de bacterias y virus en el suelo

Factor	Bacteria	Virus
Temperatura	Mayor supervivencia a bajas temperaturas. Mayor supervivencia en el invierno que en el verano.	
pH	Corta supervivencia en suelo ácido (pH 3-5) que en suelo alcalino	Afecta indirectamente la supervivencia de virus debido a que influye en su adsorción al suelo.
Cationes		Influye indirectamente en la supervivencia de los virus al incrementar su adsorción en el suelo (los virus sobreviven mejor en estado adsorbido)
Desecación y humedad del suelo	Mayor supervivencia en suelo húmedo y durante los meses de lluvias. Menor supervivencia en suelos arenosos con baja capacidad de retención de agua.	Incrementa la reducción de los virus en el suelo seco.
Luz solar	Es efectiva en la reducción de virus y bacterias en la superficie del suelo.	
Competencia con la microbiota del suelo	Es mayor la supervivencia en suelo estéril.	No hay un efecto claro con relación a los virus.
Materia orgánica	Incrementa la supervivencia y el posible recrecimiento cuando hay suficientes cantidades de materia orgánica.	Se desconoce.

Modificado de Gerba and Goyal por (Page, 1983).

Tabla 13.6 Factores que influyen en el movimiento de los virus hacia el acuífero

Factor	Comentarios
Tipo de suelo	Suelo de textura fina (arcillas) retienen más virus que los de textura ligera (arenas). Los óxidos de hierro incremental la capacidad de adsorción del suelo.
pH	La adsorción incrementa cuando el pH decrementa.
Cationes	La adsorción incrementa con la presencia de cationes que ayudan a producir fuerzas repulsivas en las partículas del suelo y los virus. La lluvia resorbe los virus del suelo debido a su baja conductividad.
Orgánicos solubles	Compiten con los virus por los sitios de adsorción. Los ácidos húmicos y fúlvicos reducen la adsorción de los virus en el suelo.
Tipos de virus	La adsorción en el suelo varía de acuerdo al tipo de virus ya que tienen diferentes puntos isoeléctricos.
Cantidad de flujo de agua en la columna de suelo	A medida que aumenta el flujo de agua en la columna del suelo disminuye la adsorción de los virus en el suelo.
Flujo saturado vs. Flujo insaturado	El movimiento de los virus es menor en un flujo no saturado.

Fuente: Modificado de Gerba and Goyal por (Page, 1983)

La mineralización es la conversión de nitrógeno orgánico a formas inorgánicas debido a la descomposición microbiana.

La inmovilización se lleva a cabo cuando el nitrógeno orgánico en la forma NH^{+}_{4} o NO_{3}^{-} es tomada por los organismos del suelo para satisfacer sus requerimientos de nitrógeno. El nitrógeno inmovilizado es liberado cuando el organismo muere. Cuando los residuos con una alta relación C/N (>25) se descomponen, existe poca mineralización debido a que mucho del nitrógeno es inmovilizado por los microorganismos.

La nitrificación se refiere a la conversión de NH_{4}^{+} a NO_{3}^{-}. Existen dos grupos de bacterias nitrificantes que son*: Nitrosomonas sp., y Nitrobacter, sp.* La conversión de NH_{4}^{+} por las *Nitrosomonas, sp.* son:

$$2NH_4 + 3\,O_2\,2 \rightarrow NO_2 + 4H + 2\,H_20 + energia$$

Ecuación 13.2

La conversión de *Nitrobacter, sp.* Se realiza de la siguiente forma:

$$2\,NO_2 + O_2 \rightarrow 2\,NO_{3-} + energia$$

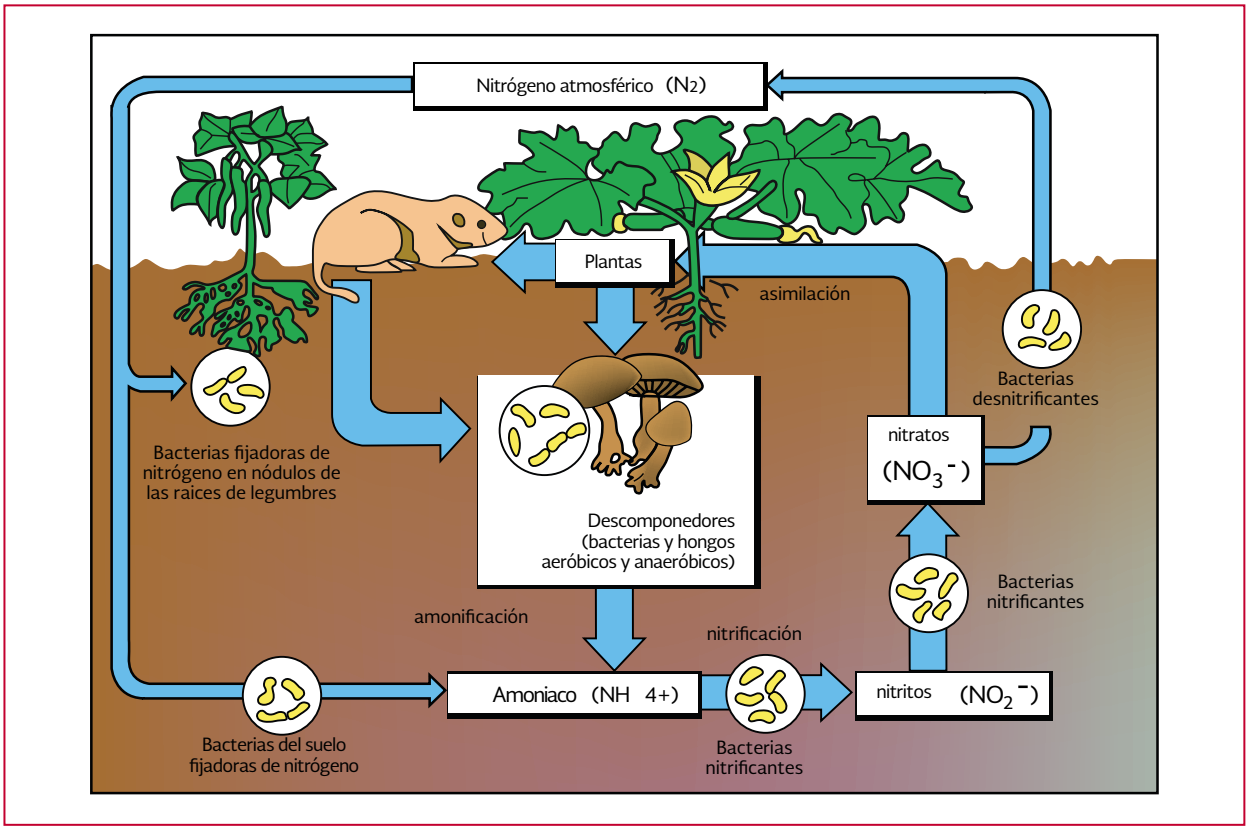
Ecuación 13.3

La transformación de NO_2 a NO_3- es muy rápida ya que existe poca acumulación de NO_2- en el suelo y el resultado neto es la acumulación de NO_3-. El pH óptimo para la nitrificación es ligeramente arriba de siete.

13.1.3.7. Metales pesados

En la Ilustración 13.8 se resume el destino de los metales pesados en el suelo.

Ilustración 13.7 Destino del nitrógeno en el suelo



Los mecanismos principales en esta ruta son: la formación de complejos insolubles; precipitación como minerales insolubles y adsorción; formación de complejos organo-metálicos y quelatos que se encuentran en formas solubles.

Se ha observado un proceso llamado de reversión, en éste el metal se convierte en formas que son menos solubles y extractables.

Los metales presentan una fuerte retención en el suelo. Según algunos estudios (Bates, 1975), se estima que se necesitarían 1 000 ciclos agrícolas para remover el cadmio adicionado en una aplicación de lodo residual.

El mecanismo de lixiviado de metales no es un problema fuerte excepto cuando los suelos presentan condiciones anaerobias o cuando su drenaje es rápido como sucede con los suelos arenosos.

Las condiciones anaeróbicas del suelo incrementan la solubilidad y movilidad por disolución de los óxidos de hierro y manganeso y la formación de complejos organometálicos solubles.

(Kinninburg, 1976), mencionan que la selectividad del hidróxido de hierro y los óxidos de aluminio por los metales divalentes incrementan en el siguiente orden:

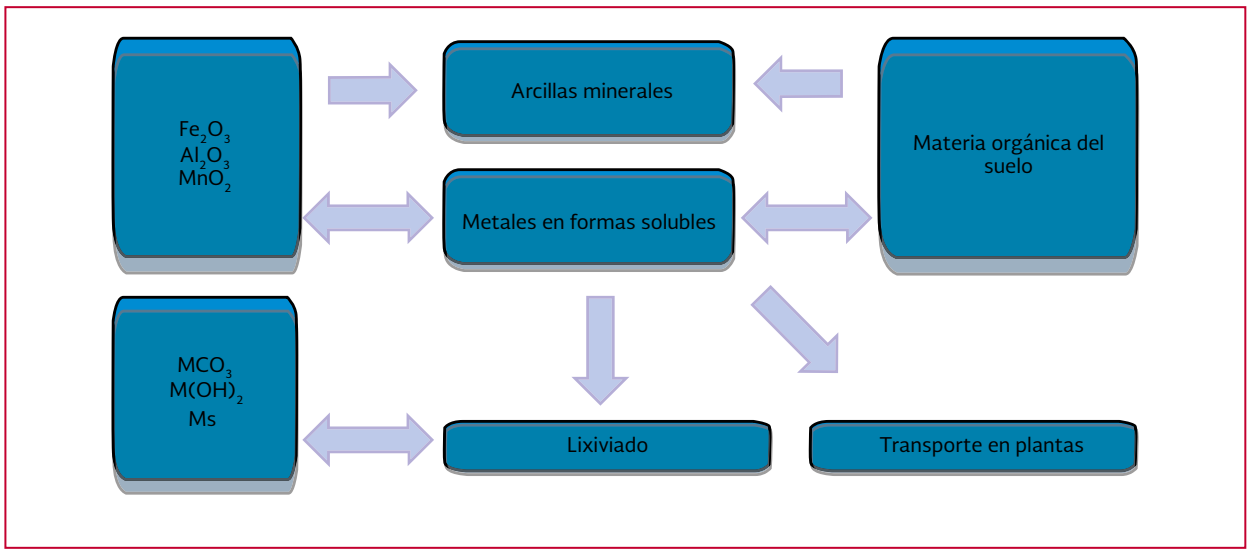
$$Cd < Ni < Zn < Cu < Pb$$

El mecanismo de sorción de los ácidos húmicos (fracción orgánica del suelo de alto peso molecular) a pH 5.8 sigue el siguiente orden: Ni < Cd < Cu (Kendorf, 1980). Metales como el cadmio y níquel no son tan fuertemente retenidos por el suelo y tienden a ser más móviles que el cobre.

Metales como el mercurio y el selenio forman compuestos en suelos pobremente drenados a través de procesos microbianos y escapan a la atmósfera.

El boro es un elemento esencial para las plantas, el rango entre la deficiencia y toxicidad es un poco estrecho para muchos cultivos. La irrigación con efluentes con gran cantidad de boro puede causar daño a algunos cultivos. El boro es adsorbido por algunos coloides del suelo.

Ilustración 13.8 Destino de los metales pesados en el suelo



Compuestos orgánicos

Los compuestos orgánicos incluyen: hidrocarburos aromáticos polinucleares, fenoles clorinados, pesticidas, bifenil polibrominados (BPB), bifenil policlorinados (BPC) y otros materiales tóxicos (OMOE/OMAF, 1981). Muchos de estos compuestos resisten la biodegradación por lo que persisten en el lodo y agua residual.

Los compuestos orgánicos se consideran potencialmente peligrosos para la cadena alimenticia por las siguientes razones:

- Por tener baja solubilidad y poca movilidad en el suelo
- Ser resistentes a la degradación microbiológica
- Ser bioacumulables en tejidos y grasa
- Penetrar a la cadena alimenticia (del suelo a las plantas, de las plantas a los animales)
- Ser altamente tóxicos a los mamíferos (carcinogénicos, mutagénicos y teratogénicos)

Una vez aplicados en el suelo las sustancias orgánicas están sujetas a la foto-oxidación, volatilización y biodegradación que pueden alterar su estructura y disminuir su toxicidad.

13.1.3.8. Factores reguladores de contaminantes en el suelo

El suelo tiene propiedades que le permiten regular la toxicidad de los contaminantes, como son el pH, capacidad de intercambio catiónico y materia orgánica. Otras características físicas del sitio de disposición que den ser consideradas son la topografía y la distancia del terreno a las fuentes de agua más cercana.

Entre los principales se encuentran el pH, la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónica. Otros que influyen son la temperatura, las sales solubles, la adición de quelatos solubles, la humedad, la fertilidad y la actividad de los organismos.

Concentración de hidrógeno (pH)

El potencial de hidrógeno controla la disponibilidad de los metales al influir en los mecanismos de remoción de contaminantes. El mecanismo dominante para los catiónes metálicos cuando el pH<5 es el intercambio o adsorción, cuando el pH>6, es la precipitación (Davis L., 1992).

En la Ilustración 13.9 se observa la disponibilidad de los elementos con respecto al pH. Con excepción del molibdeno y el selenio, todos los microelementos son más asimilables por las plantas con menos potencial de hidrógeno.

Las aplicaciones sucesivas de lodo residual a suelos neutros o ligeramente ácidos tienden a disminuir el pH, dependiendo del contenido de $CaCO_3$ en el lodo. La oxidación de la materia orgánica y el contenido de sulfuros en los lodos aumentan la acidez del suelo.

Sin embargo la capacidad amortiguadora de la materia orgánica contenida en los lodos tiende a aminorar estos efectos.

En los suelos calcáreos las aplicaciones repetidas de lodo tienden a reducir el pH (Council for Agricultural Science and Technology, 1980).

El nivel de pH es mantenido con un encalado periódico. (Chaney 1978), encalaron suelos ácidos que habían recibido lodo por cuatro años y encontraron que se redujo el transporte de cadmio.

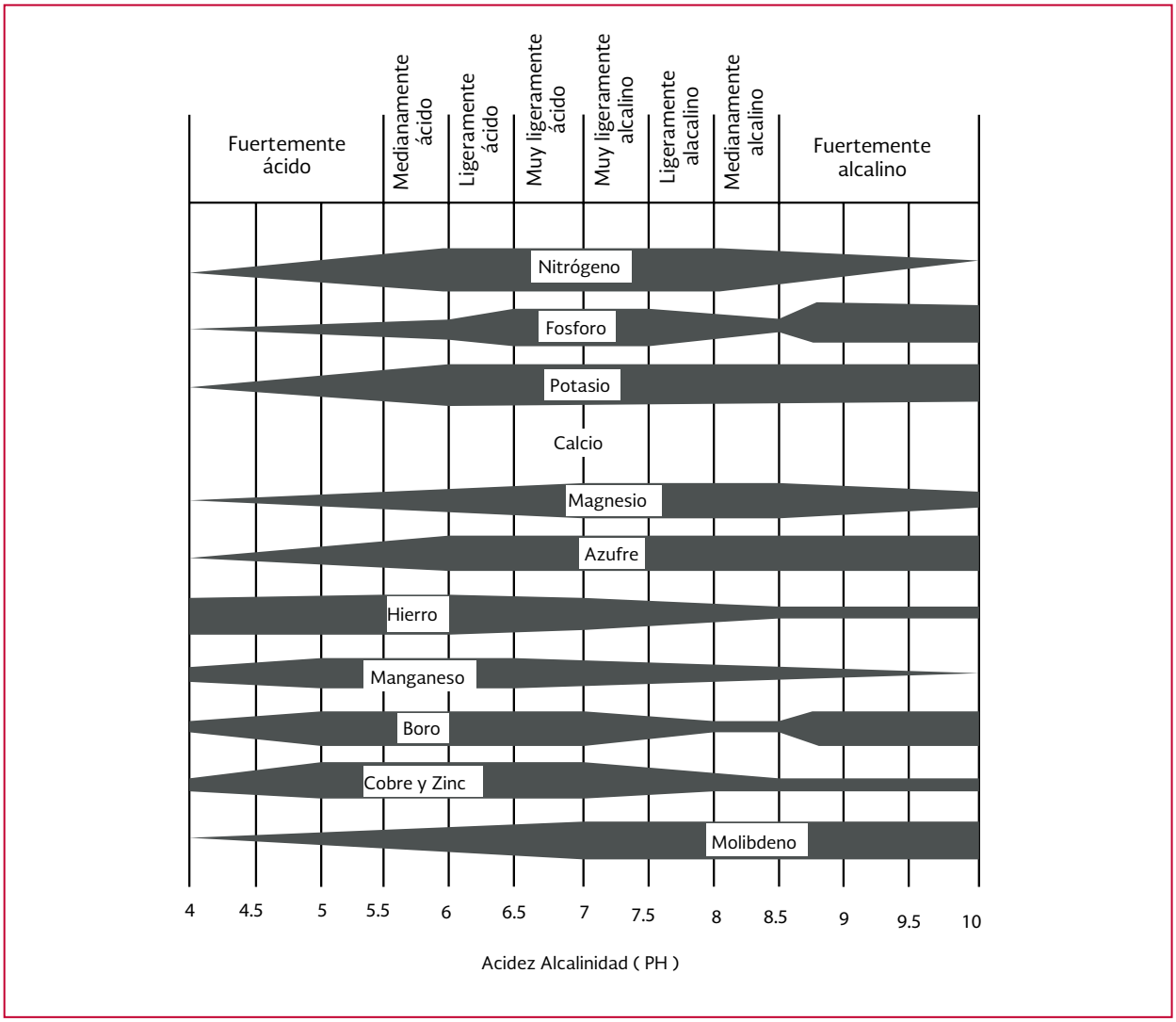
El pH de la rizosfera también es importante en la absorción de metales pesados. Cuando las raíces absorben NH_4+, el pH de la rizosfera disminuye facilitando la entrada de metales, y cuando las raíces absorben NO_3, el pH se eleva.

Debido a esta disponibilidad de metales a pH bajos, se realizaron investigaciones para saber qué valor de pH del suelo se considera como aceptable para el control de éstos. (Chaney,1973), encontró que a un pH de 6.5 su asimilación por las plantas disminuía. Actualmente este valor es el requerido por la (EPA, 1986), en la mezcla lodo-suelo para la aplicación de lodo en el suelo donde se van a sembrar cultivos comestibles. El pH de la mezcla lodo suelo (hasta 15 cm de profundidad), debe ser controlado para evitar problemas de fototoxicidad.

Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónica (CIC), es un indicador de la capacidad para intercambiar

Ilustración 13.9 Disponibilidad de los elementos con relación al pH



catíones del suelo por aquellos contenidos en los residuos que son aplicados. Entre más grande sea el valor de la CIC más catíones retiene.

La CIC depende de la cantidad y clase de arcillas que en su contenido incluyan hidróxidos, particularmente óxidos de hierro fosfatos y carbonatos. Estos compuestos precipitan metales pesados fuera de la solución del suelo impidiendo su paso a otras capas.

Además la CIC, junto con la materia orgánica, controla la toxicidad de los metales pesados en las plantas. Forman quelatos, principalmente con el cobre y níquel, los compuestos formados son estables y constituyen una fuente de energía potencial.

Las arcillas minerales tienen una CIC de 10-150 meq/100 g, la materia orgánica de 200 a 400 meq/100 g (Potash and Phosphate Institute, 1979).

La capacidad de intercambio catiónica proporciona un equilibrio o un poder amortiguador con respecto a la acumulación de metales en el suelos agrícolas.

En la Tabla 13.7, se observan los límites máximos de metales para suelos con diferentes tipos de capacidad de intercambio catiónica.

Tabla 13.7 Concentraciones máximas (kg/ha) de metales, permitidas en la aplicación al suelo de acuerdo a su capacidad de intercambio catiónica

Metal	Capacidad de intercambio catiónica (meq/100 g)		
	0-5	5-15	15
Cadmio	5	10	20
Níquel	50	100	200
Cobre	125	250	500
Zinc	250	500	1 000
Plomo	500	1 000	2 000

Los límites del cadmio están contenidos en la norma (40 CFR Parte 257). La aplicación anual de cadmio no se aplican sólo a suelos cuyo pH haya sido ajustado a 6.5 cuando el lodo es aplicado, y no menos de 6.5 después de la aplicación.

Fuente: (Environmental Protection Agency, 1988b)

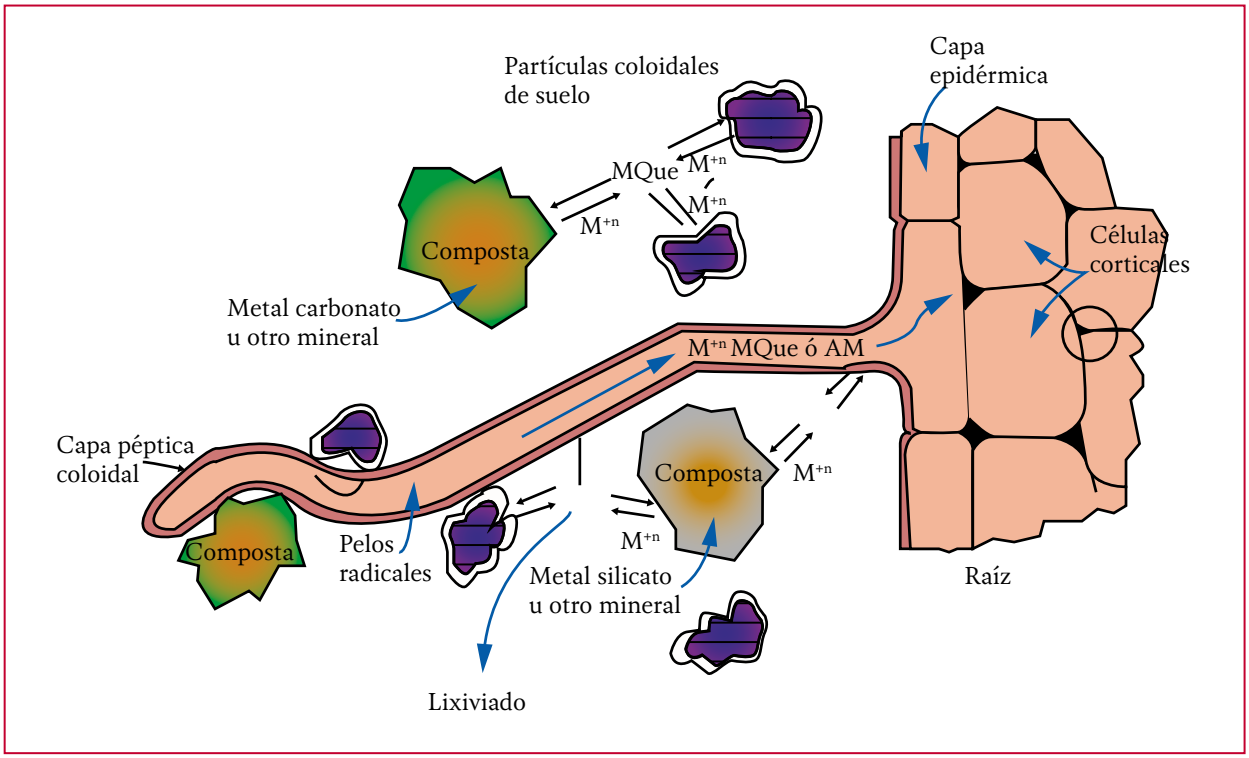
Materia orgánica

Se debe tomar en cuenta el contenido de materia orgánica en el suelo debido a que se ha encontrado que regula la disponibilidad de metales que son absorbidos por las plantas. Entre mayor sea su contenido en el suelo, podrá ser capaz de recibir más cantidad de lodo. Sin embargo no es un parámetro regulado por alguna normatividad.

La materia orgánica del suelo y lodo o composta, enlaza metales a través de:

1. El intercambio de cationes monovalentes como son el Na+, K+, formando sales con grupos R-COOH
2. A través de la formación de complejos organometálicos

Ilustración 13.10 Reacciones de la materia orgánica con los metales pesados y la asimilación de estos por las plantas



La estabilidad de los compuestos formados es diferente. (Stevenson, 1972), estudió los complejos metal orgánicos de los nutrientes traza, a pH 5, obtuvo la siguiente secuencia de estabilidad:

Cu>Pb>Fe>Ni>Mn>Co>Zn

En la Ilustración 13.10 muestra las reacciones de la materia orgánica contenida en el lodo o la composta con los metales pesados y la asimilación de éstos por las plantas.

Influencia de los microorganismos en la disponibilidad de contaminantes

La biomasa microbiana puede también enlazar metales (Alexander Martín., 1980). Las bacterias, actinomicetos y hongos requieren de micronutrientes como las plantas superiores y llegan a competir con éstas.

Los microorganismos tienen dos funciones opuestas en la disponibilidad de los metales en el suelo, por una parte ayudan a destruir substancias bioquímicas quelantes volviendo disponibles los nutrientes y por otra parte inmovilizan estos mismos elementos cuando los niveles no son óptimos.

Por lo tanto los suelos que tienen una mayor actividad biológica pueden presentar mayor eficiencia para la remoción de contaminantes.

Barrera suelo-planta

(Chaney, 1980), introdujo el concepto “barrera suelo-planta” de acuerdo a la toxicidad provocada por la aplicación de lodo residual al suelo. Esta barrera protege a la cadena alimenticia de la toxicidad de los microelementos mediante uno o más de los siguientes procesos:

1. Insolubilidad de los elementos en el suelo para prevenir la absorción por las plantas
2. Inmovilidad de algunos elementos en las raíces previniendo la translocación a los tejidos comestibles de las plantas. Por ejemplo, el plomo y el mercurio son insolubles y permanecen enlazados en las fibras de las raíces y no pueden subir a las partes comestibles. El mercurio puede ser transportado del suelo al follaje de la planta, sólo por volatilización
3. Fitotoxicidad es una alta sensibilidad de la planta a algún elemento, actúa con bajas concentraciones de metales que no son perjudiciales a los animales pero sí a las plantas

De los elementos comúnmente encontrados en el lodo, sólo el Zn, Cu, Ni y Mn son los que pueden causar problemas de fototoxicidad. Por ejemplo, cuando las plantas tienen de 50 a

100 ppm de níquel en sus hojas, existe una reducción del 2 por ciento en la producción del cultivo. Sin embargo la toxicidad en el ganado no ocurre hasta cuando es alimentado con 200 ppm en un período prolongado.

El Zn y Mn pueden provocar daños a las raíces y producir clorosis en las hojas maduras, además reducen el crecimiento de las plantas.

En la Tabla 13.8, se observa la sensibilidad de diferentes cultivos a las dosis de metales pesados.

Tabla 13.8 Sensibilidad de cultivos a metales pesados

Muy sensibles (1)	Sensibles (2)	Tolerantes (3)	Muy tolerantes (4)
Acelga	Mostaza	Coliflor	Maíz
Lechuga	Col	Pepino	Césped
Betabel	Espinacas	Calabacita	
Zanahoria	Brócoli	Avena	
Nabo	Rábano		
Cacahuate	Tomate		
Trébol	Soya		
Alfalfa			

Daño en un 10 por ciento con alta dosis de metales con un pH 6.5 y con un pH 5.5.

Daño en un 10 por ciento con una alta dosis de metales con un pH 5.5 pero no con pH 6.5.

Daño en 25 por ciento con una alta dosis de metales con un pH 5.5 pero no con pH de 6.5, y no en 10 por ciento.

Sin daño aún con 25 por ciento de aplicación elevada de metales con pH 5.5.

Fuente: (Chaney, 1983)

La barrera "suelo-planta" no protege la cadena alimenticia de todos los elementos tóxicos. Por ejemplo el Cd es absobido por los cultivos sin ningún perjuicio, pero cuando los animales consumen estos vegetales resultan perjudicados en su salud.

Por otra parte algunos elementos son insolubles y la salud animal no está en peligro, aun si el suelo es ingerido, por ejemplo: Zr, Ti, Al, Sn y Si.

13.1.3.9. Criterios de aplicación de lodo residual en suelo

Para la aplicación del lodo residual en el suelo se deben considerar los siguientes criterios:

Profundidad del acuífero

Para proteger el acuífero, sólo 10 estados de la Unión Americana tienen restricciones para la aplicación del lodo.

Maryland y Wyoming 0.6 m, Massachusetts y Nevada 1.22 m, California 1.52 m, New Hampshire y Vermont 1.83 m, Colorado 3.05 m, Minnesota requiere de 0.20 m de capacidad de retención de agua arriba de la altura estacional del espejo del agua. Carolina del Sur exige consideraciones sobre la hidrogeología para establecer las condiciones de diseño del sistema de disposición.

Estas restricciones evitan que las aplicaciones del lodo no controladas provoquen un exceso de contaminantes disponibles en el primer o segundo año después de su aplicación.

Un acuífero estacional requiere de menor protección. Para lograr una protección adicional, si el acuífero está inmediatamente bajo el sitio de aplicación se deberá considerar el monitoreo que se marca en la 40 CFR Parte 257. Éste requiere de que la aplicación del lodo no contamine el acuífero, que es una fuente de agua de consumo humano con:

- Nitratos en concentraciones iguales o mayores que 10 miligramos por litro
- Sólidos disueltos mayores de 10 000 miligramos por litro

Tabla 13.9 Porcentajes de pendientes para la aplicación de lodo residual

Pendiente	Comentarios
0-3 por ciento	Es ideal, no es propicia para escurrimientos o erosión del lodo líquido o con un porcentaje de sólidos mayor.
3-6 por ciento	Aceptable, riesgo ligero de erosión. Se requiere que el lodo sea inyectado en el suelo, si es líquido, excepto en aquellos casos en que el terreno tiene un drenaje deficiente. Es más recomendable la aplicación de lodo desaguado.
6-12 por ciento	Se requiere que el lodo sea inyectado en el suelo, si es líquido, excepto en aquellos casos en que el terreno tiene un drenaje deficiente. Es más recomendable la aplicación de lodo desaguado.
12-15 por ciento	No se recomienda aplicación de lodo líquido sin un debido control de escurrimientos, es más recomendable la aplicación de lodo desaguado, pero con su inmediata incorporación al suelo.
>15 por ciento	Pendientes mayores de 15 por ciento son recomendables sólo cuando el suelo tiene una buena permeabilidad y donde la longitud de la pendiente es corta y constituye la menor parte del área total de aplicación.

Fuente: (Environmental Protection Agency, 1988b)

Tabla 13.10 Condiciones requeridas para la zona amortiguadora

Aplicación de lodo Método/Zona amortiguadora Condiciones	Tipo de cuerpo de agua			
	Grande con flujo continuo	Pequeño tributario	Efímero	Zanja
1.-Aplicación superficial:				
Zona amortiguadora sin perturbar	6 096 m	3 048 m	1 524 m	762 m
Zona amortiguadora perturbada	6 096 m	6 096 m	3 048 m	1 524 m
2.-Lodo inyectado/incorporado	3 048 m	3 048 m	1 524 m	762 m

(Environmental Protection Agency, 1988b)

Distancia de los sitios de aplicación a aguas superficiales

Para proteger las aguas superficiales de la contaminación que pudiera ocasionar la aplicación de lodo en el suelo, en la Tabla 13.9 se tienen varias recomendaciones relacionadas con la pendiente del sitio.

La aplicación a sitios forestales con una buena cubierta vegetal y pendientes que no excedan de 30 por ciento es aceptable, se debe prohibir la aplicación del lodo en la estación húmeda en sitios con una pendiente mayor de 15 por ciento.

Para evitar el escurrimiento del lodo hacia el agua superficial se requiere de un área amortiguadora entre el área de aplicación del lodo y los cuerpos de agua. Esta área tiene dos propósitos:

- Proveer de un factor de seguridad contra errores durante la aplicación del lodo
- Proveer de un tratamiento y filtrado del lodo y/o escurrimiento del lodo que ha sido aplicado en la superficie

El tipo de suelo del área amortiguadora es un factor en la determinación del tamaño del área. Por ejemplo, un suelo alterado no provee de un filtro amortiguador, mientras que un bosque no perturbado ofrece un excelente tratamiento.

Así el tamaño del área amortiguadora (Tabla 13.10), depende del método de aplicación del lodo, el agua superficial que está siendo protegida y la condición del suelo superficial.

Distancia a pozos

Con el fin de proveer un margen de seguridad para los pozos que abastecen zonas urbanas o agrícolas, se deberá considerar una distancia mínima del sitio de aplicación al pozo más cercano de 300 a 1 500 pies (91.44 a 457.2 m), (Environmental Protection Agency, 1988b).

Planicies de inundación

EPA (1980) recomendó que para evitar cualquier contaminación provocada por la aplicación del lodo a tierras de inundación, éste debería ser incorporado dentro del suelo y garantizar una rápida reforestación del sitio. Posteriormente para proteger las aguas superficiales y el acuífero se prohibió la aplicación de lodo en suelos inundables (Environmental Protection Agency, 1988b).

Limitaciones estacionales

(Environmental Protection Agency, 1988b), recomienda que la aplicación del lodo no deberá llevarse a cabo durante los eventos de tormenta cuando la precipitación excede de ¼ de pulgada por hora (0.63 cm). También se aplica a suelos congelados o cubiertos por nieve.

Por otra parte, si se combinan restricciones de pendientes y control de escurrimientos se protege el agua superficial.

Proximidad a áreas recreativas

Se debe prohibir la aplicación del lodo, que no ha sido tratado por un proceso de reducción adicional de patógenos PRAP (Lodo clase A), a 300 pies (91.44 m) en áreas usadas para el público. Así mismo se deben poner señales para establecer que se ha aplicado lodo.

El lodo que ha sido tratado por un PRAP (lodo clase A) no requiere de área amortiguadora o control de acceso.

13.1.4. Criterios de diseño para la aplicación de lodos residuales en suelos agrícolas

Para el uso agrícola se asume que el lodo debe ser aplicado en porcentajes agronómicos, (Environmental Protection Agency., 1986). Estos son definidos como los porcentajes de composta anual, en el cual el nitrógeno y/o fósforo suministrados y disponibles al cultivo, no excedan los requerimientos anuales de ese cultivo. Esta recomendación es válida siempre y cuando la concentración de contaminantes presentes en los lodos no exceda las normas. De no ser así se deben considerar las recomendaciones hechas para cada tipo de contaminante y las proporciones en que se encuentra.

13.1.4.1. Nitrógeno y fósforo

Para calcular la cantidad de nitrógeno y fósforo que deben ser aplicados en el suelo se consideran los valores en porcentaje de nitratos (NO_3^-), ión amonio (NH4+) y nitrógeno (N_0) del lodo. Se debe tomar en cuenta que a diferencia de los fertilizantes minerales, en el lodo ocurre un proceso de mineralización que provee de nitrógeno durante el primer año y los años subsecuentes.

Procedimiento para calcular la cantidad de lodo que puede ser aplicado al suelo de acuerdo a porcentajes agronómicos:

$$N_d = C[(NO_3) + Kv(NH_4) + F(0-1)(N_0)] * 10$$

Ecuación 13.4

donde:

N_d = Contenido de nitrógeno en el lodo, kg ha^{-1}

C = Composta disponible, aquí se asume 1 t

NO_3 = Porcentaje de nitrato en el lodo

K_v = Factor de volatilización 1.0, suponiendo que el lodo es incorporado al suelo y de esa manera se evita la pérdida de nitrógeno amoniacal por volatilización, que podría llegar a ser hasta del 50 por ciento, lo cual alteraría este factor

NH_4 = Porcentaje de ión amonio

F = Factor de mineralización para el nitrógeno orgánico en el primer año, expresado como una fracción. Para la composta es de 10 por ciento

N_0 = Porcentaje de nitrógeno orgánico

Si asumimos los siguientes valores para una composta tenemos que:

$NO_3 = 0$
$NH_4 = 2.5$ *por ciento*
$N_0 = 5$

El desarrollo sería:

$$Nd = 1\ [\ (0) + 1\ (2.5) + \ (0.1)\ (5.0)\ ]\ 10 = 30\ kg/Nd/t$$

Como el lodo que es aplicado sigue un proceso de mineralización durante el primer año y los subsecuentes, se debe calcular el nitrógeno remanente y considerarlo en las siguientes aplicaciones.

Asumimos como en el ejemplo anterior que tenemos 1 tonelada de lodo con 5 por ciento de nitrógeno orgánico, los factores para la mineralización del lodo son los siguientes:

Tabla 13.11 Factores de mineralización

Año	F
0-1	0.10
1-2	0.05
2-3	0.03

Tenemos entonces que el nitrógeno remanente puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$N_0 = (0.05)(1\,t\ \ /ha)(1\,000\ kg\,t^{-1}) = 50\ kg/ha$$

Ecuación 13.5

Proceso de mineralización en tres años:

Nitrógeno orgánico	
Primer año =	(0.10) (50 kg/ha) = 5 kg/ha
Segundo año =	50 – 5 = 45 (0.05) (45) = 2.25 kg/ha
Tercer año =	45 – 2.25 = 42.75 (0.03) (42.75) = 1.3 kg/ha

De acuerdo a los requerimientos de nitrógeno de un cultivo dado y el nitrógeno en la composta se pueden calcular las toneladas de composta que es necesario aplicar:

$$Lodo/hectarea = \frac{N-requerido(kg/ha/año)}{N-disponible(kg\ \ t^{-1})}$$

Ecuación 13.6

Si se asume que un cultivo de maíz requiera de 190 kg de nitrógeno por hectárea por año y el lodo que se va a aplicar tiene 30 kg de Nd por tonelada tenemos que:

$$Lodo/ha = \frac{190\,kg\ \ N/ha/año}{30\,kg\ \ Nd/t} = 6.33\,kg\,lodo/ha\,año$$

Ecuación 13.7

La dosis de lodo puede ser calculada para el fósforo siguiendo el mismo procedimiento:

$$Lodo(t/ha) = \frac{P-requerido(kg/ha/año)}{P-disponible(kg\ \ t^{-1})}$$

Ecuación 13.8

13.1.4.2. Aplicación de acuerdo a la concentración máxima de contaminantes

Para no superar los niveles de concentración considerados en la normatividad, se calcula la dosis de lodo de acuerdo a la siguiente ecuación modificada de Lester 1987a:

$$Lodo/ha = \frac{(N-n)(P)}{(F)(T)(A)}$$

Ecuación 13.9

donde:

- N = concentración máxima permisible de cada elemento en el suelo (ppm o mg/kg)
- n = concentración del elemento en el suelo (ppm o mg/kg)
- P = peso de una hectárea de suelo, considerando una densidad aparente de 1 g/mL y una profundidad de 20 cm (se expresa en toneladas)
- F = frecuencia anual de aplicación de lodo
- T = concentración de cada elemento en el lodo (ppm o mg/kg)
- A = número de años de aplicación del lodo

13.1.4.3. Ejemplos de aplicación

En esta sección se presentan ejemplos de aplicación de acuerdo a la metodología de la Universidad de Valladolid (UVA, 1999):

Ejemplo de aplicación 1:

Aplicación en un suelo básico (pH>7) cuyo análisis indica contenidos bajos de fósforo y potasio, y sobre el que se desea implantar un cultivo cuyas necesidades nutritivas son:

450 kg de nitrógeno por hectárea	200 kg de P_2O_5 por hectárea	200 kg K_2O por hectárea

Primer paso.-Se deben conocer las características de los lodos, en la Tabla 13.12 se presentan las características del lodo para este ejemplo.

Tabla 13.12 Características del lodo residual para el ejemplo 1

Parámetro	Valor	Metales	Valor	kg
Humedad	80.0	Cadmio (ppm)	< 1	
M. orgánica (por ciento)	60.0	Cromo (ppm)	31.4	31.4 x10^{-6}
pH	6.9	Cobre (ppm)	379	379 x10^{-6}
Nitrógeno (por ciento)	3.56	Mercúrio (ppm)	1.02	1.02 x10^{-6}
Relación C/N	7.3	Níquel (ppm)	32.2	32.2 x10^{-6}
Fósforo (por ciento P_2O_5)	4.04	Plomo (ppm)	225	225 x10^{-6}
Potasio (por ciento K_2O)	0.22	Cinc (ppm)	1,310	1,310 x10^{-6}

Se observa que los contenidos en metales pesados son menores que los establecidos por la (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002), para que un lodo pueda aplicarse a un suelo agrícola.

Segundo paso.-Determinación del factor limitante y cálculo de la cantidad de lodos que se debe aplicar. Se denomina factor limitante a aquel parámetro cuya concentración limita la cantidad de lodos que puede aplicarse. Para su determinación debe calcularse la cantidad de lodos necesaria para satisfacer las necesidades del cultivo en nitrógeno y fósforo, que son los nutrientes que se encuentran en los lodos en mayor cantidad relativa y las cantidades máximas de metales pesados que deben aplicarse anualmente a un suelo.

1.-<u>Cálculo de la dosis, tomando como base las necesidades de Nitrógeno:</u>

$$\frac{450\ kg\ N\ requerido/ha}{3.56\ kg\ N\ en\ el\ lodo/100\ \ g\ m.s.} = 12\ 640\ kg\ m.s./ha$$

2.-<u>Cálculo de la dosis, tomando como base las necesidades de fósforo:</u>

$$\frac{200\ kg\ P_2O_5 requerido/ha}{4.04\ kg\ P_2O_5\ en\ el\ lodo/100\ kg\ m.s.} = 4\ 950\ kg\ m.s./ha$$

3.- <u>Cálculo de la dosis, tomando como base cada uno de los metales pesados de la norma:</u>

Cromo

3.0 kg Cr ha año /31.4 .10^{-6} kg Cr/kg en el lodo (m.s.) = 95 541 kg m.s./ha

Cobre

12 kg Cu/ha año / (379. 10^{-6}) kg Cu/kg en el lodo (m.s.)= 31 662 kg m.s./ha

Mercurio

0.10 kg Hg/ha año / (1.02.10^{-6}) kg Hg/ kg m.s. = 98 039 kg m.s./ha

Níquel

3.00 kg Ni/ha año / (32,2.10^{-6}) kg Ni/ kg m.s. = 93 168 kg m.s./ha

Plomo

kg Pb/ha año / (225. 10^{-6}) kg Pb/kg m.s. = 66 667 kg m.s./ha

Cinc

30 kg Zn/ha año / (1 310.10^{-6}) kg Zn/ kg m.s. = 23 059 kg m.s./ha

Se observa que el elemento cuyas necesidades quedan cubiertas con la menor cantidad de lo-

dos es el fósforo (todos los lodos de depuradora tienen elevados contenidos en fósforo), sin embargo, debido a los procesos de inmovilización, absorción y precipitación que experimenta el fósforo en el suelo, en este caso, se tomaría como factor limitante el nitrógeno, es decir, se decidirá aplicar:

12 640 kg m.s./ha

Tercer paso.- Calculo del complemento mineral

Nutrientes aportados con los lodos

$$12\,640\ kg\ m.s./ha\left(\frac{3.56\ kg\ N\ lodo}{100\ kg\ m.s.}\right)=337.5\ kg\ N/ha$$

Se supone para el nitrógeno de los lodos una eficacia del 75 por ciento.

$$12\ 640\ kg\ m.s./ha\left(\frac{4.04\ kg\ P_2O_5 lodo}{100\ kg\ m.s.}\right)=511\ kg\ P_2O_5$$

$$12\ 640\ kg\ m.s./ha\left(\frac{0.22\ kg\ P_2O_5\ lodo}{100\ kg\ m.s.}\right)=28\ kg\ K_2O$$

Complemento mineral:

Nutriente	Requerimiento del cultivo	Lodo	Complemento mineral
	kg		
Nitrógeno	450 kg	337.5	112.5
P_2O_5	200 kg	511.0	nada
K_2O	200 kg	28.0	172.0

Cuarto paso.-Cálculo del aumento de materia orgánica

Este paso no es necesario, pero conviene hacerlo para estimar de qué forma el uso adecuado de los lodos de depuradora pueden ser beneficioso para el suelo en cuanto, lentamente, proporciona un aumento de su contenido en materia orgánica y, por tanto, de su fertilidad.

Materia orgánica (m.o.) que quedará en el suelo al cabo de un año:

60.0 kg m.o. valor del lodo.

Materia orgánica que quedará en el suelo al cabo de un año:

$$12\ 640\ kg\ m\ s.\frac{60\ kg\ m.o.}{100\ kg\ m.s.}(1-0.62)=2\ 882\ kg\ m.o./ha$$

$$Aumento\ de\ m.o.\ en\ el\ suelo=\frac{2\ 882\ kg\ m.o.}{3\ 000\ 000\ kg\ suelo}\ x\ 100=0.09$$

Si el nivel del suelo era de 0.60 por ciento, en un año se habrá llegado al 0.69 por ciento.

El peso de una hectárea aproximadamente es de 3 000 000 kilos, suponiendo una densidad del suelo de 1.5 g cm^{-3} y una profundidad de 20 cm.

Ejemplo de aplicación 2

Supóngase el mismo lodo que en el ejemplo anterior, pero con un contenido en cobre de 975 ppm. Al hacer los cálculos para determinar el factor limitante se encontraría:

$$\frac{12\ kg\ Cu\ ha\ año}{975\times10^{-6}\ kg\ Cu\ kg\ m.s.}\times100=0.09$$

En este caso, se deberá limitar la aportación de lodos a 12 310 kg m.s./ha y será necesario repetir el tercero paso.

Nutrientes aportados con los lodos

$$12\ 310\ kg\ m.s./ha\left(\frac{3.56\ kg\ N\ lodo}{100\ kg\ m.s.}\right)=438.2\ kg\ N/ha$$

Se supone para el nitrógeno de los lodos una eficacia del 75 por ciento.

$$12\ 310\ kg\ m.s./ha\left(\frac{4.04\ kg\ P_2O_5 lodo}{100\ kg\ m.s.}\right)=497.3\ kg\ P_2O_5$$

$$12\ 310\ kg\ m.s./ha\left(\frac{0.22\ kg\ P_2O_5 lodo}{100\ kg\ m.s.}\right) = 27\ kg\ K_2O$$

Si fueran varios los metales pesados que superan el nivel establecido, se escogerá la dosis de fango más pequeña de las distintas calculadas como se acaba de indicar. Establecida la dosis adecuada se procederá, como antes, a calcular las aportaciones de fertilizantes realizadas con el lodo y los necesarios aportes de fertilizantes minerales.

Complemento mineral:

Nutriente	Requerimiento del cultivo	Lodo	Complemento mineral
	kg		
Nitrógeno	450	438.2	12.0
P_2O_5	200	497.3	nada
K_2O	200	27.0	173.0

Ejemplo de aplicación 3

Caso de cultivos cuyo desarrollo es menor a un año. Se procederá, como se ha indicado, pero teniendo en cuenta, el tiempo que el cultivo está asimilando nutrientes.

Se va a suponer el mismo lodo que en el ejemplo 1, y como cultivo el maíz, el cual tiene un requerimiento de nutrientes de:

370 kg N/ha	150 kg P_2O_5/ ha	150 kg K_2O/ha

Determinación del factor limitante y cálculo de la cantidad de lodos que se debe aplicar

Nutrientes aportados con los lodos

Nitrógeno

$$\left(\frac{370\ kg\ N/ha}{3.56\ kg\ N/100\ kg\ m.s.}(3/2)\right) = 15\ 590\ kg\ N/ha$$

Nitrógeno de los lodos con una eficacia del 75 por ciento.

Fósforo

$$\left(\frac{150\ kg\ P_2O_5/ha}{4.04\ kg\ P_2O_5/100\ kg\ m.s.}\right) = 3\ 713\ kg\ m.s.$$

Potasio

$$\left(\frac{150\ kg\ K_2O/ha}{0.22\ kg\ K_2O\ ha/100\ kg\ m.s.}\right) = 68\ 182\ kg\ K_2O$$

Cálculo de la dosis, tomando como base cada uno de los metales pesados recogidos en la Ley

Cromo

3.00 kg Cr/ha año / (31.4 .10^{-6}) kg Cr/ kg m.s. = 95 541 kg m.s./ha

Cobre

12 kg Cu/ha.año / (379 . 10^{-6}) kg Cu/ kg.m.s.= 31 662 kg m.s./ha

Mercurio

0.10 kg Hg/ha.año / (1.02.10^{-6}) kg Hg/ kg m.s. = 98 039 kg m.s./ha

Niquel

3.00 kg Ni/ha.año / (32,2.10^{-6}) kg Ni/ kg m.s. = 93 168 kg m.s./ha

Plomo

15 kg Pb/ha.año / (225. 10^{-6}) kg Pb/kg m.s.) = 66 667 kg m.s.

Cinc

30 kg Zn/ha.año / (1 310.10^{-6}) kg Zn/ kg m.s. = 23 059 kg m.s.

Sigue siendo el N el factor limitante. Por lo tanto, deberán aplicarse: 15 590 kg m.s. / ha

Cálculo del complemento mineral

Nutrientes aportados con el lodo

Nitrógeno = 15 590 kg m.s./ha (3.56 kg N/100 kg m.s.).0.75 = 417.4

Fósforo = 15 590 kg m.s./ha × (4.04 kg P_2O_5/100 kg m.s.) = 630 kg P_2O_5/ha
Potasio = 15 590 kg m.s./ha × (0.22 kg K_2O/100 kg m.s.) = 34.3 kg K_2O/ha

Complemento mineral

Cantidad de N = 370 x 0.25 = 104.35 kg N/ha
Cantidad de P_2O_5 = Nada
Cantidad de K_2O = 200 – 34.3 = 165.7 kg

Justificación del método de cálculo empleado

Hay investigadores que evalúan la eficacia sólo del N orgánico existente en los lodos, pensando que el N amoniacal y nítrico es igualmente asimilable que el aportado por el nitrato amoniacal. El cálculo que debe de realizarse, a partir de esos datos es calcular la cantidad de nitrógeno asimilable por el cultivo el primer año, son ligeramente diferentes y supone la determinación, por separado, de los contenidos en N nítrico, N amoniacal y N orgánico en el lodo.

Otros investigadores, pensando en aplicar las máximas cantidades posibles de lodos, hacen los cálculos de dosis de forma que no sea necesario ningún tipo de abono mineral nitrogenado. Puesto que todas nuestras experiencias, de acuerdo con lo que se indica en la bibliografía señalan que los rendimientos son mayores cuando se combina fertilización nitrogenada orgánica y mineral, consideramos más oportuno el procedimiento de cálculo que se ha expuesto, por una parte, porque permite esa combinación de fertilización nitrogenada y, por otra, porque disminuye los excesos de P y las cantidades de metales pesados aportadas anualmente.

Hasta ahora las dosis de lodos siempre se han dado en materia seca (m.s.), si se desea pasar a peso húmedo de lodos, será necesario multiplicar por 100/(100 – H), siendo H el contenido de humedad en tanto por ciento.

Por último, para años sucesivos habría que tener en cuenta que, con la misma dosis, la cantidad de nitrógeno que estará a disposición del cultivo es mayor. En el segundo año el nitrógeno disponible para el cultivo será el 75 por ciento del aplicado más el procedente de la mineralización del nitrógeno orgánico que quedó en el suelo el año anterior. Sin embargo, puesto que esa cantidad en nuestras condiciones de clima y suelo no es excesiva, en una primera aproximación, se puede despreciar.

13.1.4.4. Suelo forestales

Árboles de crecimiento lento

Debido, principalmente, a la enorme cantidad de lodos que se obtienen diariamente y a que la aplicación de lodos en suelos cultivados sólo puede llevar a cabo en determinados momentos, se está ensayando la utilización de lodos en suelos con vocación forestal. En estos suelos, por otra parte, se piensa que es posible la aplicación de una mayor cantidad de lodos de una sola vez. De todas formas se hectárea encontrado que en necesario vigilar posible lixiviaciones de nitratos; es importante conocer la hidrología de la zona. En líneas generales se puede decir que la mayor parte de los ensayos indican que la dosis óptima se encuentra alrededor de los 150 t/h, obteniéndose, en general, peores resultados con aplicaciones superiores.

Árboles de crecimiento rápido

Recientemente se ha empezado a considerar que los lodos podrían jugar un papel importante en el cultivo de árboles de crecimiento rápido. En general, se aconseja la aplicación de lodos varias veces a lo largo del cultivo y en dosis que no superen la aportación de más de 250 kg N/ha.

13.1.4.5. Ejemplos de aplicación agrícola de lodo residual en México

Introducción

En México se requiere de tecnología para el aprovechamiento de los lodos, en cuyo desarrollo y adaptación estén considerados los siguientes aspectos:

- Reducción del volumen del lodo
- Eficiencia en la estabilización del componente orgánico
- Eficiencia en la reducción de contaminantes
- Aprovechamiento de la materia orgánica y los nutrimentos que contienen estos residuos

La idea de considerar al lodo como un desecho y llevarlo a un relleno sanitario ha sido gradualmente abandonada en muchos países, actualmente se ha cambiado el manejo del lodo hacia el aprovechamiento, considerándolo no como un residuo, sino como un material de recuperación para el suelo y fertilizante orgánico para vegetales.

El uso del lodo en agricultura es importante debido a que los lodos municipales tienen un gran contenido de nutrimentos y materia orgánica, por otra parte la problemática del campo en México acerca del empobrecimiento del suelo por el uso agrícola intensivo (Ilustración 13.11), muestra al lodo como una alternativa para su uso en el acondicionamiento de suelo, sin embargo es necesario el control de las aplicaciones de lodo mediante una normatividad que incluya no sólo los límites máximos, sino también prácticas agronómicas adecuadas, que protejan la salud humana, el medio ambiente y la producción agrícola.

Otra problemática que el uso del lodo puede ayudar a contrarrestar es la relacionada a la ex-

Ilustración 13.11 Prácticas de aplicación agrícola no recomendables, se deben proteger los cuerpos receptores y dosificar adecuadamente el lodo residual

plotación de suelos forestales que son utilizados para la producción de especies ornamentales en viveros.

Para promover el uso de lodos en México las autoridades normativas han seguido la siguiente estrategia:

- Modificación de aspectos esenciales de la (Norma Oficial Mexicana NOM-052, 2005) la cual también establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos, en este nuevo proyecto no se incluyen como residuos peligrosos los lodos residuales municipales
- Elaboración de una norma en la que ya se considera a los lodos como biosólidos y no como residuos peligrosos (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002). En este proyecto de norma se considera que los lodos pueden ser de Clase A, B o C, de acuerdo a la concentración de patógenos. La Clase A es de uso no restringido y la Clase B y C son de uso restringido, esto quiere decir que los lodos de Clase A pueden ser utilizados para abonar los campos agrícolas en los que se siembre cualquier tipo de cultivo. Por el contrario los lodos de Clase B sólo pueden ser utilizados para abonar cultivos de tallo largo en los que la parte aprovechable del cultivo no entre en contacto con el suelo que es abonado con el lodo. La propuesta de norma también considera que los lodos pueden ser Excelentes o Buenos de acuerdo a la concentración de metales pesados. Los lodos Excelentes son de uso no restringido y los Buenos de uso restringido. Este tipo de clasificaciones se hace para evitar que los patógenos y metales pesados puedan entrar a la cadena alimenticia y afectar la salud humana

Si el lodo recibió un tratamiento y cumple con las características de las tablas 1 y 2 entonces se puede aplicar como un biosólido en suelos agrícolas o forestales.

Para el aprovechamiento agrícola del lodo se recomienda darle un tratamiento de estabilización y remoción de contaminantes, así como también se recomiendan su deshidratación para reducir su volumen y facilitar su manejo. Los sistemas de deshidratación más comunes son lechos de secado, filtros prensa y centrífugas. Los tratamientos de estabilización más usuales son: la estabilización aerobia, anaerobia y alcalina. Con estos sistemas de tratamiento podemos obtener lodos de Clase B y C, para uso restringido. Para obtener lodos o biosólidos de Clase A (Ilustración 13.12), se debe tener un proceso termofílico como: estabilización aerobia y anaerobia termofílicas o composteo, los cuales tienen que ser operados con temperaturas mayores a 55 ºC.

Existe otro método que es el vermicomposteo que es el uso de lombrices para estabilizar la materia orgánica. Las lombrices de la especie *Eisenia foetida* comen el lodo residual y producen un residuo conocido como vermicomposta. Mediante este proceso es posible reducir a 100 por ciento los patógenos presentes en el lodo. En este proceso no hay incremento de la temperatura, ya que trabaja a temperatura ambiente. El proceso de remoción de patógenos se logra debido a procesos de: estabilización, competencia entre microorganismos patógenos y los que llevan a cabo la degradación, depredación e ingestión de bacterias, huevos y quistes de patógenos

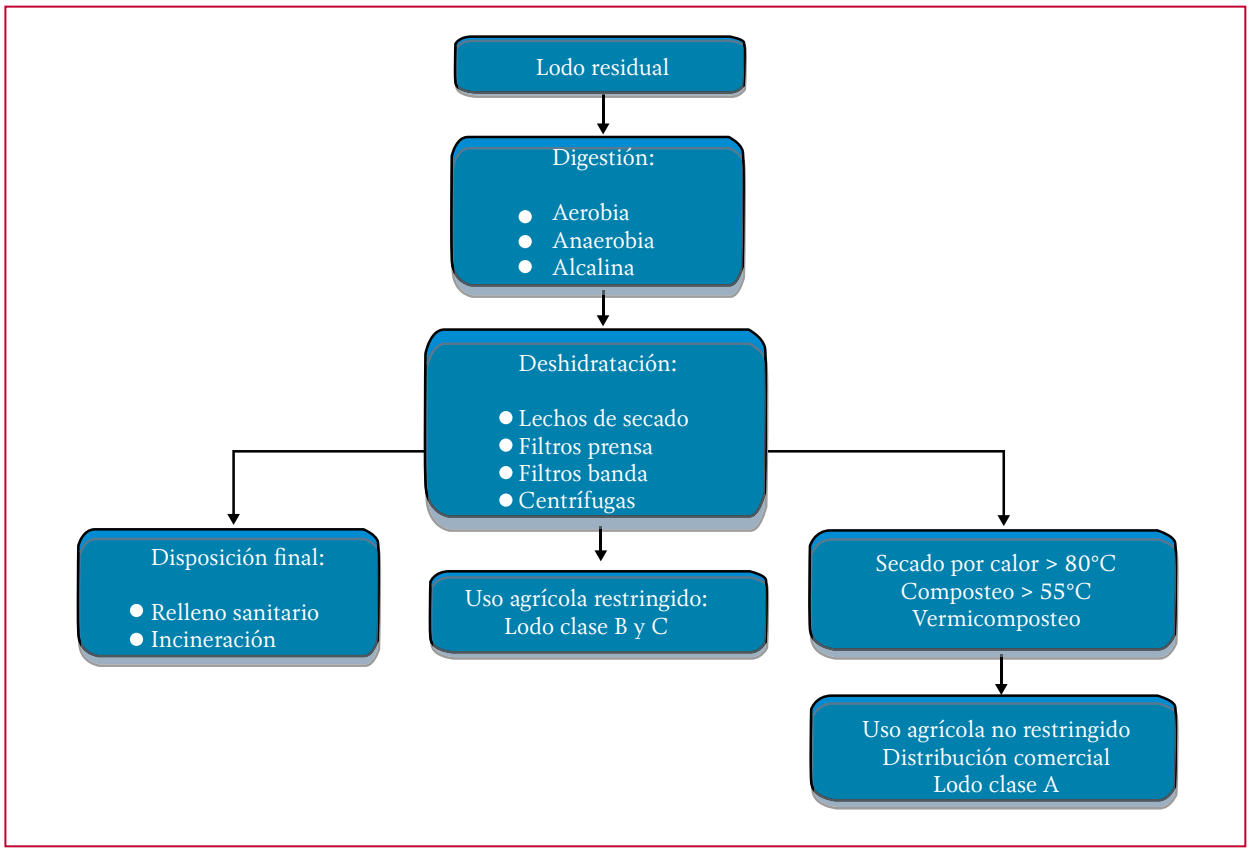
por medio de las lombrices, las cuales son microfagas.

La experiencia de la aplicación de lodos residuales en México se ha incrementado, el lodo residual ha sido usado para la producción de chile, cebolla, alfalfa, avena, maíz, cultivos forrajeros, trigo y sorgo. No hay estadísticas de la generación del lodo en las plantas de tratamiento del país, de sus características, de la tecnología de tratamiento que es usada o del aprovechamiento agrícola del lodo, pero en los ejemplos que se citan a continuación se puede apreciar el esfuerzo que llevan a cabo los diferentes organismos operadores e instituciones regionales el estudio y aprovechamiento del lodo residual.

13.1.4.6. Aprovechamiento de lodo residual en Jalisco

La Comisión Estatal del Agua (CEA) en forma conjunta con el Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias (CUCBA) de la Universidad de Guadalajara, decidieron emplear en la siembra de maíz y sorgo los lodos como abono. Llevaron a cabo el experimento en la comunidad de San Juanito el Chico, en Ocotlán, el experimento se realizó en un terreno de 900 metros dividido en dos parcelas. En una de ellas se sembró maíz y en la otra sorgo. Los terrenos fueron divididos en cuadros de 37 por 27 m y en cada uno se aplicaron seis tipos de tratamiento. En cuatro de estos tratamientos se usó lodo en diferentes can-

Ilustración 13.12 Tratamientos para obtener lodos Clase A, B y C



tidades que fueron de las 20 a 50 toneladas. Se instaló un tratamiento testigo, en el cual se llevó a cabo el procedimiento de siembra acostumbrado por los agricultores de la región. En otro tratamiento no se aplicó ni fertilizantes, ni biosólido. La investigación se reporta todavía en curso, pero se ha observado que los tratamientos con lodo llevan ventaja a los otros en altura y desarrollo de las plantas (CEA, 2011).

Por otra parte 17 de las 19 plantas de tratamiento de aguas residuales de la CEA ya trabajan con la utilización de lodos para la siembra.

Con las plantas El Ahogado (Gasto medio de 2 250 L s^{-1}) y Agua prieta (8.5 m^3 s^{-1}), se limpiarán más del 90 por ciento de las agua residuales de la ciudad de Guadalajara. El tratamiento de lodos de estas plantas consistirá en el desaguado, estabilización anaerobia y disposición en un mono relleno. Durante la estabilización anaerobia se generará energía eléctrica, (Gobierno de Jalisco, 2012).

13.1.4.7. Aprovechamiento de lodo residual en Durango

En Durango el agua residual que genera la ciudad de Durango, es principalmente doméstica, debido a la aportación de 490 524 habitantes. Este afluente genera diariamente 80 175 m^3 de volumen total de azolve de las seis lagunas de aireación. Por otra parte, hay programas de plantación forestal en Durango se han incrementado recientemente, con el fin de establecer la cubierta forestal en las áreas degradadas del bosque. La Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) en Durango, produjo 12 910 410 plantas durante el año 2002 de las cuales 2 500.000 son Agavaceas. Esto implica el uso de grandes volúmenes de sustrato para producir, lo cual eleva los costos de producción.

El Instituto Tecnológico Agropecuario Número 1 de Durango, propuso que el lodo residual composteado se considerará como un sustrato, para disminuir de bajo costo para la producción de plantas de agave que ha tomado gran auge por la denominación de origen NOM070-SCF-1994 que ha adquirido el mezcal para el estado de Durango y para resolver el problema de azolve de las lagunas. Para demostrar la factibilidad técnica de esto realizó un experimento en el que se aplicaron tres tratamientos, con tres repeticiones, Tratamiento l: Lodo fresco (40 kg); Tratamiento ll: Lodo fresco (40 kg), 10 kg de alfalfa, 10 kg de paja de avena seca, 10 kg de estiércol fresco; y Tratamiento lll: suelo agrícola del Instituto Tecnológico Agropecuario Núm. 1 (ITA Núm. 1). Las variables a evaluar fueron: número de coliformes totales y fecales antes y después del composteo, caracterización físico-química, y contenido de los principales metales pesados. Se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos, 600 NMP (número más probable) de coliformes fecales del tratamiento II después del composteo; valor bajo comparado con el de la norma para uso de servicio público con contacto indirecto (NOM 1987). Este resultado del tratamiento II demuestra la efectividad del composteo aplicado, dado que el lodo residual actuó como un inóculo más en la descomposición de la materia orgánica y en la destrucción de coliformes fecales. De acuerdo con los resultados del análisis físico químico de pH fue de 6.54 por ciento, la fertilidad en el tratamiento II encuentra el mayor porcentaje de nitrógeno, 0.58 por ciento y de materia orgánica 11.62 por ciento. Las cantidades obtenidas de metales pesados en el tratamiento II, son significativamente menores que las del tratamiento I donde sólo son lodos residuales composteados. El tratamiento II donde se añadió alfalfa verde, paja seca de avena y estiércol resultó el sustrato con las mejores

características potenciales para la producción de planta de agave. Los microorganismos presentes en el tratamiento II y la materia orgánica añadida ayudaron a la disminución de las cantidades de metales pesados. De acuerdo a la Agencia de Protección al Ambiente de los EE.UA. (EPA) son por debajo de los límites máximos permitidos (Montes Rivera, et al. 2004).

Tabla 13.13 Tratamiento y disposición de lodos de las PTARS de Querétaro, Conagua, 2012

Municipio	Localidad	Nombre y descripción de la acción	Tipo de tratamiento de lodos	Disposición final
Amealco de Bonfil	Amealco de Bonfil	Operación y mantenimiento de la PTAR "Amealco" con capacidad de 20 litros.	Estabilización aerobia, lechos de secados.	Mejoramiento de suelos.
Pineal de Amolos	Ahuacatlán de Guadalupe	Operación y Mantenimiento de la PTAR "Ahuacatlán" de 4 L s^{-1}.	Estabilización aerobia, lechos de secado.	Mejoramiento de suelos.
Arroyo seco	Arroyo seco	Operación y Mantenimiento de la PTAR "Arroyo seco" con capacidad de 1 L s^{-1}.	Humedal artificial de flujo superficial.	Mejoramiento de suelos.
Cadereyta de Montes	Cadereyta de Montes	Operación y Mantenimiento de la PTAR "Cadereyta" con capacidad de 16 L s^{-1}.	Estabilización aerobia, lechos de secado.	Mejoramiento de suelos.
Colón	Colón	Operación y Mantenimiento de la PTAR "Colón" con capacidad de 15 L s^{-1}.	Estabilización aerobia, lechos de secado.	Mejoramiento de suelos.
Corregidora	El Pueblito	Operación y Mantenimiento de la PTAR "Sur" con capacidad de 360 L s^{-1}.	Espesamiento de lodos, deshidratación por prensado y estabilización alcalina.	Mejoramiento de suelos.
Huimilpan	Huimilpan	Operación y Mantenimiento de la PTAR "Huimilpan" con capacidad de 8 L s^{-1}.	Estabilización aerobia, lechos de secado.	Mejoramiento de suelos.
Jalpan de Sierra	Jalpan de Sierra	Operación y Mantenimiento de la PTAR "Jalpan" con capacidad de 20 L s^{-1}.	Estabilización aerobia, lechos de secado.	Mejoramiento de suelos.
Landa de Matamoros	La Lagunita	Operación y Mantenimiento de la PTAR "La Lagunita" con capacidad de 1 L s^{-1}.	Estabilización aerobia, lechos de secado.	Mejoramiento de suelos.
El Marques	Chichimequillas	Operación y Mantenimiento de la PTAR "Chichimequillas" con capacidad de 6 L s^{-1}.	Estabilización aerobia, lechos de secado.	Mejoramiento de suelos.
Pedro Escobedo	Pedro Escobedo	Operación y Mantenimiento de la PTAR "Pedro Escobedo" con capacidad de 15 L s^{-1}.	Estabilización aerobia-anaerobia, lechos de secado.	Mejoramiento de suelos.
Querétaro	Santiago de Querétaro	Operación y Mantenimiento de la PTAR "Centro" con capacidad de 60 L s^{-1}.	Estabilización aerobia, lechos de secado.	Mejoramiento de suelos.
Querétaro	Santiago de Querétaro	Operación y Mantenimiento de la PTAR "Centro" con capacidad de 750 L s^{-1}.	Lodos activados, modalidad convencional.	Mejoramiento de suelos.
Querétaro	Santa Rosa Jáuregui	Operación y Mantenimiento de la PTAR "Santa Rosa Jáuregui" con capacidad de 30 L s^{-1}.	Estabilización aeróbia, espesador, deshidratación, adición de cal.	Mejoramiento de suelos.
San Joaquín	San Joaquín	Operación y Mantenimiento de la PTAR "San Joaquín" con capacidad de 3 L s^{-1}.	Estabilización aerobia, lechos de secado.	Mejoramiento de suelos.
Tolimán	San Pablo Tolimán	Operación y Mantenimiento de la PTAR "San Pablo" con capacidad de 2.5 L s^{-1}.	Estabilización aerobia, lechos de secado.	Mejoramiento de suelos.

13.1.4.8. Manejo y Aprovechamiento del lodo residual por la Comisión Estatal de Querétaro

La Comisión Estatal de Querétaro suscribió un programa de incentivos con la Conagua, para la operación de plantas de tratamiento de aguas residuales, en julio del 2012, en este programa se encuentra descrito el tipo de tratamiento y disposición de los lodos generados en sus PTARS, Tabla 13.13. Como se puede apreciar este programa incluye a 16 municipios y plantas de tratamiento, en los que se trata un total de 1 311.5 L s^{-1}. En el tipo de tratamiento predomina la estabilización de lodos a través de estabilización aerobia, seguido de estabilización anaerobia, estabilización alcalina. La disposición final de los lodos se pretende destinar al mejoramiento de suelos.

La mayor de las plantas es la de San Pedro Mártir, cuya capacidad actual de operación es de 750 L s^{-1}, en una primera etapa, se ubica en la parte poniente de la zona conurbada de la ciudad de Querétaro (ejido Santa María Magdalena), fue diseñada para el tratamiento de las aguas residuales de las zonas comprendidas en el norte y norponiente de la ciudad de Querétaro. La PTAR San Pedro Mártir se encuentra en operación a partir del mes de septiembre del 2010, consiste en un sistema biológico de lodos activados de tipo convencional y desinfección a través de luz ultravioleta con el propósito de dar cumplimiento a la normatividad aplicable que permita su aprovechamiento o reúso en los diferentes sectores productivos (industrial, agrícola recreativo y de servicios). El proyecto contempla la conducción de agua tratada a través de un sistema de bombeo de agua tratada y líneas de distribución denominadas "Sistema de Agua Tratada al Bordo Benito Juárez y Jurica con una longitud de 7.6 km y 6.8 km respectivamente, el agua tratada es almacenada en un tanque de agua tratada con capacidad de 900 m^3 y actualmente se está aprovechando para el riego agrícola en la zona del Ejido Santa María Magdalena. El proyecto de la Planta de tratamiento como parte de sus procesos unitarios contempló el tratamiento y disposición de los lodos generados a partir de la sedimentación primaria y secundaria, cuyo proceso y estabilización será a través de un proceso de estabilización anaeróbica termofílica que permite obtener una calidad de lodos bajo la NOM-004-SEMARNAT-2002, clase B, y a su vez trae consigo un beneficio adicional como lo es la producción de biogás que es resultado de una compleja descomposición de la materia orgánica en energía eléctrica para el propio consumo de la planta lo que permite ser autosuficiente en un 68.8 por ciento.

13.2. Rellenos sanitarios para lodos residuales

13.2.1. Introducción

Cuando las características de lodo no son adecuadas para su uso o aplicación en suelo una alternativa de disposición final son los rellenos de lodos. Los rellenos de lodo son instalaciones de disposición que permiten el almacenamiento de los residuos en el suelo, aislados del ambiente. El diseño debe tener como meta principal reducir la generación del lixiviado, así como prevenir su ingreso, sin tratamiento, al medio ambiente. Los lixiviados son líquidos con sustancias contaminantes que se generan por la disposición de los lodos con alto contenido de humedad, por reacciones químicas dentro del mismo y por el ingreso de aguas de escurrimiento. Otra fuen-

te de contaminación ambiental es el gas que se genera dentro del relleno como producto de la descomposición del material orgánico o por emisiones de sustancias volátiles, sin embargo este último puede utilizarse como una fuente de energía para producir electricidad o calor.

En esta sección se presenta información general sobre la planeación, diseño, monitoreo y clausura de los rellenos de lodos.

13.2.2. Objetivos

Los objetivos del relleno sanitario son:

- Dar una disposición final un lodo que no es adecuado o que no se requiere para su uso o aplicación al suelo
- Aislar los residuos del ambiente y evitar cualquier tipo de contaminación por la generación de lixiviados, generación de gases, vectores, etcétera

13.2.3. Bases teóricas

En relleno de lodo es un lugar preparado especialmente para depositar el lodo y cubrirlo con una capa de suelo que debe ser de por lo menos 20 a 30 cm de espesor. También al relleno se pueden llevar cenizas, arenas y otros desechos sólidos que se generen en la planta de tratamiento. El relleno sanitario es un sistema de disposición que conlleva riesgos ambientales como son, la contaminación por lixiviados y gases; además de que se deben utilizar grandes áreas para tal fin. Para minimizar estos riesgos se requiere de obras de ingeniería bastante complejas y por lo tanto de alto costo. Además su implementación adecuada requiere de diferentes etapas que deben realizarse cuidadosamente desde la planeación hasta post-clausura.

En la Ilustración 13.13 se muestra un esquema, de los diferentes componentes del relleno de lodos. El cual está compuesto por el área de relleno y las protecciones ambientales como son las diferentes estructuras para control de lixiviados, control o recolección de gases, cubiertas y control de agua de escurrimiento.

La construcción de un relleno de lodos se debe considerar la legislación existente en cada país para la construcción de estos sitios de disposición final, las características del lodo y los tipos o métodos de relleno que pueden utilizarse.

13.2.3.1. Normatividad o Legislación para la construcción de rellenos de lodos

En México existen una norma que regula la construcción de los rellenos sanitarios y sitios de confinamiento de residuos especial en la cual se incluyen los lodos residuales.

NOM-083-SEMARNAT-2003. Específicaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo y clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Esta norma debe consultarse para conocer las específicaciones y criterios para la construcción de rellenos de lodos.

13.2.3.2. Características del lodo para disponerse en rellenos

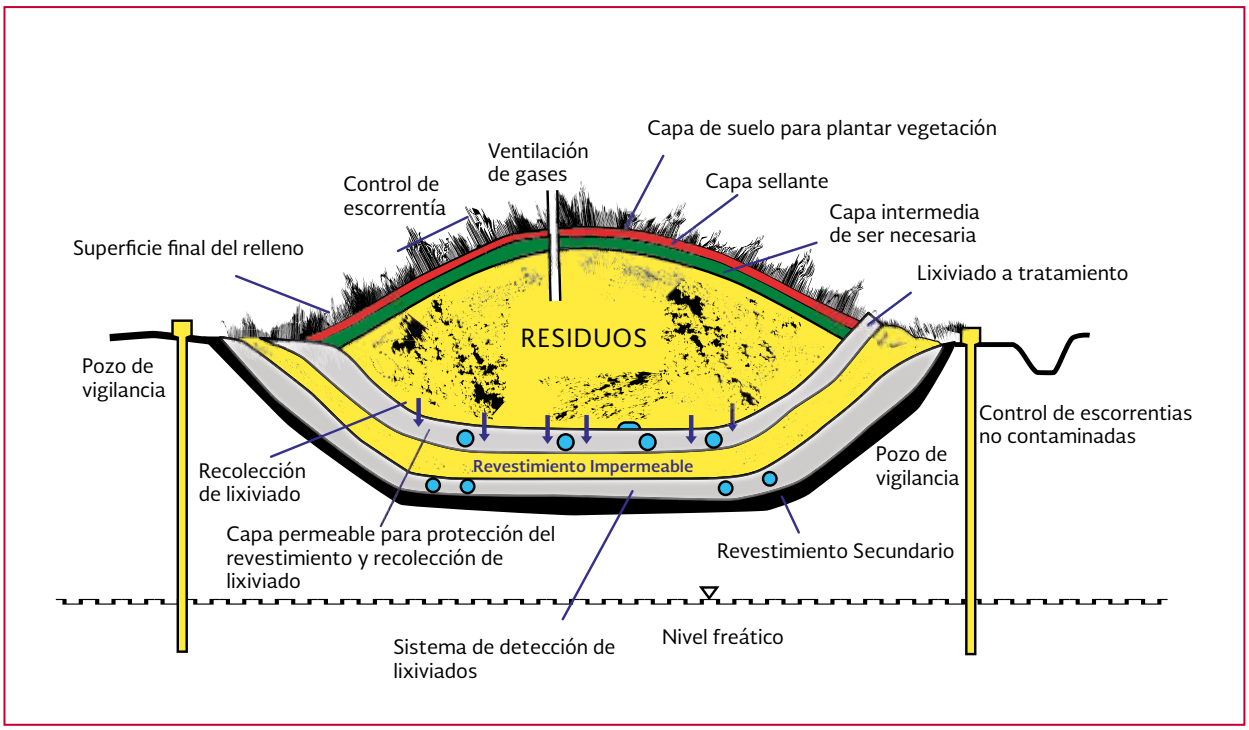
Las plantas de tratamiento que seleccionen como método de disposición final un relleno de lodos deben cumplir con las siguientes características de acuerdo a la normatividad vigente:

- De acuerdo con sus características físicoquímicas, lodos no deben ser residuos peligrosos. Para demostrar lo anterior deberá de recabar la "constancia de no peligrosidad de los mismos" en términos del trámite SEMARNAT-07-007, como lo indica (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002)
- El lodo debe cumplir con los límites máximos permisibles para el contenido del indicador de contaminación, patógenos y parásitos específicados en la tabla 2, para clase C. de la (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002)
- Tener por lo menos una concentración de sólidos totales del 15 por ciento (humedad <85 por ciento). De acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003 y NOM- 004-SEMARNAT-2002

13.2.3.3. Métodos o tipos utilizados para los rellenos lodos

Los rellenos sanitarios de lodos utilizan los mismos métodos utilizados para disponer los desechos sólidos municipales y los desechos peligrosos considerando las características específicas del lodo como es su alto contenido de humedad y la variabilidad de las sustancias contaminantes. En la Ilustración 13.14 se muestran los métodos utilizados para rellenos de lodos.

Ilustración 13.13 Esquema de un relleno de lodos, Fuente: CEPIS /OPS (1997)



Fosa o trinchera

Las trincheras se forman excavando un área o superficie que se rellena con el lodo, el cual queda completamente enterrado. Este tipo de relleno se puede hacer cuando el nivel freático es profundo para permitir la excavación y tener una superficie de amortiguamiento entre el fondo de la trinchera y el nivel freático. En este tipo de rellenos, el suelo producto de la excavación es utilizado como cubierta y no requiere de otros materiales externos.

Hay 2 tipos básicos de trincheras:

Trinchera estrecha o angosta: 3 m de ancho máximo.

Trinchera ancha: Más de 3 m de ancho.

La profundidad y la longitud de las trincheras dependen de los siguientes factores:

Profundidad del nivel freático
Estabilidad de las paredes del relleno
Equipo o maquinaria disponible

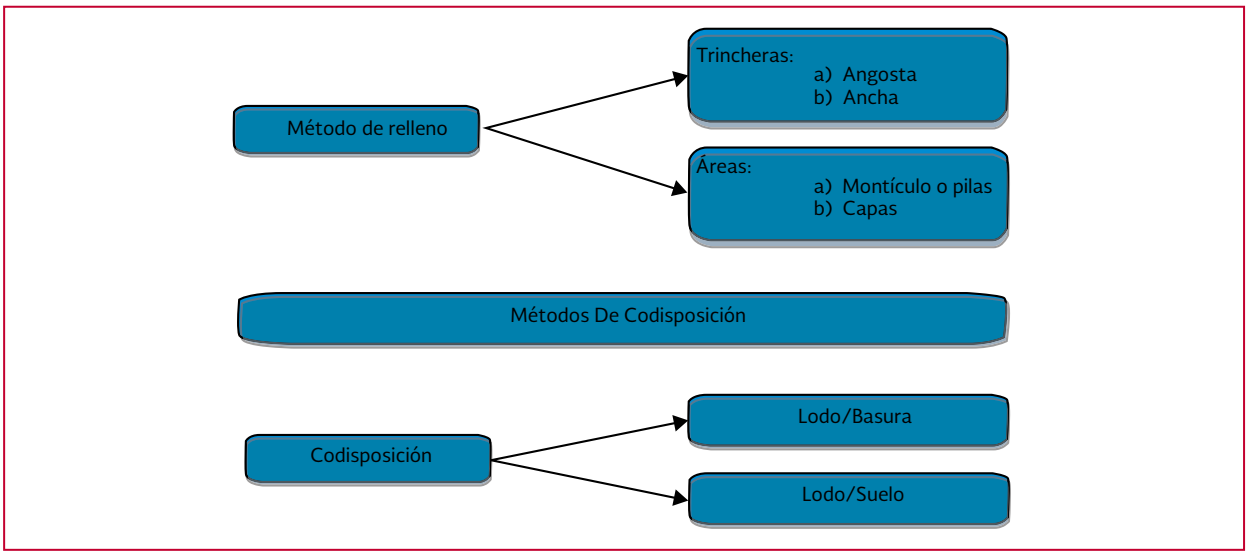
La Ilustración 13.15 e Ilustración 13.16 muestran los diferentes tipos de fosas o trincheras que pueden utilizarse en los rellenos de lodos.

Método de talud o de área

En este método de relleno, el lodo se deposita sobre el suelo y no se requiere excavación. Esta aplicación es más útil en áreas donde el nivel freático es relativamente alto. En este método se puede usar en cualquier terreno disponible como canteras abandonadas, inicio de cañadas, depresiones y terrenos planos.

El contenido de sólidos en el lodo debe ser mayor de 20 por ciento, debido a que las áreas de relleno carecen de las paredes de contención que tienen las trincheras y porque el lodo debe soportar el tránsito del equipo. En este método se requiere acondicionar el lodo con otro material que generalmente es tierra. Por lo tanto se requiere llevar material para el mezclado y cubierta de lugares cercanos al sitio del relleno, ya que no se cuenta con material de excavación.

Ilustración 13.14 Métodos utilizados para rellenos de lodos o de codisposición



Estos sistemas requieren de impermeabilización natural o sintética. Como el lodo se coloca sobre la superficie del suelo, es mucho más fácil colocar los materiales o cubiertas de protección. También se requiere de sistemas para la recolección de lixiviados del lodo y del agua de lluvia.

Para llenar el área, la mezcla lodo-suelo generalmente se coloca en varias operaciones diarias consecutivas. Después de cada operación se pone una cubierta. Solamente los lodos que no tengan generación de olor o atracción de vectores pueden dejarse sin esta cubierta diaria. La Ilustración 13.17 muestra un esquema de este método de relleno

Codisposición

El lodo puede disponerse junto con desechos sólidos municipales en los rellenos. Hay 2 métodos típicos de co-disposición:

lodo/ desechos sólidos
lodo/ suelo

Ilustración 13.15 Sección transversal de una trinchera angosta, EPA(1995)

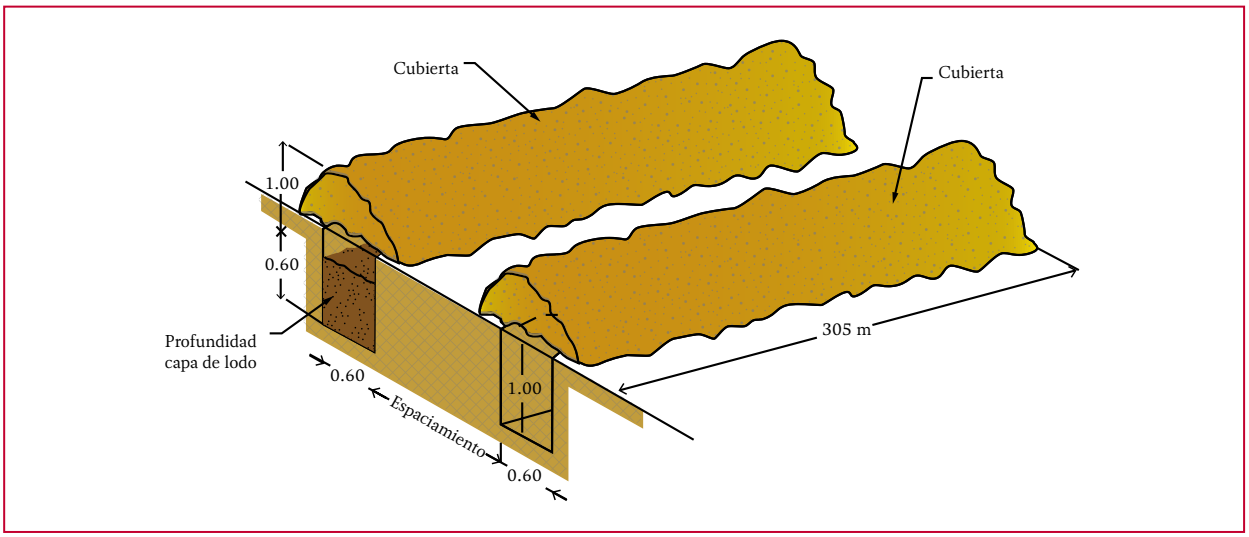
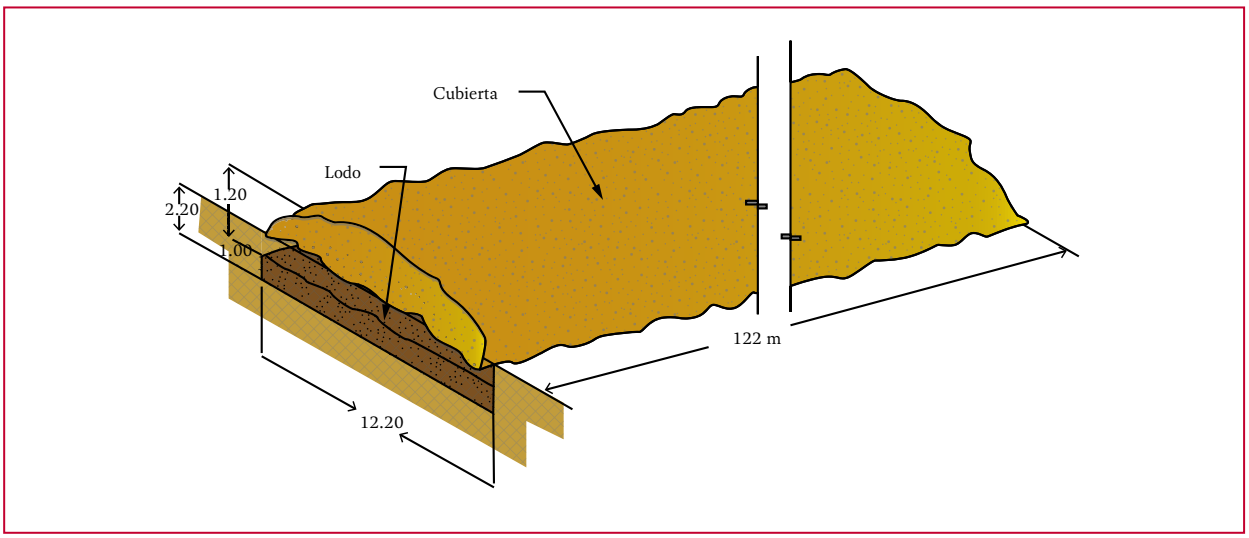


Ilustración 13.16 Sección transversal de una trinchera ancha, Fuente: EPA,1995



Mezcla lodo - desecho sólido

Es un sistema de disposición donde el lodo se mezcla con los desechos sólidos. Esta mezcla se aplica, se compacta y cubre de la misma forma que los desechos sólidos municipales. El lodo para disponerse junto con desechos sólidos debe contener por lo menos 20 por ciento de sólidos. El lodo generalmente lo aplican utilizando equipo para relleno sanitario como tractores y compactadores. Se recomienda una aplicación de 4 toneladas de desecho sólido y 1 tonelada de lodo.

Mezcla lodo - suelo

En este método el lodo se mezcla con suelo y se aplica como cubierta final en los rellenos sanitarios de desechos sólidos municipales. No es estrictamente un método de relleno sanitario de lodo, pero es una opción viable de co-disposición.

El lodo debe estar muy bien estabilizado pero no generar problemas de olor en las operaciones de mezclado y posteriormente al ponerse como cubierta. Cuando se usa como cubierta final ayuda al crecimiento de la capa vegetal, reduce las necesidades de fertilizante y minimiza la erosión.

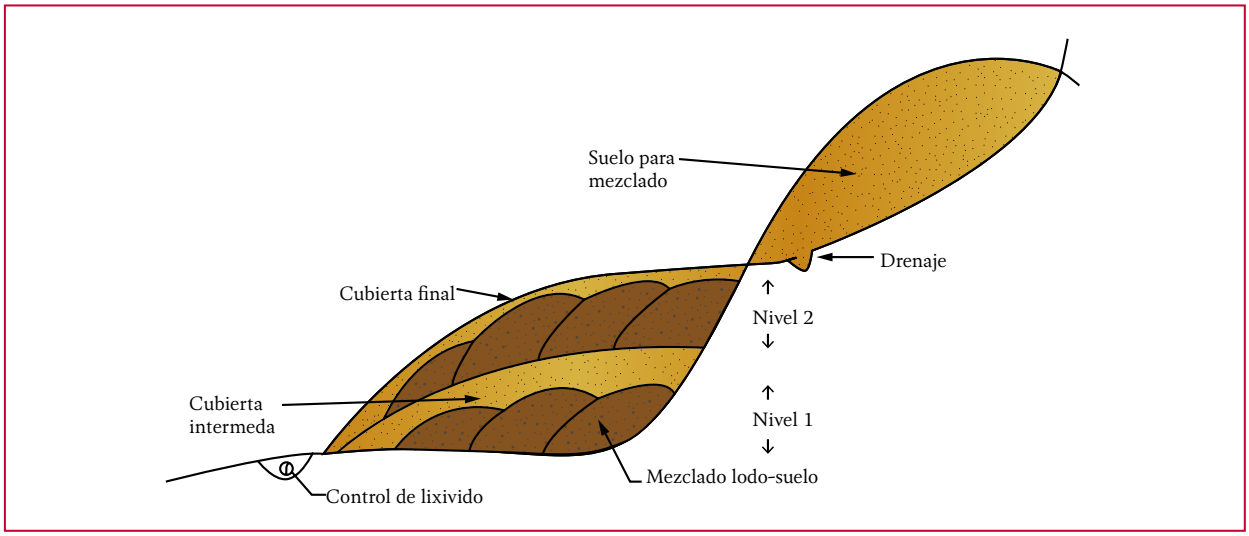
13.2.3.4. Planeación de relleno

La planeación preliminar se hace para seleccionar el sitio de disposición y el método de relleno. En esta etapa se debe cuantificar y caracterizar el lodo e informar a la comunidad sobre el proyecto que se pretende desarrollar.

Participación pública

La legislación mexicana no considera la participación pública en el desarrollo de los rellenos de lodos, sin embargo es recomendable evaluar la opinión pública y formular un programa de participación pública, sobre todo si el relleno es de tamaño considerable y estará situado cerca mancha urbana. Además, debe existir compromiso y responsabilidad de los encargados de la planta de tratamiento de realizar el manejo del lodo (desde su generación en la planta de tratamiento, el transporte y la operación del relleno), de forma que minimice los efectos ambientales y las molestias a la comunidad.

Ilustración 13.17 Método de relleno en pilas Fuente: EPA, 1995



Cuantificación y caracterización de los lodos o biosólidos

En esta etapa también se incluye la recolección de información sobre la cantidad y la calidad del lodo. Las características de calidad indicadas en el punto 13.2.3.2 deben cumplir con las características del lodo.

Selección del sitio

En la Tabla 13.14 se resumen los aspectos que debe considerar la selección del sitio.

13.2.4. Criterios básicos para el diseño de un relleno de lodos

La fase de diseño incluye la selección del método de relleno, el diseño del relleno y de los sistemas de protección. En el anexo 1 aparece una tabla con los datos requeridos para el diseño de un relleno de lodos.

13.2.4.1. Métodos o tipos de rellenos de lodos

La selección de un método específico depende de diferentes aspectos

Cantidad de lodo. Si la generación de lodo es baja menor de 20m^3 $día^{-1}$, se podría utilizar una trinchera. Para mayores cantidades es más práctico utilizar un área de relleno. La trinchera requiere mayor operación ya que incluye la excavación continua.

Características del lodo. Si el lodo tiene un bajo contenido de sólidos (15 por ciento ST) y no se quiere utilizar material para mezclado, debe escogerse una trinchera angosta. Si tiene más de 20 por ciento de sólidos puede disponerse en trincheras o áreas pero la maquinaria no puede transitar sobre el lodo. Si se alcanza una concentración de sólidos > 30 por ciento puede utilizarse cualquier método de relleno con la ventaja de que puede lograrse mayores tasas de aplicación de lodo y por lo tanto menores necesidades de área.

Características hidrológicas del terreno y su pendiente. Las trincheras se recomiendan para suelos de muy baja permeabilidad y un nivel freático profundo, por la dificultad de colocar sistemas de impermeabilización.

Cada método de relleno tiene sus características específicas de diseño y de operación que se deben analizar en cada caso. En la Tabla 13.15 y 13.16, se resumen las más importantes.

13.2.4.2. Tamaño y tiempo de vida del sitio

La vida del sitio la determinan el tamaño, la cantidad y características del lodo y el método de relleno que se va a utilizar.

El tamaño del sitio debe considerar 2 aspectos:

Área total- Considera toda la superficie requerida, incluyendo accesos, oficinas, áreas de mezclado y de movimiento de materiales, etc. Esta área variará dependiendo del tamaño del relleno.

Tabla 13.14 Consideraciones generales para la selección del sitio

Parámetro	Recomendación
Tamaño y vida útil del sitio	La determinan la cantidad, las características del lodo y el método de relleno. Se debe seleccionar un sitio con una vida útil mínima de 10 años
Suelo y geología	El suelo debe servir como material de cubierta y mezclado, debe atenuar la contaminación, controlar escurrimientos y lixiviados. Se prefiere un suelo con un nivel freático profundo(>10m de profundidad) y suelos de textura fina (arcillosos y arenosos-arcillosos)
Propiedades químicas	Se prefieren suelos con alta capacidad de intercambio catiónico, y pH >6.
Topografía	Se recomiendan terrenos con pendiente entre 1-20 por ciento, dependiendo del tipo de relleno. Se debe evaluar la topografía del lugar para evitar mayores pendientes, el potencial de erosión, el deslizamiento de tierras y las áreas sujetas a inundaciones
Aguas superficiales	El sitio seleccionado debe estar lejos de corrientes superficiales y cuerpos receptores de agua.
Aguas subterráneas	Se debe realizar un estudio geo-hidrológico para conocer la profundidad del agua subterránea, así como su dirección, velocidad de escurrimiento, flujo y calidad del agua subterránea
Usos del suelo	Se debe considerar los planes de desarrollo regional para hacer una selección estratégica del sitio considerando los planes futuros
Áreas sensibles ambientalmente	Son aquellos sitios donde no pueden ubicarse rellenos sanitarios. Pantanos, marismas o similares. Zonas de inundación. Áreas congeladas o de nieve perpétua. Áreas naturales protegidas. Zona de recarga de acuíferos
Vegetación	La vegetación puede servir de barrera natural, sin embargo un exceso requiere limpieza del terreno incrementando costos
Vías de acceso	Debe estar situado cerca de la planta de tratamiento y disponer de un camino de acceso durante todo el año
Costos	Se debe considerar desde la etapa inicial. Estos incluyen el costo del terreno, la operación, y del transporte del lodo

Área útil- Es el área en la que se dispondrá el lodo, es decir el área de relleno y es entre el 70 y 50 por ciento del área total.

La vida útil del relleno debe considerar por lo menos 10 años, tiempos menores no son prácticos desde el punto de vista técnico y económico. También si se considera la opción de utilizar nuevamente el mismo sitio, este período es suficiente para garantizar que el material depositado esté completamente estabilizado y que pueda utilizarse como mejorador de suelo o como material de cubierta.

13.2.4.3. Suelo y geología

El suelo adecuado para un relleno de lodo debe servir como material de cubierta o de mezclado, atenuar la contaminación, controlar escurrimiento y los lixiviados. Las propiedades físicas e hidráulicas del suelo que deben considerarse para la selección son: El tamaño de partícula, la plasticidad, el contenido de humedad, la resistencia, la permeabilidad y la conductividad hidráulica.

Propiedades físicas / hidráulicas

Un suelo ideal debe ser lo suficientemente impermeable para prevenir el movimiento de los contaminantes presentes en el lodo residual al manto freático. El tipo de suelos requerido también dependerá de las características del lodo y del método de relleno. En general, es deseable tener una profundidad mayor de 10 m en el manto freático y suelos de textura fina. Los suelos arcillosos y arenosos-arcillosos son los más recomendables por su baja permeabilidad. Un suelo de baja o moderada permeabilidad (ver Tabla 13. 17) es adecuado para un relleno de lodo.

Tabla 13.15 Características de diseño más importantes de las trincheras Fuente: EPA(1995)

Parámetro	Características	
	Angosta Ancho ≤ 3m	Ancha Ancho > 3m
Contenido de sólidos	15-28 por ciento	< 20 por ciento < 28 por ciento maquinaria trabaja sobre el lodo
Hidrogeología	Acuífero profundo	Acuífero profundo
Pendiente del terreno	< 20 por ciento	> 10 por ciento
Espesor de cubierta	0.9-1.2m	0.9-1.2m
Tasa de aplicación de lodo	2 300-10 600 $m^3\ h^{-1}a$	6 000-27 400 $m^3\ h^{-1}a$
Equipo requerido	Excavadora, Cargador frontal.	Excavadora, cargador frontal, draga.

Tabla 13.16 Características más importantes de las áreas de relleno, Fuente: EPA (1995)

Parámetro	Pilas	Capas	Diques
Contenido de sólidos en el lodo	>20 por ciento	>20 por ciento	>20 por ciento
Hidrología	Acuífero superficial o profundo	Acuífero superficial o profundo	Acuífero superficial o profundo
Material externo	Se recomienda con ST> 35 por ciento	0.25-1 suelo:1 lodo	0.25-1 suelo: 1 lodo

El clima también influye en la selección de un suelo. En áreas con mucha lluvia y suelos con una permeabilidad menor que la del lodo, se puede acumular agua en el área del relleno e inundarla. En estos casos los sistemas de recolección de lixiviado se diseñan para manejar el exceso de agua.

Tabla 13.17 Permeabilidad de los suelos saturados

Permeabilidad	(cm h^{-1})
Muy baja	<0.15
Baja	0.15-0.5
Moderadamente baja	0.15-1.5
Moderada	1.5-5.0
Moderadamente rápida	5.0-15.2
Rápida	15.2-50.8
Muy rápida	>50.8

Propiedades químicas

El pH y la capacidad de intercambio catiónico (CIC), influyen en la capacidad del suelo para retener cationes. Suelos con altas capacidades de intercambio catiónico se prefieren para rellenos de lodo. Otras consideraciones que hay que tener en cuenta son las características de compactación, de drenado y la estabilidad. Suelos de granos gruesos se prefieren para caminos, bases, material de mezcla y cubierta diaria. Suelos de granos finos son más adecuados para cubiertas del fondo (impermeabilizar) y cubiertas finales.

Los criterios de geología del terreno y nivel del manto freático son de gran importancia. Generalmente se da prioridad a seleccionar un terreno muy poco permeable (K < 0.15m h^{-1}), si este valor no puede alcanzarse se utilizan medidas de impermeabilización técnica, reemplazando el subsuelo por materiales adecuados para alcanzar baja permeabilidad.

13.2.4.4. Protecciones ambientales

Las protecciones ambientales que deben considerarse en el diseño de un relleno de lodo son:

Control de lixiviados

El control de lixiviados puede realizarse de la siguiente forma.

- **Aprovechando las condiciones naturales del terreno.** Un suelo con un coeficiente de permeabilidad menor 1 × 10^{-7} cm s^{-1} y un nivel freático profundo, > de 10 m sirve como barrera de protección (EPA, 1995)
- **Cambiando las propiedades del suelo.** El CEPIS /OPS recomienda, que suelos con permeabilidad moderada K=1 × 10^{-5} m s^{-1}, se pueden corregir, cambiando los suelos por material apropiado. Este reemplazo debe ser por lo menos de 3.0 m de profundidad y los suelos más apropiados son los suelos finos y arcillosos
- **Colocando membranas o recubrimientos sintéticos** (Tabla 13.18). El uso de membranas es una opción costosa y debe hacerse solo en caso de no poderse realizar las opciones anteriores o cuando el diseño o la legislación así lo exijan
- Los polímeros sintéticos y los materiales asfálticos son las membranas más utilizadas en los rellenos de lodo

Los factores que se deben considerar para escoger una membrana son:

Efectividad
Costo de adquisición e instalación
Durabilidad

Ilustración 13.18 Aptitud de los diferentes tipos de suelos para la instalación de rellenos de lodos Fuente: CEPIS/OPS 1997

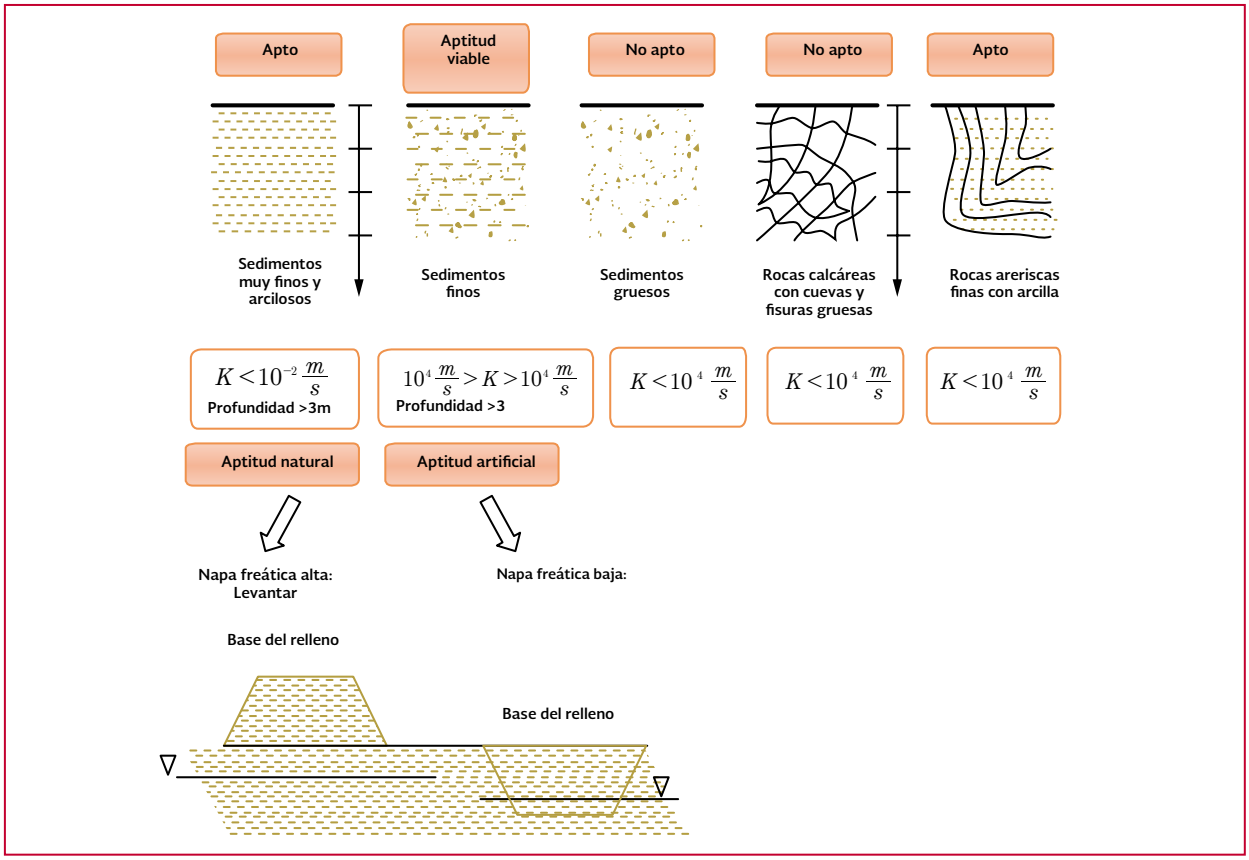


Tabla 13.18 Recubrimientos para rellenos de lodos

Tipo	Composición
Asfalto	Concreto asfáltico Concreto asfáltico hidráulico Mezclas de suelo asfáltico Sello asfáltico
Cemento pórtland	Concreto con sello asfáltico Suelo de cemento con sello asfáltico
Selladores de suelo	-Químicos -Hule y látex -Emulsiones poliméricas
Colocación de hule líquido	Hule y látex Poliuretanos
Membranas sintéticas	Polietileno (PE) Poli-cloruro de vinilo (PVC) Polietileno clorado (CPE) Polietileno clorosulfonado (HYPALON) Hule etileno propileno (EPDM) Hule butil

Recolección y tratamiento de lixiviado

Se requiere de un drenaje para lixiviados a través de un mecanismo de infiltración extendido sobre la base del relleno. Puede consistir en piedra triturada o grava, con granos mayores de 35 mm y el espesor de la capa no debe ser menor de 30 cm (12") como se muestra en la Ilustración 13.19. El sistema de recolección de lixiviados consiste en una serie de tuberías perforadas que se interceptan en un punto y de ahí se conduce el lixiviado a un tratamiento, que puede consistir en un proceso físico-químico o biológico, reciclaje en el relleno o lagunas de evaporación.

Control de gases

El gas se produce por la descomposición de la materia orgánica del lodo. Los gases de descomposición más importantes son el metano y el dióxido de carbono. También se producen en menores cantidades amoniaco, sulfuro de hidrógeno, hidrógeno y compuestos orgánicos volátiles. La cantidad y composición de los gases producidos depende de la cantidad, características de lodo depositado, y de la humedad presente. En la Tabla 13.19 se muestran algunas composiciones de gases de rellenos de lodos.

El metano puede moverse por difusión del lodo a la atmósfera y disiparse sin peligro. También puede moverse lateralmente a través del suelo a los alrededores, especialmente si el material de cubierta es permeable o no tiene un espesor suficiente. A través de este movimiento el metano puede llegar a edificios o construcciones cercanas, también puede desplazar el oxígeno de las raíces, dañando la vegetación o áreas de cultivo cercanos. Una buena cubierta de suelo puede utilizarse para el control de gases, la cual puede ser suficiente, si el sitio está lejos de áreas pobladas.

Si el relleno está cerca de zonas pobladas o áreas ocupadas (zonas de cultivo, ganadería, etc.) y el monitoreo indica que hay peligro de acumulación de gases se deben instalar sistemas de control de gases, la migración de gases puede controlarse instalando barreras que impidan el flujo del gas o por medio de recolección y venteo. Las técnicas de control de gas se clasifican en métodos permeables e impermeables.

Método permeable

Se utilizan zanjas de grava o ventilas llenas de grava entre las celdas por donde fluirán los gases (Ilustración 13.20); las zanjas se deben ser profundas y llegar debajo de la base del relleno para asegurar la intercepción de todos los gases.

Método impermeable

El método impermeable controla el movimiento de los gases colocando alrededor del relleno una barrera más impermeable que el suelo de los

Ilustración 13.19 Bajo dren para recolección de lixiviados

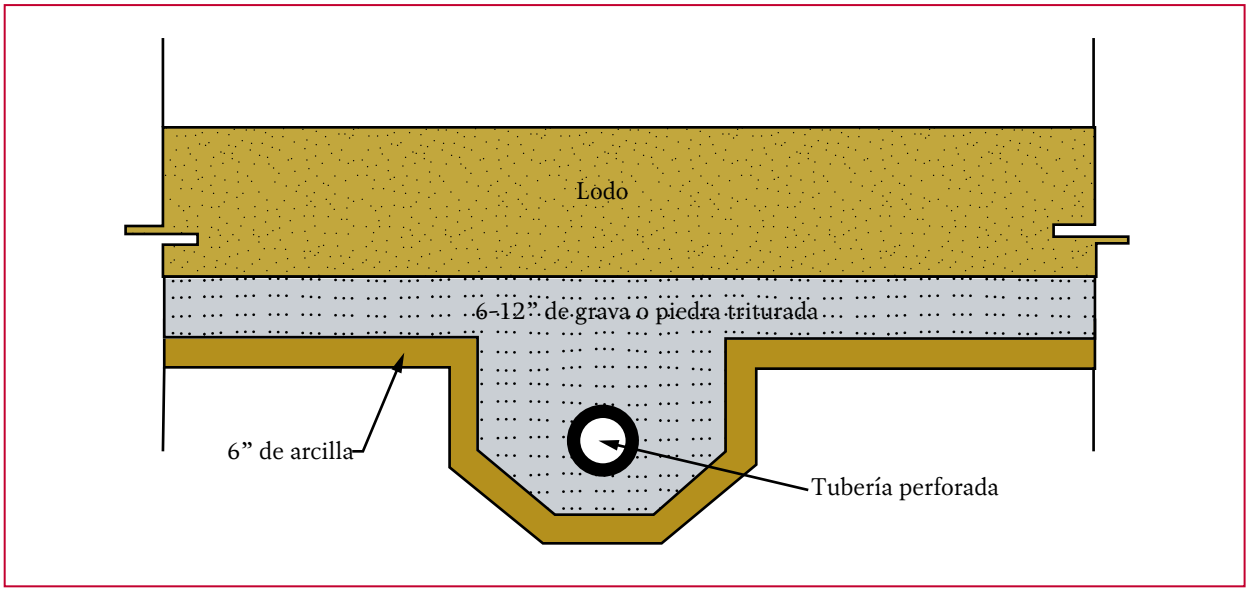


Tabla 13.19 Composición de gases encontrados en rellenos de lodos (por ciento). Fuente: EPA (1987)

Gas	Relleno de lodo					Codisposición	
CH_4	1	2	3	4	5	6	7
	55	56	48	50	43	59	54
CO_2	41	39	20	37	50	40	32
O_2	1	1	7	2	1	--	3
N_2	3	3	24	10	5	1	10

alrededores. El material más utilizado es arcilla compactada de 0.6-1.5 m de espesor, que evita el flujo lateral del gas y lo forzará a salir por la parte superior del mismo.

Utilización del biogás

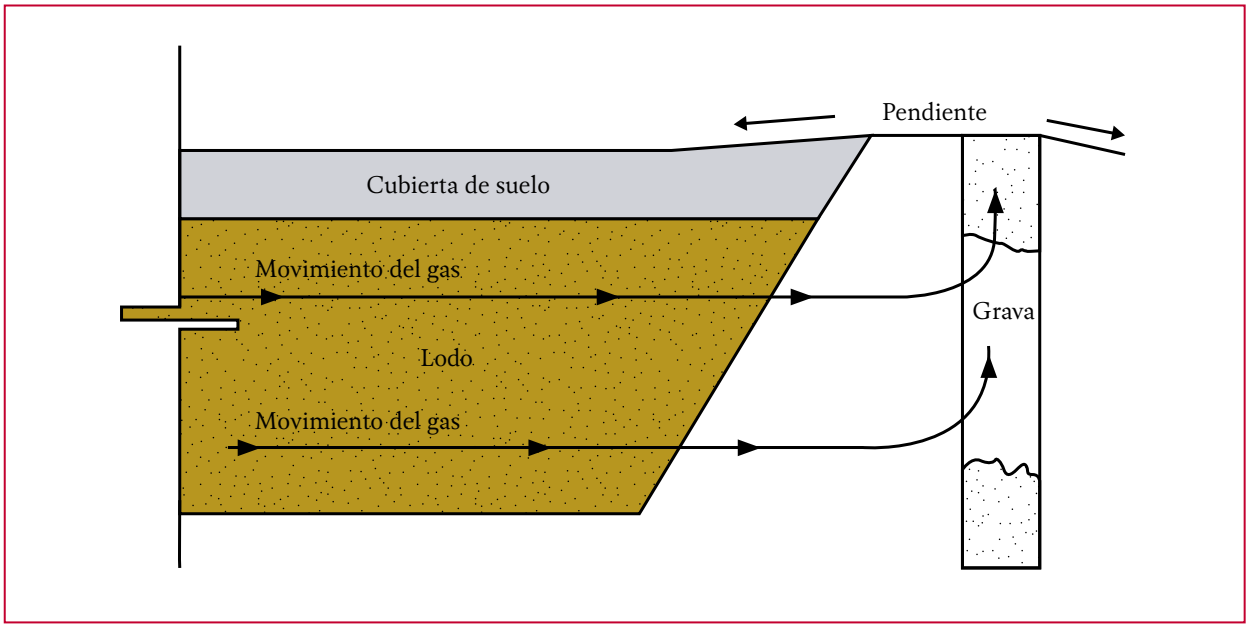
El biogás generado también puede verse como una fuente de energía renovable y en estos momentos su uso se ha incrementado. Para mayor información sobre el uso del biogás se puede consultar el capítulo XIV de este libro.

Control de aguas de escurrimiento

El propósito de este control es recolectar y dirigir las aguas superficiales para minimizar la cantidad de agua que entre al relleno. Este control va acompañado por la construcción de estructuras arriba del área del relleno para recolectar y dirigir el agua hacia las estructuras de control de aguas de tormentas.

El manejo del agua superficial también es necesario para minimizar daños por erosión en el mismo relleno. El diseño de un sistema de agua superficial requiere del conocimiento de los patrones de precipitación, características topográficas de los alrededores, condiciones geológicas y del diseño de las diferentes estructuras del relleno. Las estructuras de control más utilizadas son: diques y canales, terrazas y bancos, toboganes, trincheras y tanques, que pueden instalarse en forma temporal o permanente.

Ilustración 13.20 Método permeable para el control de gases



13.2.4.5. Otros aspectos de diseño

Topografía. Para los rellenos de lodos se recomiendan terrenos con pendientes entre 1 y 20 por ciento. El método de relleno también define cual es la topografía más adecuada. La topografía del lugar debe evaluarse para evitar mayores pendientes, potencial de erosión, deslizamiento de tierras o áreas sujetas a inundaciones.

Aguas superficiales. El sitio seleccionado debe estar lejos de corrientes superficiales y cuerpos receptores de agua, debe tener además un adecuado drenaje pluvial para evitar escurrimientos dentro del relleno. La NOM-083-ECOL-1996 en el inciso 3.2.2 define los aspectos hidrológicos que se deben considerar.

Aguas subterráneas. Se requiere de un estudio geo-hidrológico para conocer la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea, así como la dirección y velocidad del escurrimiento o flujo de la misma y la calidad del agua subterránea.

Usos del suelo. El desarrollo regional debe considerarse en la selección del sitio y se debe revisar el plan de desarrollo del área donde se quiere construir el relleno. Esto dará oportunidad de hacer una selección estratégica del sitio considerado los planes futuros de desarrollo municipal e industrial.

Áreas sensibles ambientalmente. Los rellenos de lodos no pueden ubicarse en áreas ambientalmente sensibles que son:

- Pantanos, marismas o similares
- Zonas de inundación
- Áreas congeladas o de nieve perpétua
- Áreas naturales protegidas
- En zona de recarga de acuíferos únicos

Y en todos los demás sitios que excluye la NOM-083-ECOL-1996

Vegetación. En el proceso de selección también debe considerarse la vegetación existente. La ve-

getación puede servir como una zona de protección natural de olores, ruido, polvo y visibilidad. Sin embargo si el sitio tiene mucha vegetación y requiere de limpieza del terreno se deben considerar estos trabajos que pueden aumentar el costo del proyecto.

Vías de acceso. En la selección del sitio también se debe considerar que esté situado cerca de la planta de tratamiento y bien comunicado por carreteras o disponer de un camino de acceso que sea transitable durante todo el año. También se debe considerar que el recorrido se haga por zonas con baja densidad de población y poco tráfico.

Sitios con significado histórico y arqueológico

En el estudio o reporte de impacto ambiental del relleno, debe quedar consignado si el sitio tiene algún significado histórico o antropológico que lo excluya de este tipo de sistemas de disposición.

Otros usos fuera de la zona definida pero en el área de influencia.

Este último grupo de criterios se evaluara en una etapa final. Aunque éstos no tienen necesariamente una influencia directa sobre el emplazamiento del relleno, pueden llegar a ser el criterio decisivo para la selección de uno versus otro. Por ejemplo, el valor de la tierra para uso agrícola, puede ser un factor decisivo.

Costos. Otro criterio de selección del sitio y que puede estimarse en una etapa inicial de selección, es el costo tanto de capital como de operación, que puede estimarse, como se muestra a continuación:

1. Determinar costos de capital (C) considerando la vida del sitio. Incluye:
2. Costo del terreno
3. Preparación del sitio
4. Compra de equipo
5. Determinar la vida del sitio en años (L)
6. Calcular los costos unitarios de capital en \$ / m^3 de lodo, en base a la cantidad de lodo generado por año (Q) m^3 / año.

$$P1 = C / L \times Q$$

7. Determinar costos totales de operación (Op) para un año, incluye:
8. Mano de obra
9. Equipo-combustible, mantenimiento y refacciones
10. Accesorios
11. Análisis de laboratorio (muestreo y monitoreo)
12. Suministros y materiales
13. Misceláneos y otros
14. Calcular los costos unitarios de operación (P2)con base a la cantidad de lodo generado por año (Q)

$$P2 = Op / Q$$

15. Determinar los costos de transporte (H) para un año
16. Calcular los costos unitarios de transporte.

3= H / Q

Calcular los costos totales anuales por m^3 de lodo

$$CT = P1 + P2 + P3$$

Con esta estimación de costos se podrá seleccionar, de diferentes alternativas, el lugar más adecuado desde el punto de vista económico.

13.2.5. Operación y mantenimiento

La operación de un relleno de lodos incluye la preparación del sitio, la descarga de lodo, el ma-

nejo de lodo y la colocación de cubiertas. Estas operaciones varían para cada método o tipo de relleno. La operación del relleno incluye también un programa control cuya periodicidad se establece de acuerdo al tamaño del relleno. La EPA, 1995 recomienda realizar un control anual para rellenos que depositen menos de 300 ton /año y uno mensual si se depositan más de 1 500 ton /año. El gas metano debe controlarse continuamente.

Los parámetros más importantes en el control de contaminantes de un relleno de lodos son: metales pesados, nitratos, metano y compuestos específicos que deben definirse dependiendo de las características del lodo. En la Tabla 13.20 y Tabla 13.21 se muestran los puntos de muestreo y los parámetros de control recomendados.

13.2.6. Clausura de un relleno de lodos

La clausura es el procedimiento por el cual el relleno se cierra y ya no se dispone más lodo dentro del mismo.

Las acciones que deben realizarse durante la clausura son:

- Colocar una cubierta sobre el lodo, que es una barrera física que consiste en varias capas de suelo o geo-membranas. Ésta cubierta debe minimizar la infiltración de agua, ser resistente a la erosión, restringir la migración de gases, aislar el relleno de vectores, etcétera

Tabla 13.20 Localización de los puntos de muestreo en el relleno de lodos

Punto	1.1 Localización
Descarga de lodo	Se debe caracterizar el lodo antes que entre al relleno, este puede hacerse al descargar del vehículo que lo trae al relleno, o al disponerse en el relleno. El muestreo debe hacerse en el punto más próximo a la disposición final.
Pozos de monitoreo de agua subterránea	Se deben localizar aguas arriba y abajo del relleno en la dirección del flujo del agua subterránea.
Sistemas de recolección de lixiviado y lagunas de recolección de agua de escurrimiento.	Se deben muestrear en el punto de descarga final.
Aire	Los equipos para el monitoreo de gas metano deben colocarse en el relleno de lodos y en los alrededores, considerando la dirección dominante de los vientos.
Suelo	Se debe monitorear en diversos puntos del área del relleno y a diferentes profundidades desde la base hasta el nivel freático.

Tabla 13.21 Parámetros más importantes en el control de contaminantes de un relleno de lodos

1.2 Parámetro	1.3 Importancia
Metales pesados	Arsénico, cromo y níquel debe controlarse en el relleno de lodos especialmente si no tiene un recubrimiento y un sistema de recolección de lixiviados.
Patógenos y atracción de vectores	Las necesidades de monitoreo varían dependiendo del grado de estabilización y de destrucción de patógenos en el lodo.
Nitratos	Debe controlarse en el agua subterránea, especialmente en los rellenos que no tengan recubrimientos y un sistema de recolección de lixiviados.
Metano	Puede alcanzar concentraciones explosivas cuando el lodo se cubre y se desarrollan condiciones anaerobias en las interfases.
Otros	Cuando los lodos provengan del tratamiento de aguas residuales municipales con aportaciones industriales se deben monitorear otros parámetros orgánicos e inorgánicos de acuerdo a las características del lodo.

- Implementar un sistema para el manejo de lixiviado para prevenir la contaminación del agua subterránea y agua superficial
- Prevenir la acumulación de gas metano.
- Mantener el sitio estable y seguro, considerando un período de pre clausura
- Seleccionar y preparar el sitio para su uso después del cierre definitivo

También se debe implementar un programa de mantenimiento durante el período de post-clausura, para mantener en buen estado la cubierta y las estructuras de control.

13.2.7. Ejemplo de cálculo del área para un relleno sanitario

Calcular el área requerida para un relleno de lodos de una planta de tratamiento que genera 20 m^3 por día, 7 días a la semana, con 30 por ciento sólidos totales. Se utilizará el método de trinchera y se considera una vida útil de 10 años.

Datos para el diseño

Volumen de lodo
20 m^3/día, 7 días /semana, 30 por ciento sólidos totales
Método de relleno- Trinchera
Vida del relleno – 10 años
Dimensiones de cada trinchera
15 m de ancho × 3 m de profundidad × 100 m de longitud
Espacio entre trincheras – 3 m.
Amortiguamiento 30m mínimo, desde las trincheras al límite de propiedad

Cálculos

Volumen de trinchera requerido

20 m^3/día × 365 días/ año × 10 años = 73 000 m^3

Número de trincheras.

73 000 m^3 / 15m × 3m × 100m = 16.3 trincheras

Área útil en hectáreas (ha)

15 m de ancho × 100 m de longitud + 3 m entre trincheras
A = 18 m × 103 m = 1854 m^2 área para cada trinchera.
Área total = 1854 m^2 × 16.3 =30 220.2 m^2
Área total = 3.022 ha
Área total mínima requerida
3.022 ha. + 25 por ciento para carreteras, maniobras, y usos diversos
Tamaño recomendado 5 ha

Ejemplo 2: Calcular la vida útil de un relleno sanitario para depositar 10 m^3 de lodos con 22 por ciento de sólidos, 7 días a la semana. Se dispone de un terreno de 2 hectáreas y se quiere utilizar el método de trinchera angosta, con trincheras de 2.5 metros de ancho, 50 metros de largo y 1.5 metros de profundidad.

Datos:

Volumen del lodo
10 m^3/día y 7 días / semana, 22 por ciento de sólidos
Método de relleno – trinchera angosta

Dimensiones de la trinchera
2.5 m de ancho × 1.5 m profundidad × 50 m largo
Área útil disponible: 2 hectáreas
Espacio entre trincheras 1.5 m
Cálculos

Número de trincheras que pueden construirse

Área de cada trinchera
3.5 m × 51.5 m = 180.25 m^2
Número de trincheras
= 20 000 m^2/180.25 m^2 =110 trincheras

Volumen disponible

(110 trincheras) × 2.5m × 1.5m × 50m/trinchera = 20 625 m^3

Vida útil del sitio

20 625 m^3/ 10 m^3 d^{-1}= 2 062.5 días =5.65 años
Vida útil del sitio 5.65 años

14

Tratamiento y uso del biogás

14.1. Introducción

Este capítulo contiene una revisión general sobre el tratamiento y uso del biogás generado en plantas de tratamiento de aguas residuales, específicamente durante la estabilización anaerobia de lodos residuales. El biogás, algunas veces denominado biometano, es el nombre del gas producido durante la descomposición biológica de la materia orgánica típica de los biosólidos presentes en el agua residual.

El biogás puede estar constituido por metano (CH_4) con una concentración que varía entre un 40 por ciento y un 70 por ciento, y dióxido de carbono (CO_2) entre 60 y 30 por ciento. Contiene pequeñas proporciones de otros gases como hidrógeno(H_2), nitrógeno(N_2), oxígeno(O_2) y sulfuro de hidrógeno(H_2S). Su composición varía dependiendo de la fuente de generación.

El biogás presenta en promedio un poder calorífico entre 18.8 y 23.4 Mega julios por m^3, menor que el del gas natural (33-38 MJ m^{-3} del gas natural).

14.2. Objetivos

- Identificar los procesos en los que se produce biogás durante el tratamiento del lodo residual
- Conocer los usos del biogás generado en el tratamiento del lodo residual
- Conocer los equipos utilizados para la generación de energía eléctrica o térmica a partir de biogás

14.3. Bases teóricas

El biogás es generado a partir de sustratos que contienen materia orgánica, proteínas, grasas, celulosas y hemicelulosas como principalmente componentes. Su degradación se lleva a cabo mediante procesos como son: hidrólisis, acidogénesis, acetogenesis y metanogenesis. El biogás es un subproducto de la estabilización anaerobia de las aguas y lodos residuales. Los principios básicos de la producción de biogás como resultado de la estabilización anaerobia se pueden consultar en el capítulo 7 de este libro.

Los lodos residuales generados en las plantas en plantas de tratamiento producen biogás en la estabilización anaerobia de lodos (gas de reactores), y en los rellenos de lodos, si se utiliza esta tecnología como método de disposición final. Otra forma de producir energía a partir de lodos residuales es durante la combustión del lodo.

14.3.1. Gas de reactores

El gas de reactores es un combustible rico en metano producido como un subproducto de la descomposición microbiana de la materia orgánica durante los procesos de estabilización anaerobia. Los principales componentes del gas de reactores son el metano y el dióxido de carbono.

La mayoría de los reactores anaerobios operan a temperaturas entre 34 y 37 °C, es decir en el rango mesofílico. Pocos reactores en Estados Unidos y Europa operan en el rango termofílico, 52 a 60 °C. La fase ácida de los reactores anaerobios produce un gas con menor capacidad calorífica y más contenido de sulfuros (H_2S).

14.3.2. Gas de rellenos de lodos

El gas generado en los rellenos sanitarios de desechos sólidos es también un gas rico en metano formado por la descomposición de la materia orgánica presente en los lodos residuales depositados ya sea solo o en co-disposición con basura municipal. El gas de los rellenos sanitarios se produce en mayores cantidades y su composición puede ser más variable comparada con el gas de los reactores. Está compuesto principalmente por metano, dióxido de carbono y agua. En la Tabla 14.1 se muestra la composición de un gas generado en reactores anaerobios, un gas de relleno sanitario y se compara con un gas natural.

Como se observa en la tabla 14.1 el biogás generado en los reactores tiene es de mejor calidad que el generado en los rellenos. Tiene mayor cantidad de metano, mayor capacidad calorífica y generalmente menor cantidad de impurezas.

Las impurezas del biogás dependen del origen y la composición del lodo residual. Si el lodo proviene de una planta de tratamiento de aguas residuales sin aportes de contaminación industrial, el gas producido tendrá menor cantidad de

Tabla 14.1 Comparación del biogas generado en reactores y rellenos sanitarios con el gas natural puro

Parámetro	Gas de reactor (rango)	Gas de relleno sanitario (rango)	Gas natural de tubería (rango)
Metano, CH_4, por ciento (base seca)	50-70	35-65	80-98
Dióxido de carbono,CO_2 (Base seca)	30-45	30-60	0-2
Nitrógeno, N_2, por ciento (base seca)	0.2-2.5	0.2-4	0.2-10
Hidrógeno, H_2, por ciento (base seca)	0-0.5	0-0.5	0
Vapor de agua (H_2O)	5.9	4-12	seco
Sulfuro de hidrógeno (H_2S), ppm_v (base seca).	200-3 500	200-3 500	<16
Halógenos, ppm_v		0-250	0
Amoniaco, NH_3, ppm_v	0-600	0-500	0
Propano, C_3H_8, por ciento(base seca)	0	0	0.6-5
Compuestos orgánicos sin incluir metano, ppm_v		200-12 000	NA
Siloxanos, ppb	200-1 000	400-12 000	0
Gravedad específica(Base aire=1.0)	0.8-1.0	0.87-1.13	0.59
Valor calorífico alto, MJ/m^3	20-28	16-26	41
Valor calorífico bajo, MJ/m^3	18-25	13-23	37

impurezas, que si el lodo proviene de aguas residuales industriales. Los principales contaminantes encontrados en el biogás son el dióxido de carbono, el ácido sulfhídrico, el amoniaco, el vapor de agua, polvos y siloxanos. En la Tabla 14.2 se muestran las impurezas del biogás y sus efectos en el uso del mismo.

14.3.3. Utilización del biogás

El biogás es una importante fuente de energía renovable. La razón para utilizarlo es para optimizar el uso de la energía, tiene beneficios económicos e incentivos, ayuda al balance de carbono y a la sustentabilidad.

La formación de biogás en los procesos anaerobios es una señal de óptimo funcionamiento del proceso. El uso del biogás tiene beneficios económicos e incentivos debido a que las plantas de tratamiento requieren grandes cantidades de energía eléctrica para su operación. El biogás es una fuente sustentable para la generación de electricidad y calor. La combustión del metano produce dióxido de carbono y agua. Cada molécula de metano forma una molécula de dióxido de carbono.

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_20$$

Ecuación 14.1

En una combustión completa cada mol de metano produce un mol de dióxido de carbono.

14.4. Producción biogás

De acuerdo a los conceptos explicados en el capítulo 7, la respiración y la oxidación final de los productos de la estabilización anaerobia es la generación de gas metano. Usando la ecuación 14.2 puede calcularse la cantidad de metano.

Tabla 14.2 Componentes típicos e impurezas en el biogas

Componente	Contenido	Efecto
CO_2	25-50 por ciento por volumen	Disminuye el valor calorífico. Aumenta las propiedades antidetonantes de los motores. Provoca la corrosión (a bajas concentraciones el carbón es ácido) si el gas está húmedo. Daños alcalinos a las celdas de combustible.
H_2S	0-0.5 por ciento por volumen	Efectos de corrosión en sistemas de equipo y tubería; muchos fabricantes de motores, por lo tanto establecen un límite superior de 0.05 por ciento por volumen. Emisiones de SO_2 después de quemarse o emisiones de H_2S con una combustión imperfecta-límite superior de 0.1 por ciento por volumen. Daña el catalizador.
NH_3	0-0.05 por ciento por volumen	Emisiones de NO_X después de quemarse dañando las celdas de combustible. Aumentan las propiedades antidetonantes de los motores.
Vapor de agua	1-5 por ciento por volumen	Causas de corrosión en sistemas de equipo y tubería. Daños por condensación a instrumentos y plantas. Riesgo de congelamiento en sistemas de tuberías y toberas.
Polvo	>5 µm	Bloqueo de toberas y celdas de combustible.
N_2	0-5 por ciento por volumen	Disminuye el valor calorífico. Aumentan las propiedades antidetonantes de los motores.
Siloxanos	0-50 mg/Nm	Actúan como un abrasivo y dañan a los motores.

$$V_{CH_4} = (0.35)\left[(S_o - S)(Q)\left(\frac{10^3 g}{kg}\right)^{-1} - 1.42P_x\right]$$

Ecuación 14.2

donde:

V_{CH4} = Volumen de metano producido a condiciones estándar (0°C y 1 atm), $m^3\ d^{-1}$

0.35 = Factor de conversión teórico par la cantidad de metano producido, m^3

Q = flujo o caudal, m^3 d

S_0 = $DQO_{b.}$ Demanda química de oxígeno biodegradable del afluente, mg L^{-1}

S = $DQO_{b.}$ Demanda química de oxígeno biodegradable del efluente, mg L^{-1}

P_x = Masa neta de tejido celular producido por día, kg d^{-1}.

Para reactores anaerobios de mezcla completa y alta tasa sin reciclo, Utilizando la ecuación 14.3 se estima la cantidad de masa de tejido celular diariamente, (Px).

$$P_x = \frac{YQ(S_0 - S)(10^3 g/kg)^{-1}}{1 + k_d(SRT)}$$

Ecuación 14.3

donde:

Y = Coeficiente de crecimiento, g SSV/g DQO_b

K_d = Coeficiente endógeno, d^{-1}. Valores típicos de 0.02 a 0.04

SRT = Tiempo de retención de sólidos, d

Los otros términos como se definieron para la (ecuación 14.2).

Para un reactor de mezcla completa, el tiempo de retención de sólidos (SRT), es igual al tiempo de retención hidráulico.

Para reacciones anaerobias valores típicos de Y se encuentran entre 0.05 y 0.10 g SSV/g DQO_b y de K_d de 0.02 a 0.04, respectivamente (Metcalf & Eddy, 2003).

En la Tabla 14.3 se muestran los tiempos de retención de sólidos recomendados para reactores anaerobios de mezcla completa.

Tabla 14.3 Tiempo de retención de sólidos (SRT) recomendados para reactores anaerobios de mezcla completa (Metcalf & Eddy,2003)

Temperatura de operación (°C)	SRT (mínimo)	SRT(Típicos)
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

El biogás producido contiene entre 65 y 70 por ciento de metano (CH_4), 25 a 30 por ciento de bióxido de carbono (CO_2) y trazas de nitrógeno (N_2), hidrógeno (H_2), ácido sulfhídrico (H_2S).

Los valores típicos de producción de biogás en reactores de lodos son 0.5 a 0.75 m^3 CH_4/ kgSSV alimentados o bien 0.75 a 1.12 m^3 CH_4/ kgSSV eliminados.

El gas que recolecta, ya sea en el mismo reactor equipado con cubiertas de tipo flotante, o en un tanque independiente, con el mismo tipo de cubierta.

Es importante no permitir la entrada de aire en los tanques y tuberías que contienen biogás, ya que se pueden formar mezclas explosivas (7 a 20 por ciento Vbiogas/Vaire). La línea de conducción del biogás debe contar con una válvula de alivio de presión y contra vacío, un arrestin-

fama y una trampa de condensados. El gas si no se utiliza debe ser quemado.

El biogás también puede calcularse realizando un balance de masa en el reactor anaerobio para determinar la reducción o destrucción de sólidos suspendidos volátiles en el lodo (SSV), los cuales se convierten en biogás. Un ejemplo para estimar la producción de biogás a partir de la reducción de SSV se ilustra al final de este capítulo y con más detalle en el libro de *Aplicación de fuentes de energía renovable en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*, MAPAS.

14.5. Uso del biogás

Las mayores aplicaciones del biogás son para la generación de energía eléctrica y calor.

Los gases de relleno sanitarios generalmente se utilizan para la generación de energía eléctrica. Los gases de los reactores se utilizan para la generación de calor y fuerza, que es sinónimo de la palabra cogeneración.

El gas es más utilizado en aplicaciones de calentamiento, el cual puede emplearse directamente, con unidades de almacenamiento de baja presión. Para obtener un producto adecuado, el gas debe tratarse para obtener la calidad requerida para el uso que se le quiera dar. Esta calidad la determina la maquinaria o equipo a utilizar o la normatividad de protección de la calidad del aire, en caso de que el biogás solamente se queme. En la Tabla 14.4 se muestran diferentes usos del biogás dentro y fuera de la planta de tratamiento.

Tabla 14.4 Usos del biogás dentro y fuera de la planta de tratamiento

Lugar de uso	Uso del biogás y subproductos	Equipo o localidades
Dentro de la planta de tratamiento	Procesos de calentamiento (calentamiento de gases del reactor anaerobio) Producción de vapor y agua caliente (Pasteurización de lodos residuales, vapor para turbinas, intercambiadores)	Calentadores
	Combustible para los motores de la planta	Motores en general
	Producción de energía eléctrica y recuperación de calor	Cogeneradores
	Combustible para incineradores de lodos	Incineradores
	Secado de lodos para producción de abonos y fertilizantes	Secadores
	Generación de electricidad	Celdas de combustible
Fuera de la planta de tratamiento	Venta de biogás	Actividades particulares, municipales e industriales
	Venta de electricidad producida en cogeneradores	
	Venta de vapor o agua caliente	
	Venta de gas comprimido	
	Venta de metano	
	Recuperación de subproductos como dióxido de carbono, azufre y amoniaco	

En la Ilustración 14.1 se muestra el manejo de lodo y el uso del biogás en la planta de tratamiento de aguas residuales Hyperion. (EPA, 1995). El lodo primario y secundario de la planta de tratamiento se estabiliza en un reactor anaerobio produciendo dos corrientes: biogás y lodo estabilizado.

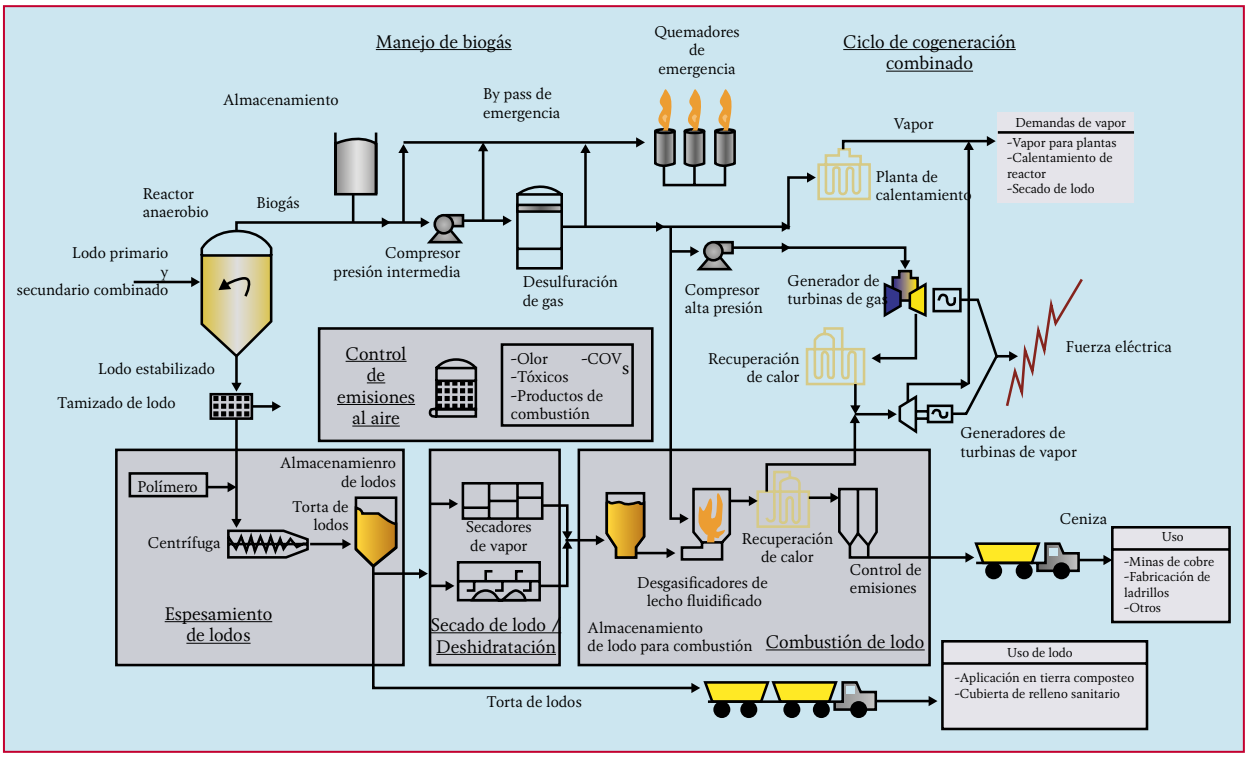
El biogás sigue los siguientes pasos para su tratamiento y uso:

- Almacenamiento
- Etapa de compresión intermedia
- Desulfurización
- Quemado del biogás en caso de emergencia. Se observa que después de cada una de las etapas anteriores hay un bypass de emergencia que lo lleva hacia los quemadores de gas
- Después del tratamiento o purificación del biogas, este se distribuye para diferentes usos
- Generación de vapor. El biogás se envía hacia la planta de calentamiento, por ejemplo la unidad de calderas para producción de vapor. Este vapor se puede utilizar en la planta de tratamiento para el calentamiento del reactor anaerobio o para el secado del lodo estabilizado
- Generación de energía eléctrica y calor. El biogás pasa por una etapa de compresión para después dirigirse a los generadores de turbina donde se produce energía eléctrica y se recupera calor. Este calor se envía hacia las turbinas de vapor para generación de fuerza eléctrica

El lodo estabilizado sigue los siguientes pasos para su uso en recuperación de energía y aprovechamiento final:

- Cribado de lodos para eliminación de sólidos gruesos

Ilustración 14.1 Aptitud de los diferentes tipos de suelos para la instalación de rellenos de lodos Fuente: CEPIS/OPS 1997



- Acondicionamiento y deshidratación con centrífugas
- Secado. Un parte del lodo deshidratado se lleva un sistema de deshidratación y secado con vapor
- Combustión de lodo. El lodo seco se lleva a un proceso de combustión. Los gases de combustión se utilizan para la producción de vapor. Este vapor se utiliza en las turbinas de vapor para generación de energía eléctrica. La ceniza se puede utilizar en la construcción de ladrillos u otros usos
- Tratamiento y disposición final. En caso de que el lodo deshidratado no se lleve a combustión este puede llevarse hacia un proceso de composteo, para uso en suelo o como cubierta de rellenos sanitarios

14.6. Calidad y tratamiento del biogás

El biogás generado en los reactores anaerobios como producto de la transformación del material orgánico presente en las aguas residuales, tiene un valor energético que muchas veces no es aprovechado. Esto se debe a que su manejo resulta ser relativamente complicado, debido a que para ciertos usos se tienen que realizar algunos pasos de purificación antes de su almacenamiento y utilización. Estos pasos consisten en el lavado y secado del biogás con objeto de eliminar o disminuir el contenido de ácido sulfhídrico (H_2S) y bióxido de carbono (CO_2), hasta valores en los cuales su efecto corrosivo sea mínimo. El almacenamiento del biogás se realiza en tanques, por lo que se pueden utilizar: tanques de presión baja (que tienen una campana flotante), tanques cilíndricos de presión media, tanques de alta presión y como gas licuado. Conforme aumenta la presión de almacenamiento, los requerimientos de pureza del biogás se incrementan, haciendo costoso su manejo. En la Tabla 14.25 aparece la calidad del biogás requerida en Europa para diferentes usos.

Existen varios procesos o métodos para la purificación del biogás generado de la estabilización anaerobia, entre estos se encuentran:

Eliminación de agua

- La condensación del vapor de agua, se realiza por enfriamiento o en trampas a temperatura ambiente, o por compresión y enfriamiento. Los procesos utilizados son:
- Adsorción en líquidos, mediante el uso de soluciones concentradas de LiCl, NaCl o $CaCl_2$ o bien con etilglicol o trietilenglicol, que son los líquidos higroscópicos más frecuentemente seleccionados
- Adsorción física en sólidos, que requiere de sólidos parcialmente deshidratados como alúmina activada (Al_2O_3 –1/2 H_2O), silica gel o mallas moleculares
- Adsorción química de sólidos, en donde se emplean compuestos tales como cloruro de calcio, óxido de calcio

La eliminación de CO_2 se puede llevar mediante lo siguiente:

- La reacción con sólidos, con soluciones alcalinas (hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de potasio (KOH), cal viva ($Ca(OH)_2$)
- Con etanolaminas
- Absorción con agua
- Absorción con metanol

Tabla 14.5 Calidades del biogás requerido para diferentes aplicaciones en Europa. (Deublein and Steinhauser,2011)

Valor calorífico bruto y componentes del gas	Motores de gas	Celdas de combustible [a)] MCFC	Celdas de combustible [a)] PEFC, PAFC	"Gas verde" para vehículos de acuerdo a la ISO/DIS 15403	Adición de gas natural de acuerdo a DVGW G 260
Valor calorífico bruto	n. a.	n. a.	n. a.	No hay valor mínimo	8.4-13.1 kWh $\cdot m^{-3}$
CH_4	Mínimo 430 mg Nm^{-3} (60 por ciento por volumen)	n. a	n. a	>96 por ciento	No hay valor mínimo
H_2S	<200 mg Nm^{-3} (0.013 por ciento por volumen)	<0.1 mg Nm^{-3}	n. a	≤5 mg Nm^{-3}	<5 mg Nm^{-3}
Azufre total sin agentes odorizantes	<2200 mg Nm^{-3} [b)]	0.1 mg Nm^{-3}	0.05 mg Nm^{-3}	<120 mg Nm^{-3}	<30 mg Nm^{-3}
COS	n. a	<0.14 mg Nm^{-3}	n. a	n. a	n. a
Thiol (mercaptano) azufre	n.a	n.a	n.a	<15 mg Nm^{-3}	<6 mg Nm^{-3}
CO_2	~6 mg Nm^{-3}	n. a	n. a	<3 por ciento	<6 por ciento por volumen
O_2	n. a	<1 por ciento	<1 por ciento	<3 por ciento	<3 por ciento neto en seco <5 por ciento neto en húmedo
Hidrocarbonos	n. a	n.a	n. a	<1 por ciento	<Al punto de rocío (a la presión y temperatura relevante
Agua	<80 por ciento de humedad relativa	Al punto de rocío<15°C	n. a	<30 mg Nm^{-3}	<50 mg Nm^{-3}
Vapores de aceite ($<C_{10}$)	3000 mg Nm^{-3} [b]	n. a	n. a	<70-200 mg Nm^{-3}	n. a
Vapores de aceite ($>C_{10}$)	250 mg Nm^{-3} [b]	n. a	n. a	<70-200 mg Nm^{-3}	n. a
Glicol/metanol	n.a	n. a	n. a	Técnicamente libre	n.a
Polvo	<10 mg Nm^{-3} [b]	-	n. a	Técnicamente libre <1µm	Técnicamente libre
Tamaño de partícula	3-10 µm	Tamaño de 1µm	-	-	-
NH_3	<30 mg Nm^{-3} [b]	<400 mg Nm^{-3}	n.a	n.a	n.a
Polisiloxanos	0.2 mg Nm^{-3}	n. s	n.a	n.a	n.a
Cloro	100 mg Nm^{-3} [b]	0.1 mg Nm^{-3}	n.a	n.a	n.a
Flúor	50 mg Nm^{-3} [b]	0.01 mg Nm^{-3}	n.a	n.a	n.a
Metales pesados	n.a	0.1 mg Nm^{-3}	n.a	n.a	n.a
CO	n.a	n. a	0.1 mg Nm^{-3}	n.a	n.a
Hg	n.a	30-35 mg Nm^{-3}			
Halógenos	100 mg Nm^{-3}	0.004 mg Nm^{-3}	0.1.1.0 mg Nm^{-3}		

Celdas de combustible: MCFM (molten carbonate fuel cell), celdas de combustible de carbonato fundido; PEFC (polymer electrolyte membrane fuel cell), celda de combustible de electrolito de membrana de polímero; PAFC (phosphoric acid fuel cell), celda de combustible con ácido fosfórico.

Relacionado con el contenido de metano

- Absorción con carbonato de polipropileno
- Membranas permeables
- Mallas moleculares

En la eliminación del H_2S de la fase gaseosa, los procesos que existen, algunos eliminan simultáneamente CO_2, mientras que otros sólo el primer compuesto. Las principales formas para remover H_2S son:

- Absorción en líquidos, con sustancias tales como: aminas, agua, carbonato de potasio, polietilenglicol y metanol. Esta absorción generalmente se realiza en columnas empacadas, al igual que la desorción para la regeneración del absorbente
- Separación mediante membranas
- Formación de sulfuros metálicos, con compuestos tales como óxidos de hierro, zinc, acetato de zinc entre otras
- Oxidación por microorganismos

El proceso más común para el lavado o purificación del biogás consiste en hacerlo pasar a través de una columna de absorción, la cual contiene alguna sustancia química o solvente, como pueden ser cualquiera de las antes mencionadas o

Tabla 14.6 Tecnologías para la descontaminación del biogás (Deublein and Steinhauser,2011)

Tecnología	Costos		Compuesto removido	Temperatura, °C	Presión, bar	Comentarios
	Inversión	Operación				
Absorción						
En agua	+	+	Polvo, CO_2, H_2S, NH_3	3-30	<7	Aplicado a menudo
En químicos						
K_2CO_3 (100 por ciento en agua)	+	++	CO_2	<40	20-30	Depuración con potasio frío
K_2CO_3 (15-30 por ciento en agua)	+	++	CO_2, H_2S	<40	20-30	Depuración con potasio caliente
NaOH (8 por ciento en agua)	+	++	CO_2, H_2S	<40	20-30	Depuración con lejía fría
NH_3 (5 por ciento en agua)	+	++	CO_2	<40	20-30	Depuración con amoniaco
Alcazid M en agua	+	++	CO_2, H_2S	<40	20-30	Depuración con alcazid
Metanolamina	+	+	CO_2, H_2S, COS, CS_2, mercaptanos	<40	20-30	Depuración con amisol
Adsorción con presión o vacío						
Zeolita	++	-	CH_4, N_2	<40	10-12 o 1	Baja selectividad entre el CH_4 y N_2
Carbón	++	-	CO_2, H_2S, COS, H_2O, O_2, NH_3, Hg	<40	10-12 o 1	Aplicado a menudo
Membranas:						
Permeado de gases	++	++	Todo	<40	30	Para la producción de gas L
Adsorción en membrana	++	++	Todo	<40	30	Para la producción de gas L
Procesos criogénicos	++	++	CH_4	<-80	200	
++,Muy adecuado; +,Adecuado;–,Menos adecuado; -,No adecuado; ND=No hay datos						

inclusive agua bajo presión. Al entrar en contacto con la sustancia, el H_2S y/o CO_2 se solubilizan, lo que produce una corriente gaseosa con alto contenido de metano (CH_4). Estos solventes pueden regenerarse empleando una segunda columna conocida como desorbedora o de regeneración.

La elección del método o técnica de purificación que debe emplearse en la limpieza del biogás generado en un sistema de tratamiento anaerobio, depende principalmente del flujo de biogás disponible y de la pureza de metano que se desee alcanzar lo que lleva a determinar la viabilidad económica de la purificación.

Tabla 14.7 Equipo utilizado para el tratamiento del biogás

Equipo	
Filtro de arena y cerámina. La filtración de gas sobre materiales como arena, antracita y cerámica se utiliza para remover diferentes tamaños de partículas que se encuentren en el biogás.	 Ilustración 14.2 Filtro de cerámica. Cortesía PTAR de León, Guanajuato
Deshumidificador. El biogás debe tener una humedad relativa menor de 60 por ciento para evitar la formación de condensado en las tuberías. El biogás se puede secar por compresión, enfriamiento, adsorción sobre alúmina activada o sílica gel o con absorción principalmente sobre soluciones de glicol.	 Ilustración 14.3 Deshumidificador de biogás

Tabla 14.7 Equipo utilizado para el tratamiento del biogás (continuación)

Equipo	
Torre para remoción de sulfuros. El gas se puede pasar por torres de adsorción, torres con catalizadores metálicos o biofiltros para la remoción de sulfuros.	 Ilustración 14.4 Torre biológica para desulfuración. Cortesía PTAR León, Guanajuato
Adsorbedor de carbón activado. Los adsorbedores con carbón activado se utilizan para remoción de siloxanos, compuestos presentes en el biogás y que pueden adsorberse en este medio.	 Ilustración 14.5 Filtración y adsorción del biogás. Cortesía de Conagua

14.7. Equipo utilizado para el aprovechamiento del biogás

El biogás puede utilizarse para para la generación de energía eléctrica o cogeneración en máquinas de combustión interna, turbinas de combustión, microturbinas, calentadores, máquina ciclo Stirling y celdas de combustible.

Equipo requerido para el aprovechamiento de biogas.

Quemadores de biogás. Los quemadores (Ilustración 14.6) previenen el escape directo del gas a la atmósfera y es esencial para el control ambiental. Por supuesto, se debe evitar quemar el biogas ya que este representa una pérdida de energía y es preferible cuando hay exceso o no se puede utilizar enviarlo hacia otro sistema de aprovechamiento. La tubería de alimentación de biogás al quemador debe contar con una válvula de aislamiento de operación manual, un interruptor automático de la alimentación de biogás, una trampa de flama, un mecanismo de encendido automático, equipo de control de flama y

pararrayos. Por lo tanto todo sistema de generación de biogás debe tener quemadores para casos de emergencia. Deben instalarse a una altura de por lo menos cuatro metros, y como a cinco metros de distancia de los edificios, vías de tránsito, almacenamiento de materiales inflamables, etc. Se debe definir y confinar el área alrededor del quemador como protección contra explosión.

Ilustración 14.6 Quemador de biogás. Cortesía Conagua

Tanques de almacenamiento. El biogás puede pasar en forma directa o después de una filtración para eliminar partículas suspendidas hacia un tanque de almacenamiento y de distribución hacia los sistemas de aprovechamiento. El biogás sale de los reactores con una presión de aproximadamente 2 mbar y tiene una primera compresión hasta 135 mbar para almacenamiento o para purificación. El volumen del tanque de almacenamiento (Ilustración 14.7) debe calcularse cuidadosamente para que sea un tanque regulador del sistema de uso del biogás y que no se generen excesos que deban quemarse produciendo pérdida de energía. Los tanques de almacenamiento son de alto costo. En una planta de tratamiento el volumen del tanque de almacenamiento es generalmente para almacenar de 0.75 a 1.5 veces la producción diaria de gas. Existen varios tipos de tanques de almacenamiento según la presión de operación. Los de baja presión son los más utilizados y pueden ser de doble membrana, bolsas de gas, tanques de acero, o tanques con cubierta flotante. Los tanques de almacenamiento para gas de alta y media presión requieren más cuidado para el control de la compresión y expansión de biogás. Se fabrican en acero con estrictas medidas de seguridad por el riesgo de explosión.

Licuefacción o compresión del biogás. Dependiendo del uso del biogás este debe comprimirse o licuarse. Esto se hace de la misma forma como se maneja el gas natural. El gas licuado se prefiere como combustible de vehículos ya que reduce el volumen y proporciona alta densidad de fuerza. Toda licuefacción del gas conlleva etapas de compresión y posteriormente expansión irreversible o parcialmente irreversible en máquinas de expansión. De igual forma el biogás se comprime como el gas metano. Para la compresión del biogás (Ilustración 14.8) se utilizan compresores de pistón reciprocantes, compresores de pistón rotatorios, compresores centrífugos, etc. La compresión se puede hacer en una o varias etapas dependiendo del uso del biogás.

El biogás puede utilizarse para:

Generación de energía eléctrica. Uso en la planta de tratamiento o para el alumbrado público. Esto depende de la cantidad de gas generado. Para generación de fuerza se utilizan ge-

neradores asincrónicos y sincrónicos. Entre los generadores de fuerza se encuentran las turbinas y microturbinas de gas, los motores diésel y las celdas de combustible.

Generación combinada de calor y fuerza (Cogeneración)

Los sistemas de cogeneración son los más utilizados en las plantas de biogás. En estas unidades se produce corriente eléctrica y se desarrolla o produce un porcentaje más o menos alto de calor, dependiendo de la fuerza del generador utilizado. En Europa el 50 por ciento de los equipos de cogeneración instalados en plantas de tratamiento trabajan con motores de cuatro tiempos, y el otro 50 por ciento motores diésel. Tecnologías más modernas como las celdas de combustión y las microturbinas se empiezan a utilizar en plantas de tratamiento de Estados Unidos y de Europa. La eficiencia total, es decir la energía eléctrica y térmica, en las máquinas de cogeneración modernas está entre el 85 y 95 por ciento. Solo se pierde entre un 10 y 15 por ciento del biogás. Sin embargo, la eficiencia eléctrica es todavía baja (sólo 40 por ciento). De 1 m^3 de biogás se produce solamente 2.4 k· W·h de corriente eléctrica (Deublein and Steinhause, 2011).

Un equipo completo de cogeneración incluye lo siguiente:

- Una unidad de manejo o accionamiento y el generador
- Un sistema para el biogás
- Ventiladores para el suministro de aire de combustión y para disipar el calor radiante generado en los motores, generador y tuberías
- Sistema de amortiguamiento de ruido (silenciadores)
- Lubricación automática

El tiempo estimado para la reparación y mantenimiento de la unidad es de 30 días al año.

14.8. Ejemplo sobre la estimación de la producción de biogás

Calcular la producción de biogás en base a la destrucción de SV que se genera en un reactor anaerobio que trata una mezcla de lodo primario crudo y lodo secundario espesado con las características que se presentan en la Tabla 14.9 y que opera a una temperatura de 30 a 36 °C.

Ilustración 14.7 Tanque para almacenamiento de biogás. Cortesía CONAGUA

Ilustración 14.8 Sistema de compresión de biogás. Cortesía PTAR de León, Guanajuato

Tabla 14.8 Datos del lodo primario y secundario para estimar la producción de biogas en terminos a la reducción de SSV

Parametro	Lodo primario sin tratamiento	Lodo secundario espesado
Caudal, $m^3 \cdot d^{-1}$	2 000	2 000
ST, por ciento	3-3.5	4-5
Carga, $kg \cdot d^{-1}$	101 850	43 920
Reducción total de SSV, por ciento	50-60	

El cálculo de la producción de biogás se presenta manejando dos métodos diferentes en base a la reducción de SSV; 1) Considerando el porcentaje de reducción de SSV con base en el balance de masa en el reactor y 2) Realizando el cálculo utilizando una ecuación que relaciona la reducción de SSV con el tiempo de retención de sólidos en el reactor, (Metcalf & Eddy, 2003).

Solución:

La producción del biogas se estima a partir de la producción específica, que de acuerdo a la literatura (US, EPA, 1979), (WEF, *et al*., 2012) y (Metcalf & Eddy, 2003), es de 0.75-1.1 m^3 biogás kg^{-1} SV destruidos. La Ecuación 14.4 se obtiene a partir de esto.

$$Q_{Biogas} = 1.1 \times M_{OD}$$

Ecuación 14.4

Para ambos métodos se debe realizar un balance de masas; el cual se presenta en la Ilustración 14.12. De este balance se obtienen las siguientes ecuaciones: Ecuación 14.5, Ecuación 14.6, Ecuación 14.7 y Ecuación 14.8. Con las cuales se podrá calcular el valor de la variable M_{OD}.

$$M_{OD} = M_{OLC} - M_{OLE} = P_{DSV} \times M_{OLC}$$

Ecuación 14.5

Ilustración 14.9 Unidad de cogeneración. Cortesía de Conagua

donde:

M_{OD} = Masa orgánica destruida, t d^{-1}

M_{OLC}= Masa orgánica de lodo crudo o sin estabilizar, t d^{-1}

M_{OLE}= Masa orgánica lodo estabilizado, t d^{-1}

P_{DSV}= Porcentaje de destrucción de SV, por ciento

$$M_{OLC} = M_{OLP} + M_{OLS}$$

Ecuación 14.6

donde:

M_{OLC}= Masa orgánica de lodo crudo o sin estabilizar, t d^{-1}

M_{OLP}= Masa orgánica de lodo primario sin estabilizar, t d^{-1}

M_{OLS}= Masa orgánica de lodo secundario sin estabilizar, t d^{-1}

$$M_{OLP} = Fraccion\ de\ SV\ en\ el\ lodo\ primario \times M_{LP}$$

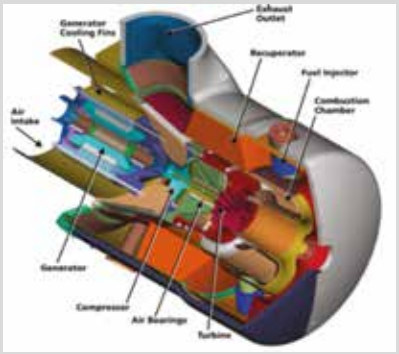
Ecuación 14.7

donde:

M_{OLP}= Masa orgánica de lodo primario sin estabilizar, t d^{-1}

M_{LP}= Masa de lodo primario sin estabilizar, t d^{-1}

Tabla 14.9 Equipos utilizados para producir energía en sistemas de uso de biogás

Microturbinas Tienen alta velocidad de combustión. Su capacidad varía entre 30 y 250 kW. Se utilizan en las unidades de generación y de cogeneración.	 Ilustración 14.10 Microturbinas
Turbinas de vapor y calderas de vapor. Se utiliza para quemar el gas de los reactores en grandes calderas y generar vapor de alta presión y electricidad.	 Ilustración 14.11 Calderas para producción de vapor. Cortesía PTAR de León, Guanajuato.
Turbinas de gas Las turbinas queman una mezcla de aire comprimido y combustible. Capturan la energía de los gases generados en la combustión. Son atractivas para la generación de energía eléctrica o la alta temperatura de los gases de salida se aprovecha para generar agua caliente o vapor.	
Celdas de combustible. Una celda de combustible es un equipo electroquímico que toma el hidrógeno del biogás y el oxígeno del aire para producir electricidad en forma continua.	 Ilustración 14.12 Celda de combustible

$$M_{OLS} = Fraccion\ de\ SV\ en\ el\ lodo\ secundario \times M_{LS}$$

Ecuación 14.8

donde:

M_{OLS}= Masa orgánica de lodo secundario sin estabilizar, t d^{-1}

M_{LP}= Masa de lodo secundario sin estabilizar, t d^{-1}

1. Primer método, tomando el valor de la destrucción de SV que se da en los datos del ejemplo.

De acuerdo a la Ecuación 14.5 para calcular la masa orgánica destruida (M_{OD}) es necesario determinar la masa orgánica del lodo crudo (M_{OLC}) por lo tanto:

Con la Ecuación 14.7 se calcula la masa de lodo primario sin estabilizar, considerando una fracción de SV de 0.65 en el lodo primario.

Si no se conoce el porcentaje de SSV en el afluente, generalmente se usan datos de la literatura; ((Metcalf & Eddy, 2003), Tabla 12-4, p.771), en donde se indica que los SV en lodo primario están dentro de un rango de 60 a 80 por ciento de los ST y con un valor típico de SV = 65 por ciento o 0.65 en fracción. Sustituyendo los datos en la Ecuación 14.7 tenemos:

$$M_{OLP} = 0.65 \times (101.85\, t\ \ d^{-1}) = 66.20\ t\ \ d^{-1}$$

Ecuación 14.9

Con la Ecuación 14.8 se calcula la masa de lodo secundario sin estabilizar, considerando una fracción de SV de 0.8 en el lodo secundario.

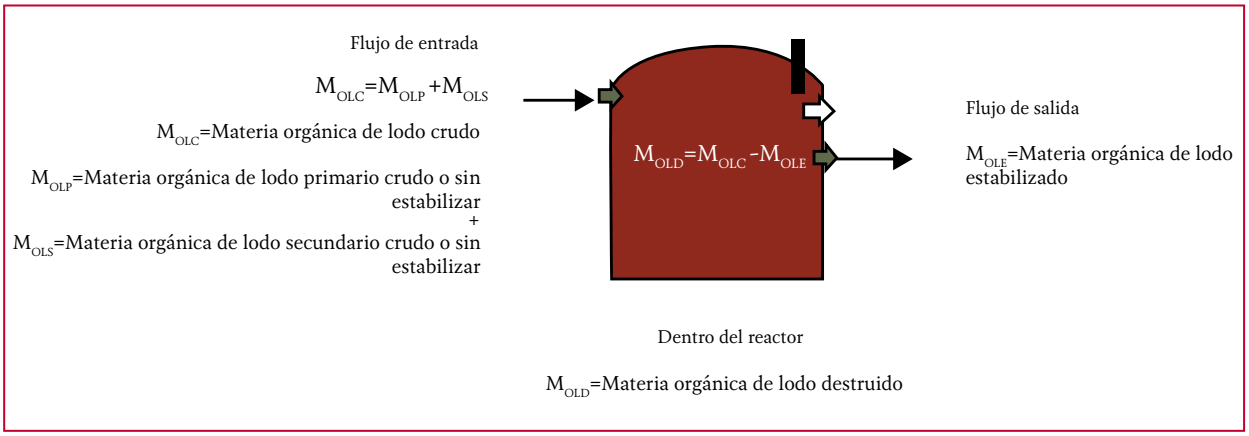
Si no se conocen los SSV en el afluente, se toman de la literatura; ((Metcalf & Eddy, 2003), Tabla 12-14 y 12-8, p.771), El lodo extraído del sedimentador secundario después de lodos activados generalmente tiene una concentración alrededor de 0.8 (0.5-0.85). La fracción orgánica del lodo residual es alrededor del 80 por ciento de la masa de lodos. Al sustituir los datos en la Ecuación 14.8 obtenemos:

$$M_{OLS} = 0.08 \times (43.92\, t\ \ d^{-1}) = 35.13\, t\ \ d^{-1}$$

Ecuación 14.10

Una vez calculada la masa orgánica del lodo primario y secundario, a partir de la Ecuación 14.6 se calcula la masa orgánica del lodo crudo o sin estabilizar.

Ilustración 14.13 Diagrama del balance de masa para la producción de biogas en un digestor anaerobio, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) y (Von Sperling & Augusto de Lemos Chernicharo, 2005)



$$M_{OLC} = 66.20\,t\ \ d^{-1} + 35.13\,t\ \ d^{-1}$$
$$= 101.338\ \ t\,d^{-1} = 101\ 338\,ka\ \ d^{-1}$$

Ecuación 14.11

Con la Ecuación 14.5 se calcula la masa orgánica destruida, tomando el porcentaje de reducción de SV que menciona el ejemplo. Por lo tanto se tiene:

$$M_{OD} = P_{DSV} \times M_{OLC} = 0.55 \times 101\ 338\ kg\ \ d^{-1} =$$
$$= 55\ 736.18\,kg\ \ d^{-1}$$

Ecuación 14.12

Para la producción de biogás se utiliza la Ecuación 14.4. Obteniendo la siguiente ecuación.

$$Q_{Biogas} = 1.1\,m^3\,biogas\ \ kgSV\ destruidos^{-1} \times 55\ 736.18\,kg\ \ d$$
$$= \boldsymbol{61\ 309.79\ m^3 biogas\ \ d^{-1}}$$

Ecuación 14.13

Cantidad de metano producida

$$Q_{Biogas} = \frac{1}{0.65} \times Q_{Metano}$$

Ecuación 14.14

$$Q_{CH4} = 61\ 309.79\,m^3\,biogas\ \ d^{-1} \times 0.65 = 39\ 851.4\,m^3\,metano\ \ d^{-1}$$

Ecuación 14.15

2. Segunda alternativa, a partir de la Ecuación 14.16 calcular el por ciento de destrucción de SV

$$Vd = 13.7 \ln(TRS) + 18.9$$

Ecuación 14.16

donde

Vd = Destrucción de sólidos volátiles, por ciento

TRS = Tiempo de retención de sólidos de diseño, días

Puesto que no conocemos el TRS, partiendo de la temperatura de operación del reactor anerobio que es de 30-36 °C se toma el valor del TRS que se presenta en la Tabla 14.10. Partiendo de esto se toma un valor de 14 d para una temperatura de 30 grados centígrados.

Tabla 14.10 TRS sugeridos para su uso en el diseño de reactores anaerobios de mezcla completa, (Metcalf & Eddy, 2003)

Temperatura de operación, °C	TRS mínimo, d	TRSdes, d
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

Sustituyendo los valores tenemos:

$$Vd = 13.7 \ln(14) + 18.9 = 50.5\,\% = 0.505$$

Ecuación 14.17

Con la Ecuación 14.5 se calcula la masa orgánica destruida, utilizando el mismo valor de M_{OLC} calculado en el primer método.

$$M_{OD} = P_{DSV} \times M_{OLC} = 0.505 \times 101\ 338\ kg\ \ d^{-1} = 51\ 175.69\,kg\ \ d^{-1}$$

Ecuación 14.18

La producción del biogás se estima a partir de la producción específica, que de acuerdo a la literatura (US, EPA, 1979), (WEF, *et al*., 2012) y (Metcalf & Eddy, 2003), es de 0.75 -1.1 m^3 biogas kg SV destruidos. A partir de esto se obtiene la Ecuación 14.19.

$$Q_{Biogas} = 1.1 \times M_{OD}$$

Ecuación 14.19

$$Q_{Biogas} = 1.1\, m^3\, biogas\ \ kgSV\ destruidos^{-1} \times 51\ 175\, kg\ \ d^{-1}$$
$$= \boldsymbol{56\ 293.25\ m^3\ biogas\ \ d^{-1}}$$

Ecuación 14.20

Comparando este caudal de biogás de 56 293.25 m^3 de biogas d^{-1}, contra el obtenido en la primera alternativa de 61 309.79 m^3 de biogas d^{-1}, se observa que la diferencia de cálculo entre los dos métodos es de 14 por ciento. Por lo tanto la correlación empírica puede servir para una estimación rápida de la producción de biogás en reactores anaerobios.

15

Estimación de costos

15.1. Introducción

En este capítulo se presenta la estimación de costos y el diseño de algunos sistemas de tratamiento de lodos, los cuales se realizaron por medio del software CapdetWorks. Los sistemas de tratamiento de lodos que se diseñaron y estimaron sus costos fueron: acondicionamiento químico, espesamiento por gravedad en bandas, espesamiento por gravedad, espesamiento por flotación con aire disuelto, estabilización aerobia, estabilización anaerobia, deshidratación con lechos de secado, deshidratación con filtros prensa de bandas y deshidratación con centrífugas.

En base a los programas de diseño del software CapdetWorks 2.5, se ejecuto el diseño de los diferentes sistemas de tratamiento de lodos que se presentan. La estimación de los costos de construcción se realizó en base a los costos que maneja el software CapdetWorks 2.5, únicamente se tomó del software maestro de precios unitarios NEODATA los costos de excavación, el costo de la renta de la grúa y el costo de los barandales. Todos los costos de equipamiento corresponden a la base de datos que contiene el software CapdetWorks 2.5. Los costos de mano de obra corresponden al salario establecido en México. La tarifa de energía contemplada es la establecida por CFE. En la estimación de los costos el valor del terreno no se consideró, ya que este puede variar demasiado dependiendo de la zona en donde se va a construir la planta de tratamiento de aguas residuales.

Los costos que se estimaron fueron: costos de construcción, equipamiento y el costo de operación durante un año. Dentro de los costos de construcción se incluye todos los costos relacionados con la construcción de los edificios y estructuras de los equipos, mano de obra, materiales, suministros, entre otros. Los costos de equipamiento contemplan: el costo de los equipos, bombas, tubería, tanques, mezcladores, difusores, válvulas, sistema de control automático, dosificadores; accesorios y herramientas que necesiten los equipos; así como la instalación de estos. Los costos de operación abarcan, la mano de obra de operación, el mantenimiento de los equipos, accesorios, materiales, suministros, energía y el costo de amortización.

Dentro de los costos directos que el software CapdetWorks 2.5 considera están: los costos de preparación y montaje, preparación del terreno, instalación eléctrica, sistema de tuberías, sistema de control e instrumentación, edificios de laboratorio y administración, los costos de construcción de cada proceso unitario, las ganancias. En los costos indirectos el software contempla: costos misceláneos, costos legales, honorarios del diseño de ingeniería, costos de inspección, costos de contingencia y técnicos.

Para establecer los costos del tratamiento de lodos, es necesario determinar el caudal de lodo primario y secundario a tratar, así como la caracterización de estos lodos. Estos datos requeridos se obtuvieron al realizar la simulación de

una planta de tratamiento de aguas residuales que cuenta; con un sistema de rejillas, un sedimentador primario, un sistema de lodos activados convencional, un sedimentador secundario y finalmente cloración. Para esta simulación se utilizaron los datos de la caracterización de un agua residual municipal que realizó el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. En la Tabla 15.1 se presentan los parámetros y valores que incluye esta caracterización.

De acuerdo a los resultados de la caracterización y a la literatura (Metcalf & Eddy, 2003), el agua residual municipal corresponde a un agua residual municipal de carga media.

Con el objetivo de obtener los costos de tratamiento de lodos para tres diferentes tamaños de plantas de tratamiento, se simularon tres caudales promedio diferentes de agua residual cruda; 20 L s^{-1}, 200 L s^{-1} y 800 L s^{-1}, que corresponden a 3 capacidades o tamaños diferentes de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, con lo que se obtuvieron tres diferentes caudales y características de lodos primario y secundario.

15.2. Objetivos

El objetivo de este capítulo es presentar la estimación de costos de los diferentes sistemas de tratamiento de lodos que más se utilizan en las PTAR de México, para tres diferentes caudales promedio de agua residual tratada 20 L s^{-1}, 200 L s^{-1} y 800 L s^{-1}, y así poder hacer una comparación de los costos de los diferentes sistemas de tratamientos de lodos entre una PTAR de la misma capacidad y que el lector pueda tener una idea del costo de un tren de tratamiento de lodos. Un aspecto importante a considerar es que los costos que se presentan únicamente son costos aproximados, ya que estos pueden variar dependiendo del costo de construcción, mano de obra, proveedores de los equipos y de los materiales para el equipamiento, costo del terreno entre otros. Por lo tanto, un tren de tratamiento de lodos puede tener costos más altos o menores a los que se presentan en este capítulo.

Tabla 15.1 Caracterización del agua residual de una PTAR (IMTA, 2013)

Parámetros y unidades	Valor
SST, mg L^{-1}	165±70
SSV, mg L^{-1}	119±55
por ciento SSV	75 por ciento
DBO, mg L^{-1}	315±46
DBO soluble, mg L^{-1}	80
DQO, mg L^{-1}	513±78
DQO soluble, mg L^{-1}	300
NTK, mgN L^{-1}	45.25
NTK soluble, mgN L^{-1}	28
N amoniacal, mgN L^{-1}	30±7.5
PT, mgP L^{-1}	11±1.04
G y A, mg L^{-1}	65.4
Nitritos, mg L^{-1}	0.052±0.042
Nitratos, mg L^{-1}	0.200±0.028
pH	7.41±0.19
Temperatura en verano, °C	23
Temperatura en invierno, °C	10
*Cationes, mg L^{-1}	160
*Aniones, mg L^{-1}	160
*Sólidos sedimentables, mL L^{-1}	10
*Fracción de SSV no biodegradables, por ciento	40

*Son valores tomados del programa (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

15.3. Estimación de costos para el tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal promedio de 20 L s^{-1} de agua residual cruda

A continuación se presentan los resultados de los costos de construcción, equipamiento, operación y mantenimiento de cuatro diferentes trenes de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal promedio de 20 L s^{-1}, lo cual equivale a 1 730 m^3 d^{-1} de agua residual, teniendo un caudal mínimo de 864 m^3 d^{-1} y un caudal máximo de 2 590 m^3 d^{-1}. También se presenta el diseño de cada uno de los sistemas que integran los cuatro diferentes trenes de tratamiento de lodos.

Las simulaciones se realizaron utilizando un sistema de tratamiento de lodos que considera: espesamiento, acondicionamiento químico, estabilización y deshidratación. El acondicionamiento de lodos ya está integrado en los equipos de espesamiento y deshidratación, excepto en el sistema de espesamiento por gravedad en el cual no se contempla acondicionamiento químico de lodos. En el diagrama de flujo de la PTAR se visualiza el esquema del equipo correspondiente a cada sistema, menos el del condicionamiento quimico. En la Tabla 15.2 se muestran los cuatro diferentes trenes de tratamiento propuestos.

15.3.1. Primer tren de tratamiento

En la Ilustración 15.1 se presenta el esquema de la PTAR incluyendo el tren de tratamiento de lodos.

Como se puede observar en el esquema de la Ilustración 15.1 la generación de lodo en la planta es a través del sedimentador primario y del secundario, los cuales presentan características diferentes que se muestran en la (Tabla 15.3). Estas características de lodo primario y secundario son las que se tomaron en cuenta para desarrollar todas las simulaciones y obtener los resultados de diseño y costos para los diferentes sistemas de tratamiento de lodo generado por una PTAR que trata un caudal promedio de 20 L s^{-1} de agua residual cruda.

15.3.1.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

Con las características mencionadas en la Tabla 15.3, se realizó el diseño de los sistemas del tren de tratamiento de lodos tomando en cuenta esta mezcla de lodo primario y secundario crudo.

Tabla 15.2 Trenes de tratamiento para un caudal de 20 L·s-1

Tren	Unidades de tratamiento
1	Estabilización aerobia, espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico y con recirculación de lodos hacia el reactor correspondiente a la estabilización aerobia de lodos y deshidratación por lechos de secado.
2	Estabilización aerobia, espesamiento por gravedad en bandas con acondicionamiento químico y con recirculación de lodos hacia el reactor correspondiente a la estabilización aerobia de lodos y deshidratación por filtro banda con acondicionamiento químico.
3	Espesamiento por gravedad, estabilización anaerobia y deshidratación por lechos de secado.
4	Espesamiento por gravedad, estabilización anaerobia y deshidratación por filtro banda y acondicionamiento químico.

Ilustración 15.1 Esquema de la PTAR y del sistema de tratamiento de lodos que tiene estabilización aerobia, espesamiento por gravedad y lechos de secado para una PTAR que trata un caudal promedio de agua residual de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

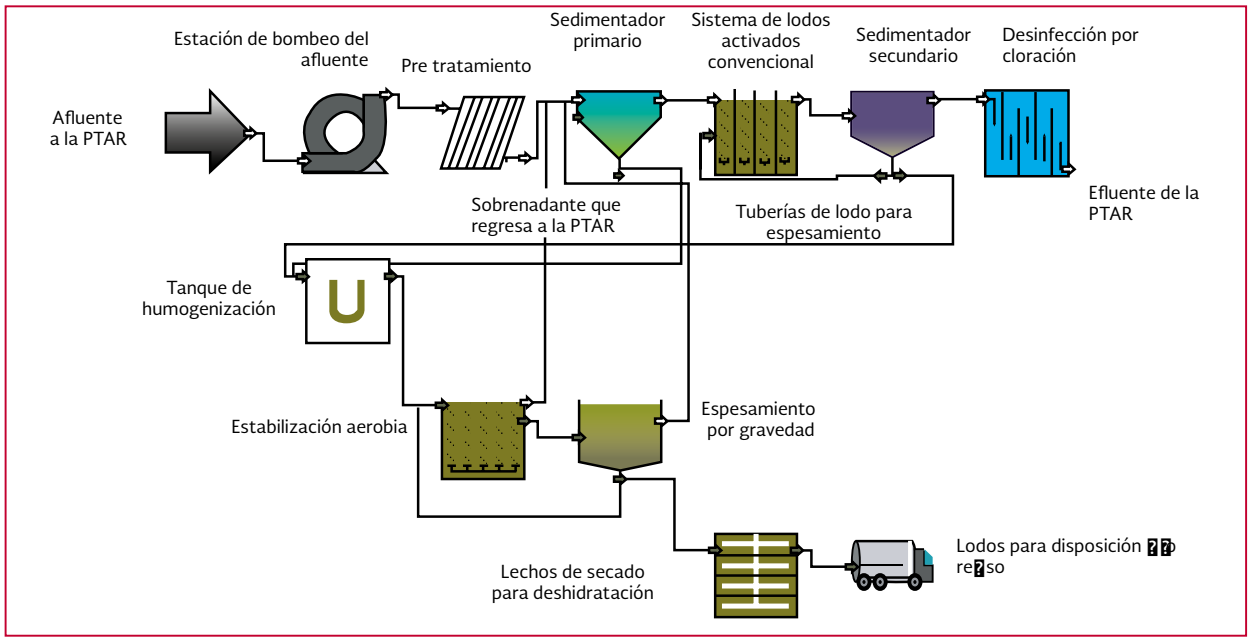


Tabla 15.3 Características del lodo generado en la PTAR con un caudal promedio de 20 L s-1, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetros	Unidades	Sedimentador primario	Sedimentador secundario
Flujo promedio	$m^3\ d^{-1}$	7.52	26.1
Sólidos suspendidos	$g\ m^{-3}$	40 000	10 000
Sólidos volátiles	%	55.3	55.5
DBO	$g\ m^{-3}$	17 200	1 810
DBO soluble	$g\ m^{-3}$	78.9	1.86
DQO	$g\ m^{-3}$	50 200	8 320
DQO soluble	$g\ m^{-3}$	320	2.79
NTK	$gN\ m^{-3}$	501	556
NTK soluble	$gN\ m^{-3}$	27.8	0.885
N amoniacal	$gN\ m^{-3}$	24.6	0.885
Nitritos	$gN\ m^{-3}$	0	0
Nitratos	$gN\ m^{-3}$	0.549	29.9
PT	$gP\ m^{-3}$	105	6.43
pH		7.6	7.6
Cationes	$g\ m^{-3}$	160	160
Aniones	$g\ m^{-3}$	160	160
Sólidos sedimentables	$mL\ L^{-1}$	0	0
Grasas y aceites	$g\ m^{-3}$	98.4	0
Temperatura en verano	°C	23	23
Temperatura en invierno	°C	10.2	10.2

Tabla 15.4 Resultados del diseño del sistema de bombeo del lodo primario y secundario al tren de tratamiento del lodo de la PTAR que trata un caudal de 20 L s-1 de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Resultados para el sistema de bombeo		Unidades
	Lodo primario	Lodo secundario	
Caudal de bombeo promedio diario	7.52	26.1	$m^3\ d^{-1}$
Capacidad total de bombeo	7.52	26.1	$m^3\ d^{-1}$
Capacidad de diseño por bomba	3.76	13.1	$m^3\ d^{-1}$
Número de bombas	3	3	
Número de baterías	1	1	
Capacidad de bombeo firme	7.52	26.1	$m^3\ d^{-1}$
Horas de personal de operación requeridas	198	232	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	144	173	Horas hombre por año
Energía requerida	67.6	234	KWh por año
Volumen de movimiento de tierras requerido	45.3	45.3	m^3
Área de construcción para las bombas	18.6	18.6	m^2

Bajo estas condiciones. en la Tabla 15.4 se presentan los resultados obtenidos del diseño del sistema de bombeo del lodo primario y secundario hacia el tren de tratamiento de lodos.

En la Tabla 15.5 se presenta el diseño del primer sistema del tren de tratamiento de lodos es la estabilización aerobia.

Tabla 15.5 Resultados del diseño del sistema de estabilización aerobia del primer tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 20 L·s-1 de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo de retención de sólidos	12.9	d
Diseño SS	12 000	g m^{-3}
SSV calculado	33.6	g m^{-3}
Relación SST:SSV calculada	0.0028	mg SSV/mg SS
Volumen total de los reactores	701	m^3
Longitud del tren	8	m
Ancho del tren	10	m
Profundidad lateral del agua	5	m
Número de baterías	1	
Número de equipos en paralelo por batería	2	
Requerimiento de oxígeno para satisfacer la demanda promedio	7.13	kg d^{-1}
Flujo de aire necesario para satisfacer la demanda promedio	833	*N m^3 hr^{-1}
Flujo de aire de diseño	19.8	*N m^3 min^{-1} 1000 m^3
Carga de sólidos volátiles	2.11	kg m^{-1} yr^{-1}
Sólidos acumulados	650	kg d^{-1}
Capacidad del reactor	8 410	kg
Volumen de lodo residual	320	m^3
Mano de obra de operación requerida	770	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	364	Horas hombre por año
Energía eléctrica requerida	144 000	kWh por año
Volumen de movimiento de tierras requerido	741	m^3
Volumen de losa de hormigón requerido	155	m^3
Volumen de muro de hormigón requerido	135	m^3
Longitud del pasamanos	40.4	m
Número de difusores por tren	24	
Número de cabezales por tren	2	

*Nm^3 por minuto o por hora, son m^3 normales de aire por hora o por minuto.

En la Tabla 15.6 se presentan los resultados del diseño del sistema de espesamiento por gravedad.

Tabla 15.6 Resultados del diseño del sistema de espesamiento por gravedad del primer tren de tratamiento para una PTAR que trata un caudal de 20 L s-1 de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Concentración inicial	2.5	por ciento
Concentración de espesamiento	5	por ciento
Carga másica	48.8	kg m^{-2} d^{-1}
Carga hidráulica	0.849	m^3 m^{-2} d^{-1}
Tiempo de retención hidráulico	77.5	h
Número de tanques	1	
Volumen del tanque	80	m^3
Profundidad	2.74	m
Área superficial por tanque	29.2	m^2
Diámetro del tanque	6.1	m
Cantidad de lodos generados	619	kg d^{-1}
Volumen de lodo espesado	10.6	m^3 d^{-1}
Mano de obra requerida para la operación	116	Horas por año
Trabajo de mantenimiento requerido	114	Horas por año
Energía eléctrica requerida	4010	kWh por año
Volumen de movimiento de tierras requerido	134	m^3
Espesor de losa	25.8	cm
Volumen de losa de hormigón requerido	11.4	m^3
Espesor de la pared	29.2	cm
Volumen de muro de hormigón requerido	20.7	m^3

Una vez que el lodo es estabilizado aerobiamente y espesado, pasa a los lechos de secado para la deshidratación de lodos. En la Tabla 15.7 se presentan los resultados del diseño del sistema de deshidratación.

15.3.1.2. Costos

En la Tabla 15.8 y 15.9 se presentan los resultados de la estimación de costos del primer tren de tratamiento de lodos y del sistema de bombeo para una PTAR que trata un caudal promedio de 20 L s^{-1} de agua residual municipal.

En la Tabla 15.8 se presentan los resultados de los costos del sistema de bombeo del lodo primario y secundario hacia el sistema de espesamiento.

Tabla 15.7 Resultados del diseño del sistema de lechos de secado del primer tren de tratamiento de lodo de la PTAR con un caudal de 20 L s-1, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Área superficial total requerida	496	m^2
Profundidad inicial del lodo	30.5	cm
Contenido de sólidos final	50	por ciento
Tiempo de retención en el lecho de secado	28.5	d
Área superficial total requerida para el lecho de secado	496	m^2
Número de lechos	3	
Ärea superficial para cada lecho de secado	165	m^2
Longitud de cada lecho de secado	27.1	m
Volumen de excavación requerido	758	m^3
Volumen de concreto para la pared divisoria	68.2	m^3
Volumen de R. C. en el lugar para las pistas de camiones	11.3	m^3
Volumen de arena	113	m^3
Volumen de grava	151	m^3
Diámetro de la tubería para arcilla	10.2	cm
Longitud total de la tubería para arcilla	1,360	cm
Producción de sólidos en el lodo	265	kg d^{-1}
Horas de personal de operación requeridas	583	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	262	Horas hombre por año

Tabla 15.8 Resultados de la estimación de los costos del sistema de bombeo del lodo primario y secundario al sistema de espesamiento para una PTAR con un caudal de 20 L s-1, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Valor de los costos del sistema de bombeo		Unidades
	Lodo primario	Lodo secundario	
Costo de construcción y equipamiento	321 000	351 000	Pesos
Costos de personal de operación	11 600	13 600	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	6 400	7 050	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	2 240	2 460	Pesos por año
Costos de energía	221	765	Pesos por año
Costos de amortización	32 700	35 700	Pesos por año

Tabla 15.9 Resultados de la estimación de los costos del primer tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 20 L s-1 de agua residual cruda, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

Concepto de los costos	Estabilización aerobia	Espesamiento por gravedad	Lechos de secado	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	3 570 000	978 000	794 000	Pesos
Costos de personal de operación	45 000	6 780	34 100	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	16 300	5 080	11 700	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	419 000	9 780	7 140	Pesos por año
Costos de energía	471 000	13 100	0	Pesos por año
Costos de amortización	363 000	96 400	80 800	Pesos por año

En la Tabla 15.9 se presentan los resultados de los costos del primer tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR que trata un caudal promedio de 20 litros por segundo.

El costo total de construcción y equipamiento del tren de tratamiento, incluyendo los costos del sistema de bombeo y de todo los sistemas del tren de tratamiento, sería de 6 014 000.00 pesos. Con un costo anual de operación de 1 691 916.0 pesos. En este costo de operación se incluye la mano de obra de operación, mantenimiento, energía, materiales, suministros y la amortización. Teniendo un costo total de inversión con un año de operación de 7 705 916.0 pesos.

15.3.2. Segundo tren de tratamiento

En la Ilustración 15.2 se presenta el esquema de la PTAR incluyendo el tren de tratamiento de lodos. Los sistemas de tratamiento de lodos están en el siguiente orden: estabilización aerobia, espesamiento por gravedad en bandas con recirculación al sistema de estabilización aerobia y finalmente deshidratación de lodos por medio de filtro prensa de bandas.

El sistema de espesamiento y deshidratación incluye acondicionamiento químico de lodos.

15.3.2.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

En la Tabla 15.3 se mencionan las características para el diseño de los sistemas del tren de tratamiento de lodos, se realizó tomando en cuenta una mezcla de lodo primario y secundario crudo.

En la Tabla 15.10 se presentan los resultados del diseño del sistema de estabilización aerobia de lodos para este segundo tren de tratamiento.

En la Tabla 15.11 se presentan los resultados del diseño del sistema de espesamiento por gravedad en bandas y el acondicionamiento químico de lodos para esta etapa.

En la Tabla 15.12 se presentan los resultados del diseño del filtro prensa de bandas para la deshidratación de lodos.

15.3.2.2. Costos

Los costos del equipamiento y construcción del espesamiento por gravedad con acondicionamiento químico y del filtro prensa de bandas con acondicionamiento químico para la deshidratación se presentan en la Tabla 15.13. En la Tabla 15.14 se presentan los resultados de los costos del segundo tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR que trata un caudal promedio de 20 litros por segundo.

Ilustración 15.2 Esquema de la PTAR y del tren de tratamiento de lodos que incluye estabilización aerobia, espesamiento por gravedad en bandas y filtro prensa en bandas para una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 20 L s-1, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

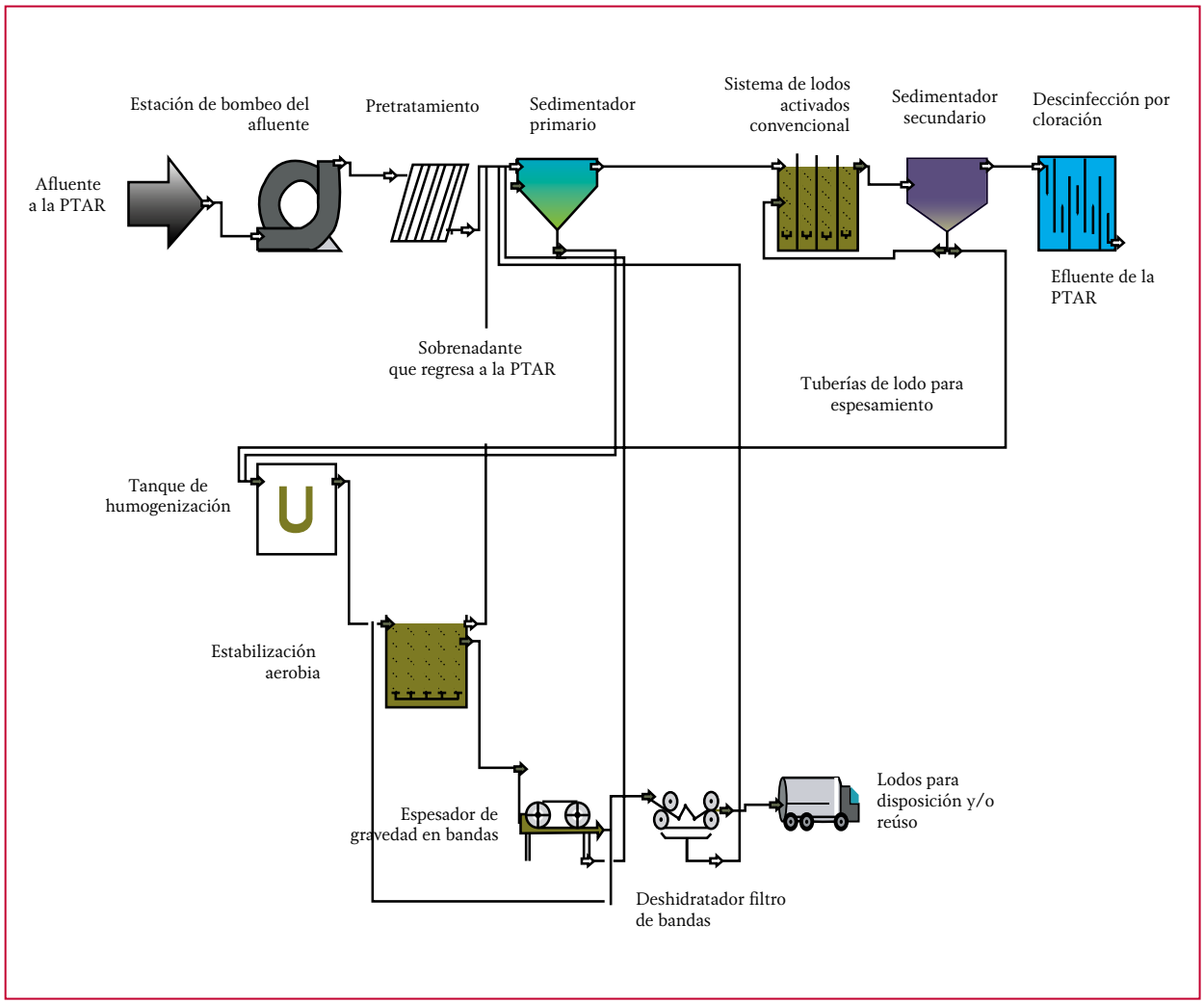


Tabla 15.10 Resultados del diseño del sistema de estabilización aerobia correspondiente al segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 20 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo de retención de sólidos	12.1	d
Diseño SS	12 000	g m^{-3}
SSV calculado	39.6	g m^{-3}
Relación SST:SSV calculada	0.0033	mg SSV/mg SS
Volumen total de los reactores	600	m^3
Longitud el tren	6	m
Ancho del tren	10	m
Profundidad lateral del agua	5	m
Número de baterías	1	
Número de equipos en paralelos por batería	2	
Requerimiento de oxígeno para satisfacer la demanda promedio	7.71	kg d^{-1}
Flujo de aire necesario para satisfacer la demanda promedio	713	N m^3 hr^{-1}
Flujo de aire de diseño	19.8	N m^3 min^{-1} 1 000 m^3
Carga de sólidos volátiles	2.66	kg m^{-1} yr^{-1}
Sólidos acumulados	596	kg d^{-1}
Capacidad del reactor	7,190	kg
Volumen de lodo residual	274	m^3
Mano de obra de operación requerida	687	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	321	Horas hombre por año
Energía eléctrica requerida	108 000	kWh por año
Volumen de excavación requerido	639	m^3
Volumen de losa de hormigón requerido	131	m^3
Volumen de muro de hormigón requerido	121	m^3
La longitud del pasamanos	36.4	m
Número de difusores por tren	18	
Número de cabezales por tren	1	

*Nm^3 por minuto o por hora, son m^3 normales de aire por hora o por minuto.

Tabla 15.11 Resultados del diseño del sistema de espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico correspondiente al segundo tren de tratamiento de lodo de la PTAR que trata un caudal de 20 L s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Ancho de la banda del filtro	1	m
Número de unidades	1	
Carga hidráulica por metro de ancho de banda del filtro	681	m^3 d^{-1}
Carga hidráulica requerida por metro de ancho de banda del filtro	95.4	m^3 d^{-1}
Contenido de sólidos final	7	por ciento
Fracción de sólidos capturados	0.996	
Horas de personal de operación requeridas	41.7	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	10.4	Horas hombre por año
Energía requerida	10 700	KWh por año
Polímero requerido	2.36	kg d^{-1}
Producción de sólidos secos	589	kg d^{-1}

Tabla 15.12 Resultados del diseño del filtro prensa de bandas para la deshidratación del lodo generado por una PTAR que trata un caudal de 20 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Ancho de la banda del filtro	1	m
Número de unidades	1	
Carga hidráulica por unidad por metro de ancho de la banda	382	$m^3 d^{-1}$
Carga hidráulica requerida por metro de ancho de la cinta	17	$m^3 d^{-1}$
Contenido de sólidos final	19	por ciento
Fracción de sólidos de captura	0.998	
Mano de obra de operación requerida	20.8	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	5.2	Horas hombre por año
Energía	7 490	kWh por año
Polímero requerido	3.4	kg d^{-1}
Sólidos secos producidos	340	kg d^{-1}

Tabla 15.13 Costos de construcción y equipamiento del sistema de espesamiento y deshidratación del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico	Deshidratación en filtro prensa de bandas	Unidades
Costo del filtro prensa de bandas	3 000 000	3 000 000	Pesos
Edificio	2 960 000	2 960 000	Pesos
Instalación	750 000	750 000	Pesos
Sistema del polímero	900 000	900 000	Pesos
Bombas de alimentación del polímero	330 000	330 000	Pesos
Sistema de transportación del polímero	840 000	840 000	Pesos

Tabla 15.14 Resultados de la estimación de los costos del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

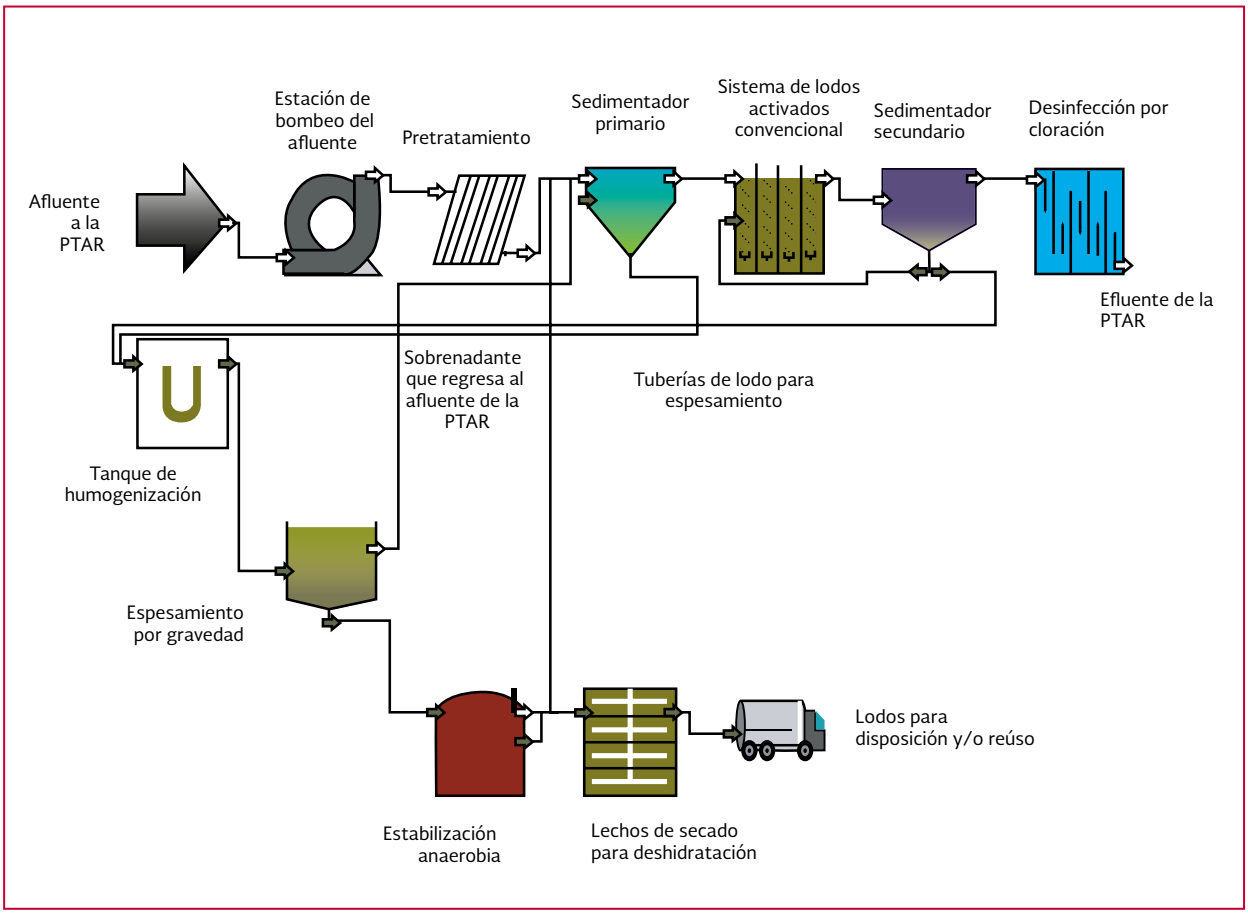
Concepto de los costos	Estabilización aerobia	Espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico	Deshidratación por filtro bandas y acondicionamiento químico	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	2 770 000	8 780 000	8 780 000	Pesos
Costos de personal de operación	40 100	2 440	1 210	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	14 100	459	229	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	339 000	32 000	46 200	Pesos por año
Costos de energía	353 000	34 900	24 500	Pesos por año
Costos de amortización	283 000	895 000	840 000	Pesos por año

El costo total de construcción y equipamiento de la segunda propuesta de tratamiento de lodos, incluyendo los costos del sistema de bombeo y de todo los sistemas del tren de tratamiento, sería de 21 002 000.0 pesos. Con un costo anual de operación de 3 018 874.0 pesos. En el costo de operación se incluye la mano de obra de operación, mantenimiento, energía, materiales, suministros y la amortización. El costo total de construcción y equipamiento y operación anual es de 24 020 874.0 pesos. El costo de construcción y equipamiento de este segundo tren de tratamiento de lodos, es más de 3 veces en comparación con el costo del primer tren de tratamiento. Esto es debido a dos factores principalmente: 1) al sistema de acondicionamiento químico que se incluye en el sistema de espesamiento y deshidratación y 2) los equipos utilizados en este segundo tren de tratamiento son más costosos en comparación con los utilizados en el primer tren de tratamiento.

15.3.3. Tercer tren de tratamiento

El tercer tren de tratamiento consta de un sistema de espesamiento por gravedad, estabilización anaerobia de lodos y deshidratación por medio de lechos de secado. En la Ilustración 15.3 se muestra el diagrama de la PTAR incluyendo el tren de tratamiento de lodos. La diferencia principal entre este tren con respecto al primero y segundo tren de tratamiento es el tipo

Ilustración 15.3 Esquema de la PTAR y del tren de tratamiento de lodos que incluye espesamiento por gravedad, estabilización anaerobia, lechos de secado para la deshidratación de los lodos de una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)



de estabilización y el orden de los equipos de espesamiento.

15.3.3.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

En base a las características y caudales del lodo primario y secundario generado por la PTAR, el resultado del diseño de los sistemas del tren de tratamiento se presenta a continuación. En la Tabla 15.15 están los resultados del diseño del sistema de espesamiento por gravedad, este espesamiento por gravedad no incluye acondicionamiento químico de los lodos.

En la Tabla 15.16 se presenta el diseño obtenido de la estabilización anaerobia de los lodos.

En la Tabla 15.17 se presentan los datos obtenidos sobre el diseño de los lechos de secado.

Tabla 15.15 Resultados del diseño del sistema de espesamiento por gravedad del lodo de la PTAR que trata un caudal de 20 $L{\cdot}s^{-1}$ de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

Descripción	Valor	Unidades
Concentración inicial	1.65	por ciento
Concentración de espesamiento	5	por ciento
Carga másica	48.8	$kg\ m^{-2}\ d^{-1}$
Carga hidráulica	1.05	$m^3\ m^{-2}\ d^{-1}$
Tiempo de retención hidráulico	62.9	h
Número de tanques	1	
Volumen del tanque	80	m^3
Profundidad	2.74	m
Área superficial por tanque	29.2	m^2
Diámetro del tanque	6.1	m
Cantidad de lodos generados	502	$kg\ d^{-1}$
Volumen de lodo espesado	8.62	$m^3\ d^{-1}$
Mano de obra requerida para la operación	100	Horas por año
Trabajo de mantenimiento requerido	101	Horas por año
Energía eléctrica requerida	3 770	kWh por año
Volumen de excavación requerido	134	m^3
Espesor de losa	25.8	cm
Volumen de losa de hormigón requerido	11.4	m^3
Espesor de la pared	29.2	cm
Volumen de muro de hormigón requerido	20.7	m^3

Tabla 15.16 Diseño del equipo de estabilización anaerobia de lodos del tercer tren de tratamiento para el lodo generado por una PTAR que trata un caudal de 20 L s-1 de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

Descripción	Valor	Unidades
Porcentaje de SSV destruidos	50	por ciento
Concentración de sólidos en el reactor	5	por ciento
Tiempo de retención	40	d
Profundidad del reactor	6.37	m
Diámetro del reactor	9.14	m
Volumen efectivo del reactor	443	m^3
Número de reactores por batería	1	
Número de baterías	1	
Gas producido	1.34	$m^3\ d^{-1}$
Calor requerido	95 800	BTU hr^{-1}
Gas en el reactor	151	$m^3\ d^{-1}$
Total de gas natural que se requiere	7.37	$m^3\ d^{-1}$
Mano de obra de operación requerida	684	Horas al año
Trabajo de mantenimiento requerido	416	Horas al año
Energía eléctrica requerida	30 800	kWh por año
Volumen de excavación requerido	441	m^3
Espesor de losa	23.6	cm
Volumen de losa de hormigón requerido	18.7	m^3
Espesor de la pared	45.6	cm
Volumen de muro de hormigón requerido	106	m^3
Profundidad lateral del agua	6.37	m
Superficie/ Piso del edificio de control de 2 pisos	16.5	m^2
Tamaño de la tubería	10.2	cm
Longitud total del sistema de tuberías	58.1	m
Número de codos de 90 grados	13	piezas
Número de tees	26	piezas
Número de válvulas de tapón	19	piezas
Total de sólidos secos tratados	452	kg d^{-1}

Tabla 15.17 Diseño del equipo de lechos de secado para la deshidratación de lodos generados por una PTAR que trata un caudal de 20 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Área superficial total requerida	802	m^2
Profundidad inicial del lodo	30.5	cm
Contenido finalde sólidos	50	por ciento
Tiempo de retención en el lecho de secado	28.5	d
Área superficial total requerida para el lecho de secado	802	m^2
Número de lechos	3	
Área superficial para cada lecho de secado	267	m^2
Longitud de cada lecho de secado	43.9	m
Volumen de excavación requerido	1 200	m^3
Volumen de concreto para la pared divisoria	99.7	m^3
Volumen de R. C. en el lugar para las pistas de camiones	18.3	m^3
Volumen de arena	183	m^3
Volumen de grava	245	m^3
Diámetro de la tubería para arcilla	15.3	cm
Longitud total de la tubería para arcilla	2 200	cm
Producción de sólidos en el lodo	429	kg d^{-1}
Horas de personal de operación requeridas	710	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	319	Horas hombre por año

15.3.3.2. Costos

En la Tabla 15.18 se presenta el desglose de los costos de la tercera propuesta de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal promedio de 20 litros por segundo.

La inversión total de construcción y equipamiento será de 14 920 000.0 pesos, teniendo un costo total anual de 1 833 886.0 pesos de personal de operación, mantenimiento, materiales, suministros energía y amortización. Teniendo un costo total de 16 753 886.0 pesos.

15.3.4. Cuarto tren de tratamiento

Este cuarto tren de tratamiento es similar al tercer tren de tratamiento presentado en el punto

Tabla 15.18 Resultados de la estimación de los costos del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 20 L·s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

Concepto de los costos	Espesamiento por gravedad	Estabilización anaerobia	Lechos de secado	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	978 000	12 000 000	1 270 000	Pesos
Costos de personal de operación	5 850	40 000	41 500	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	4 520	18 600	14 200	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	9 780	80 500	11 500	Pesos por año
Costos de energía	12 300	116 000	0	Pesos por año
Costos de amortización	96 400	1 140 000	130 000	Pesos por año

15.3.3, solo cambia el equipo utilizado para la deshidratación de sólidos, en este cuarto tren de tratamiento se utilizó un filtro prensa de bandas. La Ilustración 15.4 corresponde al esquema de la PTAR incluyendo el tren de tratamiento de lodos.

15.3.4.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

En la Tabla 15.15 y en la Tabla 15.16 respectivamente se presentan los resultados del diseño del equipo de espesamiento por gravedad y estabilización anaerobia. En la Tabla 15.19 se presentan los datos obtenidos del diseño del equipo de deshidratación.

15.3.4.2. Costos

En la Tabla 15.20 se presentan los costos del equipamiento y construcción del filtro prensa de bandas con acondicionamiento químico para la deshidratación.

Ilustración 15.4 Esquema de la PTAR y del tren de tratamiento de lodos que incluye espesamiento por gravedad, estabilización anaerobia y filtros prensa de bandas para la deshidratación de los lodos de una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 20 $L \cdot s^{-1}$, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

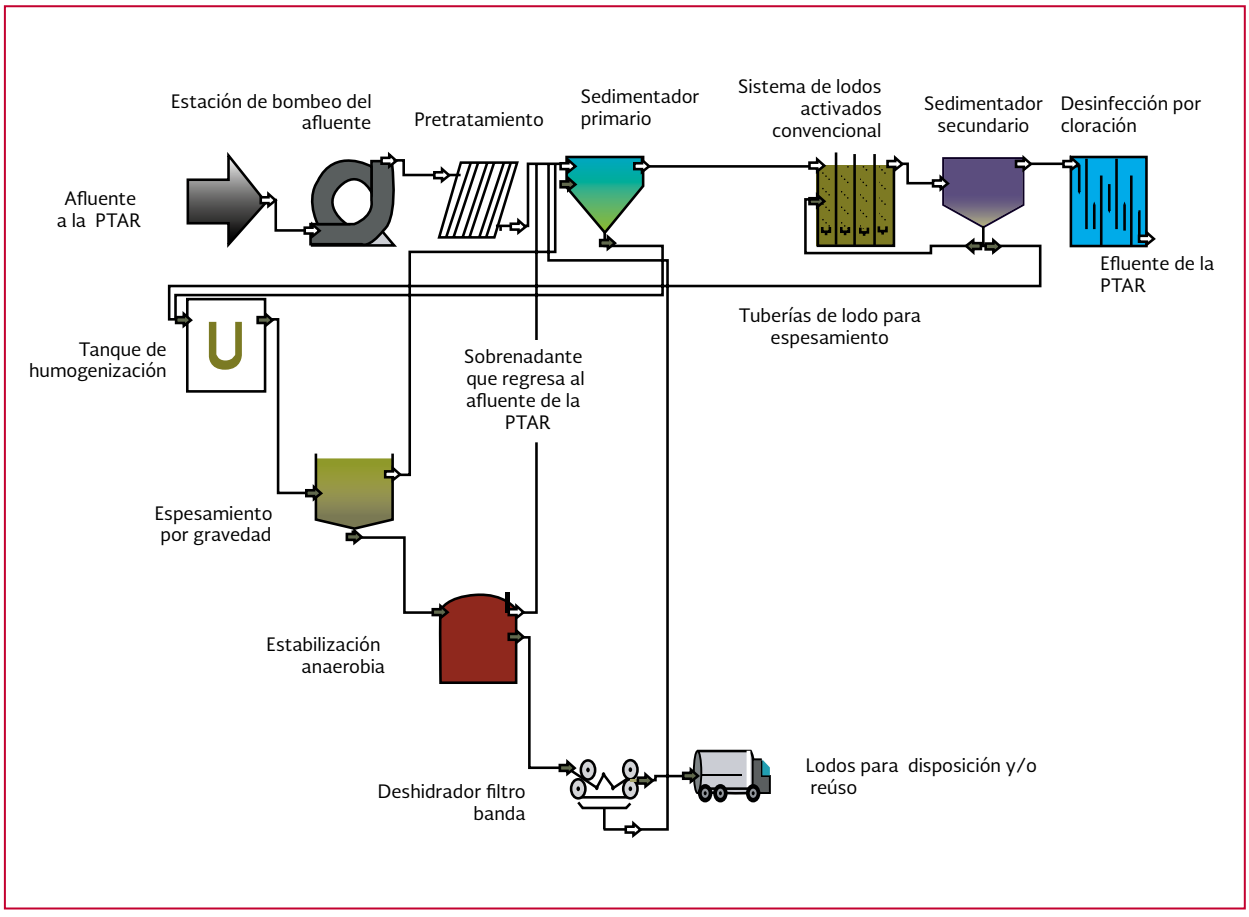


Tabla 15.19 Resultados del diseño del sistema de deshidratación del lodo de la PTAR que trata un caudal de 20 L s^{-1} de agua residual correspondiente al cuarto tren de tratamiento de lodos propuesto, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Ancho de la banda del filtro	1	m
Número de unidades	1	
Carga hidráulica por unidad por metro de ancho de la banda	382	$m^3 d^{-1}$
Carga hidráulica requerida por metro de ancho de la banda	36.1	$m^3 d^{-1}$
Contenido final de sólidos	19	por ciento
Fracción de sólidos de captura	0.998	
Mano de obra de operación requerida	31.6	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	7.9	Horas hombre por año
Energía	11 000	kWh por año
Polímero requerido	5.16	kg d^{-1}
Sólidos secos producidos	516	kg d^{-1}

Tabla 15.20 Costos de construcción y equipamiento del sistema de deshidratación del cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Deshidratación en filtro prensa de bandas	Unidades
Costo del filtro prensa de bandas	3 000 000	Pesos
Edificio	2 960 000	Pesos
Instalación	750 000	Pesos
Sistema del polímero	900 000	Pesos
Bombas de alimentación del polímero	330 000	Pesos
Sistema de transportación del polímero	840 000	Pesos

En la Tabla 15.21, se presenta los costos de construcción, equipamiento, operación y mantenimiento de cada uno de los sistemas que integran el cuarto tren de tratamiento de lodos propuesto para una PTAR que trata un caudal promedio de 20 L s^{-1} de agua residual municipal.

El costo total de la planta incluyendo la construcción, los equipos y todos los gastos de operación durante un año es de 25 014 856.0 pesos. Teniendo tan solo un costo de operación anual de 2 584 856 y un costo de construcción y equipamiento de 22 430 000.0 pesos.

Tabla 15.21 Costos del cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por gravedad	Estabilización anaerobia	Filtro prensa de bandas	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	978 000	12 000 000	8 780 000	Pesos
Costos de personal de operación	5 860	40 000	1 850	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	4 480	18 400	350	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	9 780	80 500	70 100	Pesos por año
Costos de energía	12 300	116 000	36 100	Pesos por año
Costos de amortización	96 400	1 140 000	840 000	Pesos por año

Comparación de los costos de los diferentes trenes de tratamiento propuestos.

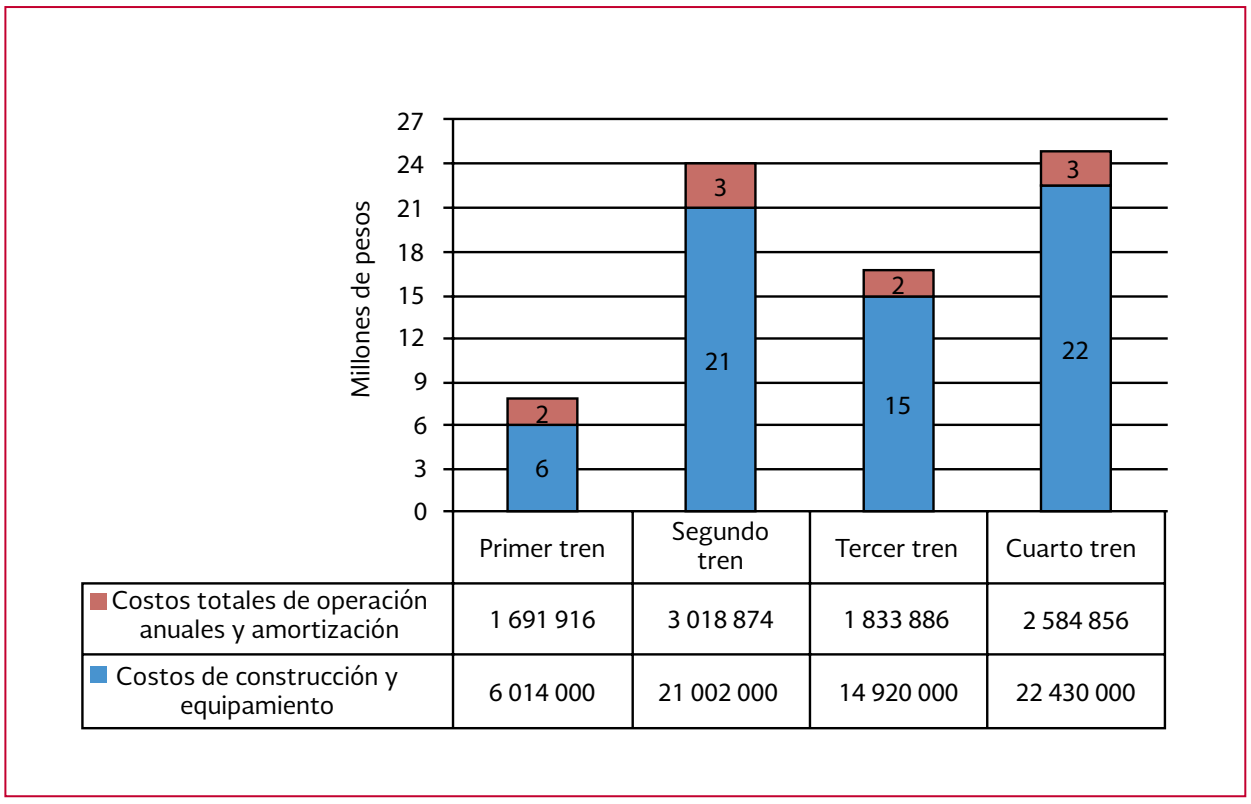
En la Tabla 15.22 se presenta un resumen de los costos de cada tren de tratamiento propuesto para hacer una comparación entre cada uno.

Tabla 15.22 Resumen de los costos de las cuatro diferentes configuraciones propuestas para el tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

Concepto de los costos	Primer tren	Segundo tren	Tercer tren	Cuarto tren
Costo de construcción y equipamiento	6 014 000	21 002 000	14 920 000	22 430 000
Costos totales de operación anuales y amortización	1 691 916	3 018 874	1 833 886.0	2 584 856
Costo total	7 705 916	24 020 874	16 753 886.0	25 014 856

En la Ilustración 15.5 se presenta un gráfico de la estimación de costos para los cuatro diferentes trenes de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal promedio de 20 L s^{-1} de agua residual municipal. Con este gráfico se puede visualizar mejor cuál de los cuatro trenes es el de mayor o menor costo.

Ilustración 15.5 Estimación de costo para trenes de tratamiento con un caudal promedio de 20 L s^{-1} como se muestra en la Tabla 15.2 (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).



Como se puede observar el primer tren que incluye estabilización aerobia, espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico y deshidratación por lechos de secado es el tren de tratamiento de lodos más económico de las cuatro configuraciones propuestas. Incrementándose el costo del tren de tratamiento cuando se utilizan los equipos mecánicos que necesita acondicionamiento químico de lodos.

15.4. Estimación de costos para el tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal promedio de 200 L s^{-1} de agua residual cruda

Se realizaron un total de 6 propuestas diferentes para el tratamiento de lodos generados por una PTAR con un caudal promedio de tratamiento de aguas residuales municipales de 200 L s^{-1}. Los seis diferentes trenes de tratamiento son:

Los costos obtenidos, así como el diseño de los diferentes trenes de tratamiento se presentan a continuación.

15.4.1. Primer tren de tratamiento

El esquema de este primer tren de tratamiento de lodos generados por una PTAR que trata con un caudal promedio de 200 L s^{-1}, lo cual equivale a 17 300 m^3 d^{-1} con un caudal máximo de 25 900 m^3 d^{-1} y un caudal mínimo de 8 640 m^3 d^{-1} es idéntico al esquema de la (Ilustración 15.1). El tren consiste en estabilización aerobia, espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico y con recirculación de lodos hacia el reactor correspondiente a la estabilización aerobia de lodos y deshidratación por lechos de secado.

En la Tabla 15.24 se mencionan las características para la simulación para la estimación de los costos y del diseño de los 6 trenes de tratamiento propuestos, se realizó considerando una mezcla de lodo primario y secundario.

Tabla 15.23 Trenes de tratamiento para un caudal de 200 L s^{-1}

Tren	Unidades de tratamiento
1	Estabilización aerobia, espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico y con recirculación de lodos hacia el reactor correspondiente a la estabilización aerobia de lodos y deshidratación por lechos de secado.
2	Estabilización aerobia, espesamiento por flotación con aire disuelto con acondicionamiento químico y con recirculación de lodos hacia el reactor correspondiente a la estabilización aerobia de lodos y deshidratación por centrífuga.
3	Espesamiento por gravedad en bandas con acondicionamiento químico de lodos y sin recirculación, estabilización aerobia y deshidratación por filtros prensa de bandas.
4	Espesamiento por gravedad en bandas con acondicionamiento químico de lodos sin recirculación de lodos, estabilización anaerobia, deshidratación por filtros prensa de bandas.
5	Espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico, estabilización anaerobia y deshidratación por medio de lechos de secado, el esquema de este tren de tratamiento es el mismo que se muestra en la Ilustración 15.3.
6	Espesamiento por flotación con aire disuelto con acondicionamiento químico, estabilización anaerobia y deshidratación por medio de centrífugas.

Tabla 15.24 Características del lodo primario y secundario generado en la PTAR con un caudal promedio de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetros	Unidades	Lodo primario	Lodo secundario
Flujo promedio	$m^3 d^{-1}$	74.6	260
Sólidos suspendidos	g m^{-3}	40 000	10 000
Sólidos volátiles	por ciento	74.5	71.1
DBO	g m^{-3}	18 300	1 800
DBO soluble	g m^{-3}	79.2	1.88
DQO	g m^{-3}	55 500	10 700
DQO soluble	g m^{-3}	297	2.82
NTK	gN m^{-3}	540	712
NTK soluble	gN m^{-3}	27.7	0.93
N amoniacal	gN m^{-3}	24.8	0.93
Nitritos	gN m^{-3}	0	0
Nitratos	gN m^{-3}	0.33	32.5
PT	gP m^{-3}	105	6.38
pH		7.6	7.6
Cationes	g m^{-3}	160	160
Aniones	g m^{-3}	160	160
Sólidos sedimentables	mL L^{-1}	0	0
Grasas y aceites	g m^{-3}	99	0
Temperatura en verano	°C	23	23
Temperatura en invierno	°C	10	10

15.4.1.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

Al realizar la simulación de los diferentes trenes de tratamiento, el software CAPDETWorks también genera la información sobre el diseño y costeo del sistema de bombeo de los lodos. La Tabla 15.25 corresponde a los datos de diseño obtenidos para este sistema de bombeo.

Tabla 15.25 Datos del diseño del sistema de bombeo del lodo primario y secundario al tren de tratamiento del lodo de la PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Resultados para el sistema de bombeo		Unidades
	Lodo primario	Lodo secundario	
Caudal de bombeo promedio diario	75.2	261	$m^3 d^{-1}$
Capacidad total de bombeo	75.2	261	$m^3 d^{-1}$
Capacidad de diseño por bomba	37.6	131	$m^3 d^{-1}$
Número de bombas	3	3	
Número de baterías	1	1	
Capacidad de bombeo firme	75.2	261	$m^3 d^{-1}$
Horas de personal de operación requeridas	266	312	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	202	242	Horas hombre por año
Energía requerida	672	2 330	KWh por año
Volumen de excavación requerido	45.4	45.6	m^3
Área de construcción para las bombas	18.6	18.7	m^2

En la siguiente Tabla 15.26 se presentan los resultados del diseño del equipo de estabilización aerobia de lodos. En la Tabla 15.27 se encuentran los resultados correspondientes al diseño del espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico y con recirculación hacia el tanque de estabilización aerobia.

Tabla 15.26 Resultados del diseño del sistema de estabilización aerobia de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo de retención de sólidos	12.9	d
SS de diseño	12 000	g m^{-3}
SSV calculado	33.6	g m^{-3}
Relación SST:SSV calculada	0.0028	mg SSV/mg SS
Volumen total de los reactores	7 010	m^3
Longitud del tren	71	m
Ancho del tren	10	m
Profundidad lateral del agua	5	m
Número de baterías	1	
Número de equipos en paralelos por batería	2	
Requerimiento de oxígeno para satisfacer la demanda promedio	71.3	kg d^{-1}
El flujo de aire necesario para satisfacer la demanda promedio	8 330	N m^3 hr^{-1}
Flujo de aire de diseño	19.8	N m^3 min^{-1} 1 000 m^3
Carga de sólidos volátiles	2.11	kg m^{-1} yr^{-1}
Sólidos acumulados	6 500	kg d^{-1}
Capacidad del reactor	84 100	kg
Volumen de lodo residual	3 200	m^3
Mano de obra de operación requerida	1 930	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	1 030	Horas hombre por año
Energía eléctrica requerida	1 280 000	kWh por año
Volumen de excavación requerido	3 970	m^3
Volumen de losa de hormigón requerido	893	m^3
Volumen de muro de hormigón requerido	576	m^3
La longitud del pasamanos	166	m
Número de difusores por tren	207	
Número de cabezales por tren	10	

*Nm^3 por minuto o por hora, son m^3 normales de aire por hora o por minuto.

Tabla 15.27 Diseño del sistema de espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Concentración inicial	2.5	por ciento
Concentración de espesamiento	5	por ciento
Carga másica	48.8	kg m^{-2} d^{-1}
Carga hidráulica	1.95	m^3 m^{-2} d^{-1}
Tiempo de retención hidráulico	33.7	h
Número de tanques	2	
Volumen del tanque	348	m^3
Profundidad	2.74	m
Área Superficial por tanque	63.4	m^2
Diámetro del tanque	9.14	m
Cantidad de lodos generados	6 190	kg d^{-1}
Volumen de lodo espesado	106	m^3 d^{-1}
Mano de obra requerida para la operación	485	Horas por año
Trabajo de mantenimiento requerido	362	Horas por año
Energía eléctrica requerida	8 020	kWh por año
Volumen de excavación requerido	521	m^3
Espesor de losa	25.8	cm
Volumen de losa de hormigón requerido	45.7	m^3
Espesor de la pared	29.2	cm
Volumen de muro de hormigón requerido	59.9	m^3

En la Tabla 15.28 se muestran los resultados del diseño de la última etapa del tren de tratamiento de lodos es la deshidratación por medio de lechos de secado.

Tabla 15.28 Resultados del diseño del sistema de lechos de secado para la deshidratación de lodo de la PTAR con un caudal de 200 L s-1, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

Parámetro	Valor	Unidades
Área superficial total requerida	4 960	m^2
Profundidad inicial del lodo	30.5	cm
Contenido final de sólidos	50	por ciento
Tiempo de retención en el lecho de secado	28.5	d
Área superficial total requerida para el lecho de secado	4 960	m2
Número de lechos	18	
Área superficial para cada lecho de secado	276	m^2
Longitud de cada lecho de secado	45.2	m
Volumen de excavación requerido	7 440	m^3
Volumen de concreto para la pared divisoria	507	m^3
Volumen de R. C. en el lugar para las pistas de camiones	113	m^3
Volumen de arena	1 130	m^3
Volumen de grava	1 510	m^3
Diámetro de la tubería para arcilla	15.3	cm
Longitud total de la tubería para arcilla	13 600	cm
Producción de sólidos en el lodo	2 650	kg d^{-1}
Horas de personal de operación requeridas	3 120	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	1 560	Horas hombre por año

15.4.1.2. Costos

En la Tabla 15.29 y Tabla 15.30 se presenta la estimación de costos de los diferentes equipos del primer tren de tratamiento de lodos y del sistema de bombeo para una PTAR que trata un caudal promedio de 200 L s^{-1} de agua residual municipal.

Los resultados del diseño y costeo del sistema de bombeo para transportar el lodo primario y secundario hacia el primer sistema del tren de tratamiento de lodos presentados en la Tabla 15.29, son los mismos para los 6 diferentes trenes de tratamiento de lodos que se proponen para una PTAR que trata un caudal promedio de 200 L s^{-1} de agua residual.

En la Tabla 15.30 se presentan los resultados de los costos del primer tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR que trata un caudal promedio de 200 litros por segundo.

El costo total de construcción y equipamiento del tren de tratamiento, incluyendo los costos del sistema de bombeo y de todo los sistemas del tren de tratamiento, sería de 28 912 000.0 pesos. Con un costo anual de operación de 8 928 040.0 pesos, en este costo de operación se incluye la mano de obra de operación, mantenimiento, energía, materiales, suministros y la amortización de todos los equipos y del sistema de bombeo. Teniendo un costo total de 37 840 040.0 pesos.

15.4.2. Segundo tren de tratamiento

El segundo tren de tratamiento propuesto difiere en el primero en el equipo de espesamiento y deshidratación. Para esta segunda propuesta el espesamiento será por flotación con aire disuelto y acondicionamiento químico y la deshidratación por medio de centrífuga. En la Ilustración 15.6

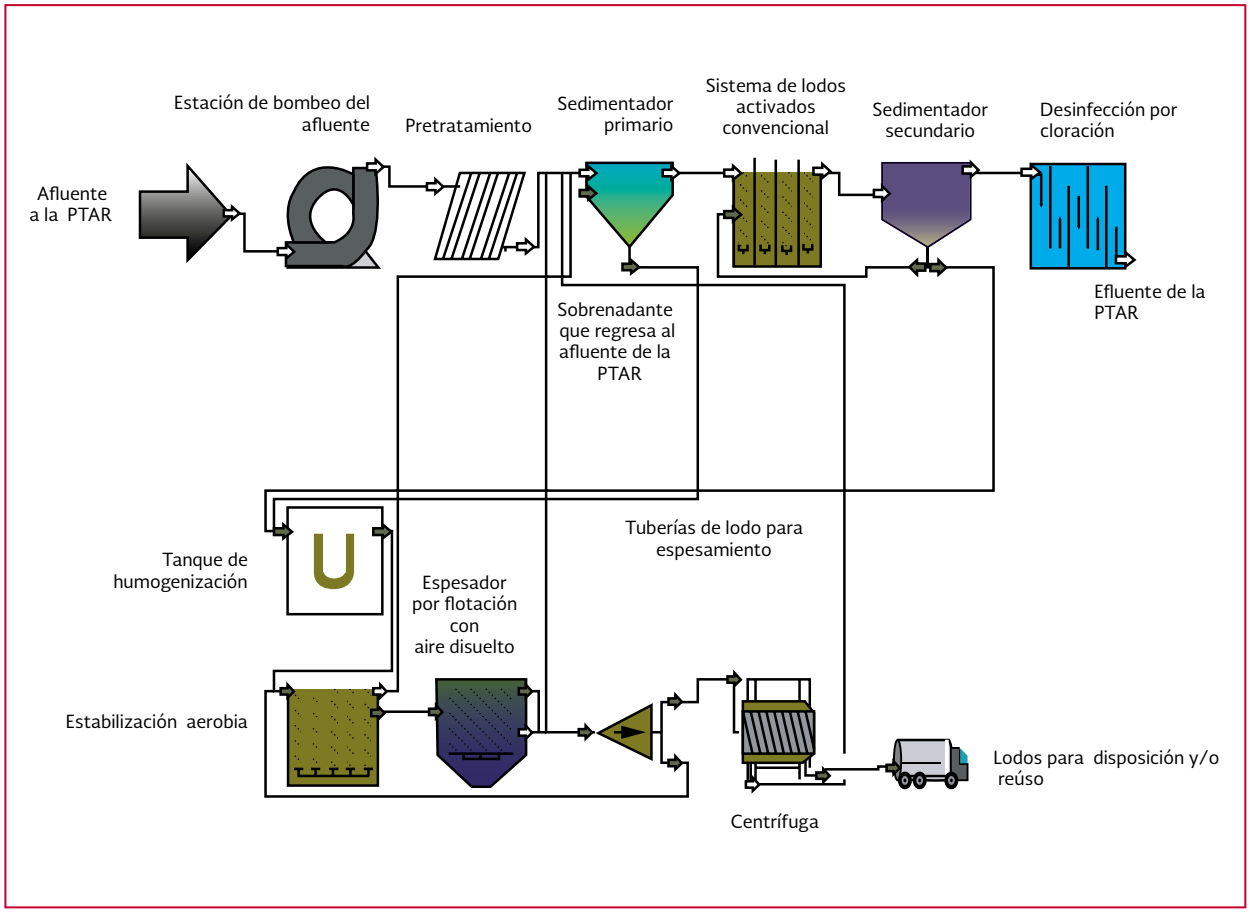
Tabla 15.29 Costos del sistema de bombeo del lodo primario y secundario al sistema de espesamiento para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Valor de los costos del sistema de bombeo		Unidades
	Lodo primario	Lodo secundario	
Costo de construcción y equipamiento	394 000	478 000	Pesos
Costos de personal de operación	15 500	18 200	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	9 750	11 700	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	2 750	3 340	Pesos por año
Costos de energía	2 200	7 600	Pesos por año
Costos de amortización	40 100	48 700	Pesos por año

Tabla 15.30 Resultados de la estimación de los costos del primer tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

Concepto de los costos	Estabilización aerobia	Espesamiento por gravedad	Lechos de secado	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	18 000 000	2 890 000	7 150 000	Pesos
Costos de personal de operación	113 000	28 400	182 000	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	49 800	17 500	75 000	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	1 160 000	28 900	64 400	Pesos por año
Costos de energía	4 180 000	26 200	0	Pesos por año
Costos de amortización	1 830 000	284 000	729 000	Pesos por año

Ilustración 15.6 Esquema de la PTAR y del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)



se presenta el esquema de la PTAR incluyendo el segundo tren de tratamiento de lodos propuesto.

15.4.2.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

Los valores de diseño obtenidos de la simulación para el proceso de estabilización aerobia de lodos para este segundo tren de tratamiento es el mismo que se obtuvo para el primer tren de tratamiento que se presenta en la Tabla 15.26, por lo que ya no se presenta en esta sección. En la Tabla 15.31 se presenta el diseño del sistema de acondicionamiento de lodos y en la Tabla 15.32 el diseño del equipo de espesamiento por flotación con aire disuelto.

Tabla 15.31 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo del segundo tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Dosis de polímero	3.51	kg d^{-1}
Solución química liquida alimentada	1.41	m^3 d^{-1}
Requerimientos de mano de obra de operación y mantenimiento	880	Horas hombre por año
Requerimientos de mano de obra para el manejo de polímero seco y mezclado	493	Horas hombre por año

Tabla 15.32 Diseño del sistema de espesamiento por flotación con aire disuelto del segundo tren de tratamiento de lodo propuesto para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Relación aire sólidos	0.02	
Presión de aire	414	KPa
Carga de sólidos	48.8	kg m^{-2} d^{-1}
Flujo de recirculación	3 960	m^3 d^{-1}
Requerimientos de área superficial	144	m^2
Volumen del tanque a presión	5.5	m^3
Volumen del tanque de flotación	530	m^3
Tiempo de retención del tanque a presión	2	minutos
Tiempo de retención del tanque de flotación	3	Horas
Requerimientos de polímero	3.51	kg d^{-1}
Número de unidades	2	
Área superficial por unidad de flotación	89.2	m^2
Diámetro de la unidad de flotación	10.7	m
Cantidad de lodo generado	7 870	kg d^{-1}
Área de construcción del tanque	274	m^2
Volumen de excavación requerido	684	m^3
Espesor de la losa	25.4	cm
Volumen de la losa de concreto requerido	59.1	m^3
Espesor de las paredes	28.5	cm
Volumen de las paredes de concreto requerido	60.6	m^3
Profundidad del agua	2.56	m
Horas de personal de operación requeridas	1 410	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	462	Horas hombre por año
Energía requerida	434 000	KWh por año

La última etapa del tren es la deshidratación por medio de la centrífuga, la cual incluye el acondicionamiento químico de los lodos. Por lo que, en la Tabla 15.33 se presenta el diseño del sistema de acondicionamiento químico para la centrífuga y finalmente los datos del diseño de la centrífuga están en la Tabla 15.34.

Tabla 15.33 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo para deshidratación del segundo tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Dosis de polímero	39.4	kg d^{-1}
Solución química liquida alimentada	15.8	m^3 d^{-1}
Requerimientos de mano de obra de operación y mantenimiento	3 060	Horas hombre por año
Requerimientos de mano de obra para el manejo de polímero seco y mezclado	976	Horas hombre por año

Tabla 15.34 Diseño de la centrífuga del segundo tren de tratamiento propuesto para la deshidratación del lodo generado por una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Energía total requerida	48.1	kW
Requerimiento de energía por unidad	24	kW
Factor de seguridad	1.25	
Número de unidades	2	
Dosis química	1	por ciento en peso seco
Productos químicos requeridos	118	kg d^{-1}
Flujo de lodos	281	m^3 d^{-1}
Concentración inicial de sólidos	4	por ciento
Horas de funcionamiento por día	8	h
Días de funcionamiento por semana	5	d
Número de centrífugas	2	
Energía por unidad	24	kW
Área de construcción	31.4	m^2
Sólidos secos producidos	2 680	kg d^{-1}
Mano de obra de operación requerida	2 610	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	445	Horas hombre por año
Energía eléctrica requerida	89 800	kWh por año

15.4.2.2. Costos

En la tabla Tabla 15.35 se presentan los costos del sistema de acondicionamiento químico de lodos para el espesamiento y la deshidratación de los lodos.

En la Tabla 15.36 se presentan los resultados de los costos del segundo tren de tratamiento pro-

Tabla 15.35 Costos del acondicionamiento químico de lodos del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por flotación con aire disuelto	Centrífuga	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	157 000	699 000	Pesos
Costos de personal de operación	80 200	236 000	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	3 130	14 000	Pesos por año
Costos de energía	47 700	381 000	Pesos por año

Tabla 15.36 Resultados de la estimación de los costos del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Estabilización aerobia	Espesamiento por flotación con aire disuelto	Centrífuga	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	18 000 000	15 500 000	11 900 000	Pesos
Costos de personal de operación	113 000	82 200	152 000	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	49 800	22 000	21 300	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	1 160 000	155 000	330 000	Pesos por año
Costos de energía	4 180 000	1 420 000	294 000	Pesos por año
Costos de amortización	1 830 000		1 240 000	Pesos por año

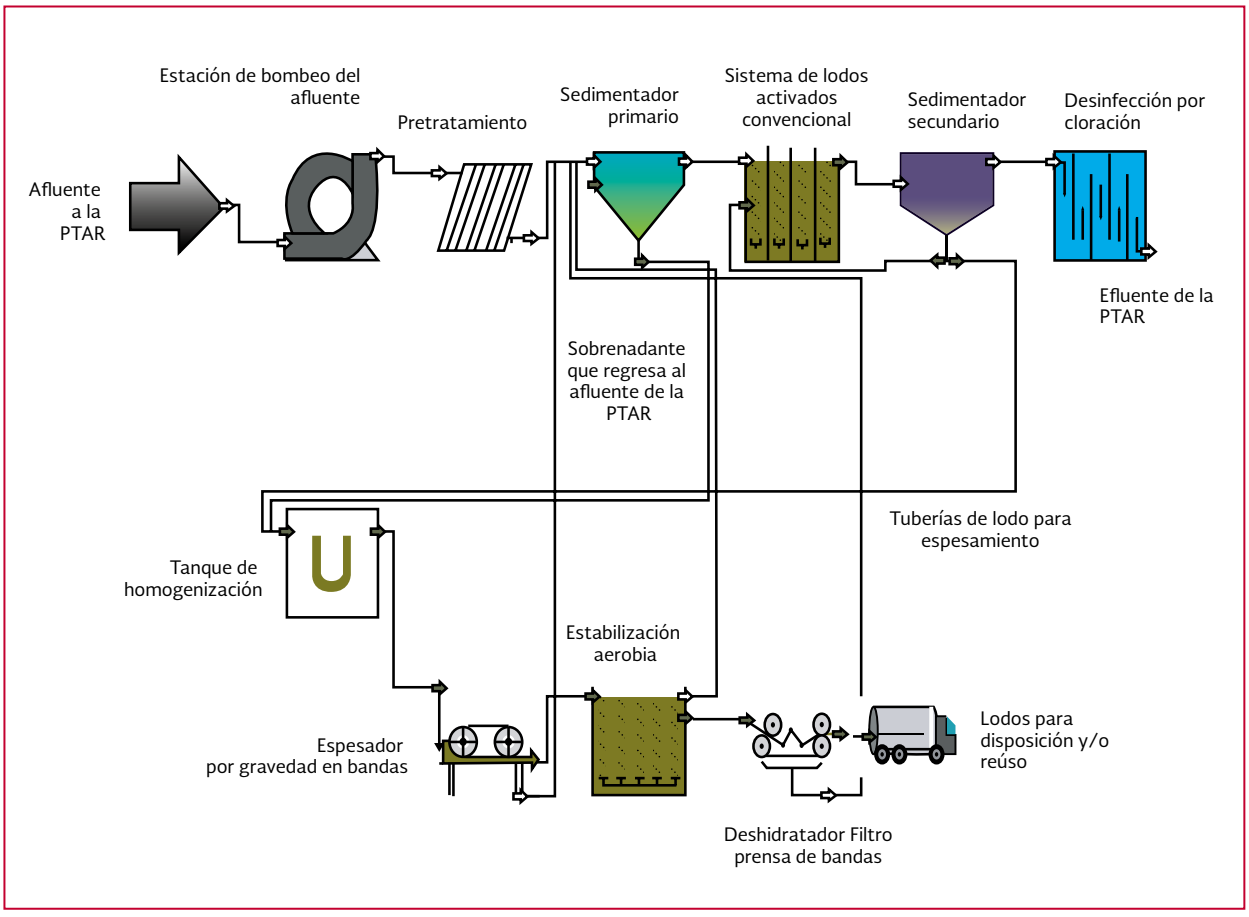
puesto para el lodo generado por una PTAR que trata un caudal promedio de 200 litros por segundo.

El costo total de construcción y equipamiento del tren de tratamiento, incluyendo los costos del sistema de bombeo, el acondicionamiento químico y todos los sistemas del tren de tratamiento, sería de 47 128 000.0 pesos. Con un costo anual de operación de 12 222 620 pesos, en este costo de operación se incluye la mano de obra de operación, mantenimiento, energía, materiales, suministros y la amortización de todos los equipos y del sistema de bombeo. Teniendo un costo total de 59 350 620.0 pesos.

15.4.3. Tercer tren de tratamiento

El tercer tren de tratamiento consta de un sistema de espesamiento por gravedad en bandas con acondicionamiento químico sin recirculación de lodos, seguido por la estabilización aerobia de lodos y finalmente la deshidratación por medio del filtro prensa de bandas con acondicionamiento químico de lodos. En Ilustración 15.7 se presenta el diagrama de flujo del sistema de tratamiento de aguas junto con la tercera propuesta del tratamiento de lodos para una PTAR de capacidad mediana (caudal promedio de 200 L s^{-1} de a gua residual cruda).

Ilustración 15.7 Esquema de la PTAR y del tercer tren de tratamiento de lodos que incluye espesamiento por gravedad en bandas con acondicionamiento químico, estabilización aerobia y filtros banda para la deshidratación de los lodos de una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).



15.4.3.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

En base a las características y caudales del lodo primario y secundario generado por la PTAR, los resultados del diseño de los diferentes equipos se presentan a continuación. En la Tabla 15.37 se presenta el diseño del equipo de gravedad en bandas con acondicionamiento químico de lodos. En la Tabla 15.38 se presentan los resultados del diseño del equipo de estabilización aerobia de lodos.

Tabla 15.37 Diseño del sistema de espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico del tercer tren de tratamiento para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Ancho de la banda del filtro	2	m
Número de unidades	1	
Carga hidráulica por metro de ancho de banda del filtro	681	$m^3 d^{-1}$
Carga hidráulica requerida por metro de ancho de banda del filtro	1 090	$m^3 d^{-1}$
Contenido final de sólidos	7	por ciento
Fracción de sólidos capturados	0.993	
Horas de personal de operación requeridas	307	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	76.7	Horas hombre por año
Energía requerida	67 700	KWh por año
Polímero requerido	17.3	kg d^{-1}
Producción de sólidos secos	4 330	kg d^{-1}

Tabla 15.38 Resultados del diseño del sistema de estabilización aerobia de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo de retención de sólidos	3.93	d
SS de diseño	12 000	g m^{-3}
SSV calculado	55.9	g m^{-3}
Relación SST:SSV calculada	0.00466	mg SSV/mg SS
Volumen total de los reactores	1,070	m^3
Longitud del tren	11	m
Ancho del tren	10	m
Profundidad lateral del agua	5	m
Número de baterías	1	
Número de equipos en paralelo por batería	2	
Requerimiento de oxígeno para satisfacer la demanda promedio	59.6	kg d^{-1}
Flujo de aire necesario para satisfacer la demanda promedio	1 270	N m^3 hr^{-1}
Flujo de aire de diseño	19.8	N m^3 min^{-1} 1000 m^3
Carga de sólidos volátiles	11.5	kg m^{-1} yr^{-1}
Sólidos acumulados	3,260	kg d^{-1}
Capacidad del reactor	12 800	kg
Volumen de lodo residual	489	m^3
Mano de obra de operación requerida	873	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	419	Horas hombre por año
Energía eléctrica requerida	198 000	kWh por año
Volumen de excavación requerido	895	m^3

Tabla 15.38 Resultados del diseño del sistema de estabilización aerobia de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s-1 de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) (continuación)

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen de losa de hormigón requerido	190	m^3
Volumen de muro de hormigón requerido	156	m^3
Longitud del pasamanos	46.4	m
Número de difusores por tren	33	
Número de cabezales por tren	2	

*Nm^3 por minuto o por hora, son m^3 normales de aire por hora o por minuto.

En la Tabla 15.39 se muestran los datos obtenidos sobre el diseño del filtro banda y acondicionamiento químico para la deshidratación de lodos.

15.4.3.2. Costos

En la Tabla 15.40 se presentan los resultados de los costos del equipamiento y construcción del espesamiento por gravedad con acondicionamiento químico y del filtro prensa de bandas con acondicionamiento químico para la deshidratación.

En la Tabla 15.41 se presentan los resultados de los costos del tercer tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR que trata un caudal promedio de 200 litros por segundo.

El costo total de construcción y equipamiento de este tercer tren de tratamiento tiene un costo de 24 882 000.0 pesos. El costo de operación anual

Tabla 15.39 Diseño del filtro banda con acondicionamiento de lodos del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Ancho de la banda del filtro	2	m
Número de unidades	1	
Carga hidráulica por unidad por metro de ancho de la banda	382	$m^3\ d^{-1}$
Carga hidráulica requerida por metro de ancho de la cinta	522	$m^3\ d^{-1}$
Contenido final de sólidos	19	por ciento
Fracción de sólidos de captura	0.996	
Mano de obra de operación requerida	228	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	57.1	Horas hombre por año
Energía	68 700	kWh por año
Polímero requerido	37.2	$kg\ d^{-1}$
Sólidos secos producidos	3 720	$kg\ d^{-1}$

Tabla 15.40 Costos de construcción y equipamiento del sistema de espesamiento y deshidratación del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico	Deshidratación en filtro prensa de bandas	Unidades
Costo del filtro bandas	3 310 000	3 310 000	Pesos
Construcción	3 420 000	3 420 000	Pesos
Instalación	828 000	828 000	Pesos
Sistema del polímero	1 230 000	1 230 000	Pesos
Bombas de alimentación del polímero	364 000	364 000	Pesos
Sistema de transportación del polímero	828 000	828 000	Pesos

es de 5 063 330.0 pesos el cual incluye costos de mano de obra de operación, mantenimiento, materiales, suministros, energía, y amortización. Teniendo un costo total de 29 945 330.0 por un año de construcción, equipamiento y operación.

15.4.4. Cuarto tren de tratamiento

La cuarta configuración del tratamiento de lodos solo difiere en el sistema de estabilización de lodos con respecto a la tercera configuración. Ahora se utilizó la estabilización anaerobia de lodos, conservando los mismos equipos de espesamiento y deshidratación que se proponer en el tercer tren de tratamiento. En la Ilustración 15.8 se presenta el esquema del tren de tratamiento propuesto.

15.4.4.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

El diseño del espesador por gravedad en bandas y acondicionamiento químico es el mismo que se presenta en Tabla 15.37, ya que el espesador en ambos trenes de tratamiento es el primer proceso de tratamiento de lodos. Sin embargo, como ahora la estabilización es anaerobia las características del lodo a la salida de este proceso cambian y por consecuencia también cambia el diseño y costos del equipo de deshidratación. En la Tabla 15.42 y en la Tabla 15.43 se presentan los datos del diseño del proceso de estabilización anaerobia y deshidratación de lodos respectivamente.

15.4.4.2. Costos

En la Tabla 15.44 se presentan los resultados de los costos del equipamiento y construcción del espesamiento por gravedad con acondicionamiento químico y del filtro prensa de bandas con acondicionamiento químico para la deshidratación.

En la Tabla 15.45 se presentan los costos de los sistemas que integran el cuarto tren de tratamiento de lodos.

El costo de operación anual del tren de tratamiento es de 7 766 530.0 pesos, en el cual incluye mano de obra de operación, mantenimiento de los equipos, materiales, suministros, energía y amortización. El costo de construcción y equipamiento es de 56 432 000.0 pesos. Haciendo un total de 64 198 530.0 pesos.

Tabla 15.41 Resultados de la estimación de los costos del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 200 L·s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Estabilización aerobia	Espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico	Deshidratación por filtro bandas y acondicionamiento químico	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	4 050 000	9 980 000	9 980 000	Pesos
Costos de personal de operación	51 000	17 900	13 300	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	19 600	3 580	2 660	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	426 000	235 000	506 000	Pesos por año
Costos de energía	648 000	221 000	225 000	Pesos por año
Costos de amortización	379 000	952 000	952 000	Pesos por año

Ilustración 15.8 Esquema de la PTAR y del cuarto tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

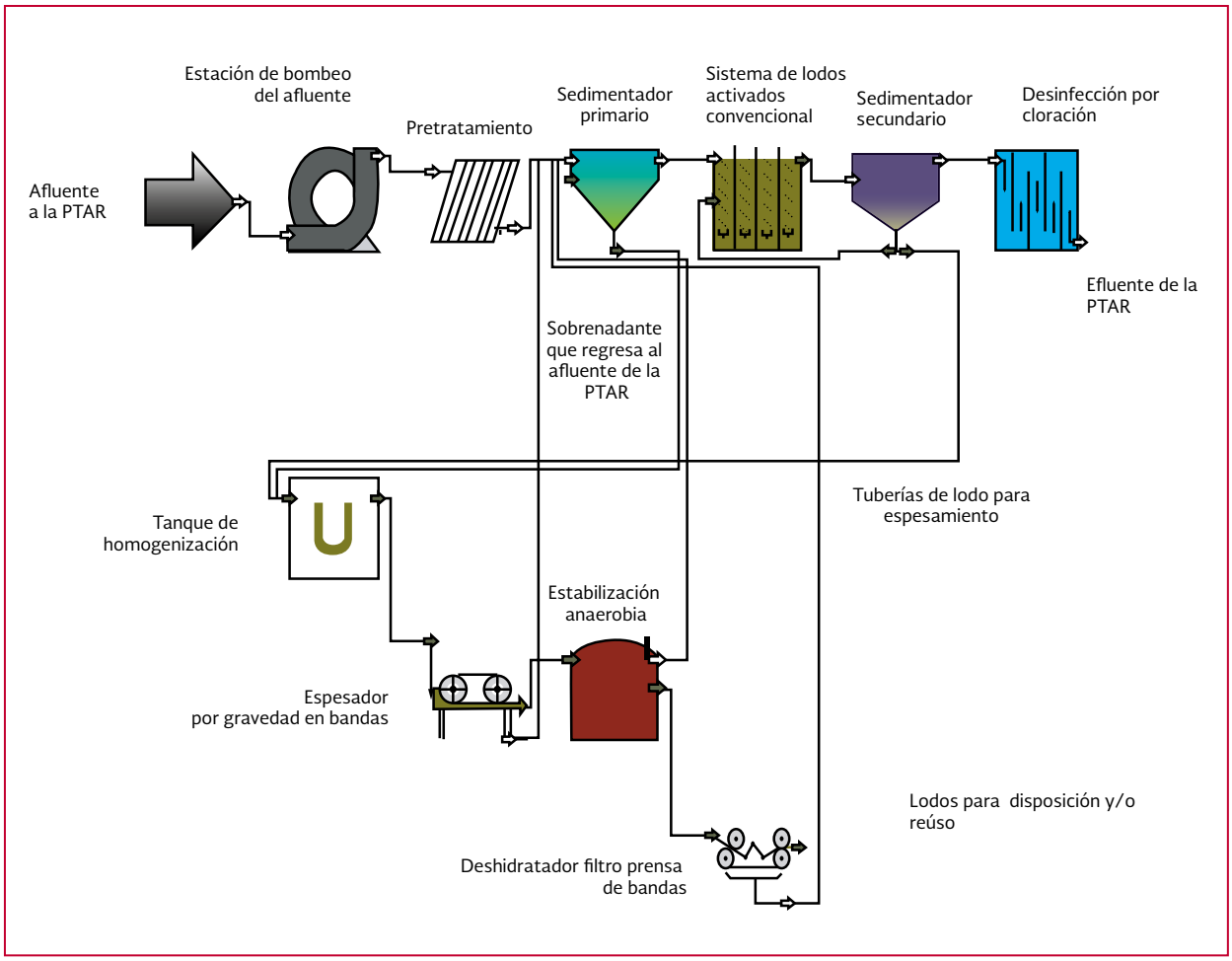


Tabla 15.42 Diseño del sistema de estabilización anaerobia del cuarto tren propuesto para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Porcentaje de SSV destruidos	50	por ciento
Concentración de sólidos en el reactor	5	por ciento
Tiempo de retención	15	d
Profundidad del reactor	7.18	m
Diámetro del reactor	13.7	m
Volumen efectivo del reactor	2 290	m^3
Número de reactores por batería	2	
Número de reactores primarios por batería	1	
Número de reactores secundarios por batería	1	
Número de baterías	1	
Gas producido	15.6	$m^3\ d^{-1}$
Calor requerido	370 000	BTU hr^{-1}
Gas en el reactor	583	$m^3\ d^{-1}$
Total de gas natural que se requiere	28	$m^3\ d^{-1}$
Mano de obra de operación requerida	1 450	Horas al año
Trabajo de mantenimiento requerido	939	Horas al año
Energía eléctrica requerida	119 000	kWh por año
Volumen de excavación requerido	2 280	m^3
Espesor de losa	25.3	cm
Volumen de losa de hormigón requerido	84.9	m^3
Espesor de la pared	49	cm
Volumen de muro de hormigón requerido	379	m^3
Profundidad lateral del agua	7.18	m
Superficie/piso del edificio de control de 2 pisos	55.3	m^2
Tamaño de la tubería	15.3	cm
Longitud total del sistema de tuberías	148	m
Número de codos de 90 grados	26	piezas
Número de tees	51	piezas
Número de válvulas de tapón	37	piezas
Total de sólidos secos tratados	4 380	kg d^{-1}

Tabla 15.43 Diseño del sistema de deshidratación del lodo de la cuarta configuración del tratamiento de lodos generados por una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Ancho de la banda del filtro	1	m
Número de unidades	1	
Carga hidráulica por unidad por metro de ancho de la banda	382	$m^3 d^{-1}$
Carga hidráulica requerida por metro de ancho de la cinta	349	$m^3 d^{-1}$
Contenido final de sólidos	19	por ciento
Fracción de sólidos de captura	0.998	
Mano de obra de operación requerida	305	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	76.4	Horas hombre por año
Energía	89 900	kWh por año
Polímero requerido	49.9	kg d^{-1}
Sólidos secos producidos	4990	kg d^{-1}

Tabla 15.44 Costos de construcción y equipamiento del sistema de espesamiento y deshidratación del cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico	Deshidratación en filtro prensa de bandas	Unidades
Costo del filtro bandas	3 310 000	3 000 000	Pesos
Construcción	3 420 000	2 960 000	Pesos
Instalación	828 000	750 000	Pesos
Sistema del polímero	1 230 000	900 000	Pesos
Bombas de alimentación del polímero	364 000	330 000	Pesos
Sistema de transportación del polímero	828 000	840 000	Pesos

Tabla 15.45 Resultados de la estimación de los costos del cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 200 L s-1, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Estabilización anaerobia	Espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico	Deshidratación por filtro bandas y acondicionamiento químico	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	35 600 000	9 980 000	9 980 000	Pesos
Costos de personal de operación	84 600	17 900	13 300	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	44 200	3 580	2 660	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	259 000	235 000	506 000	Pesos por año
Costos de energía	449 000	221 000	225 000	Pesos por año
Costos de amortización	3 390 000	952 000	952 000	Pesos por año

15.4.5. Quinto tren de tratamiento

En este quinto tren de tratamiento se conserva el proceso de estabilización anaerobia de lodos pero se cambian los equipos de espesamiento y deshidratación con el objetivo de hacer una comparación de costos entre estos tres diferentes trenes de tratamiento de lodos. Espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico, estabilización anaerobia y deshidratación por medio de lechos de secado. En la Ilustración 15.3. se presenta el esquema de este quinto tren de tratamiento.

15.4.5.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

En la Tabla 15.46 se muestran los datos obtenidos sobre el diseño del equipo de espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico de lodos.

En Tabla 15.47 se presenta el diseño de proceso de estabilización anaerobia.

En la Tabla 15.48 se presenta la última etapa del tren de tratamiento correspondiente a la deshidratación de los lodos por medio de lechos de secado y el diseño correspondiente.

Tabla 15.46 Diseño del sistema de espesamiento por gravedad del quinto tren de tratamiento de lodos propuesto para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Concentración inicial	1.65	por ciento
Concentración de espesamiento	5	por ciento
Carga másica	48.8	kg m^{-2} d^{-1}
Carga hidráulica	2.97	m^3 m^{-2} d^{-1}
Tiempo de retención hidráulico	22.2	h
Número de tanques	2	
Volumen del tanque	282	m^3
Profundidad	2.74	m
Área superficial por tanque	51.4	m^2
Diámetro del tanque	8.23	m
Cantidad de lodos generados	5 020	kg d^{-1}
Volumen de lodo espesado	86.2	m^3 d^{-1}
Mano de obra requerida para la operación	437	Horas por año
Trabajo de mantenimiento requerido	332	Horas por año
Energía eléctrica requerida	7 530	kWh por año
Volumen de movimiento de tierras requerido	435	m^3
Espesor de losa	25.8	cm
Volumen de losa de hormigón requerido	38	m^3
Espesor de la pared	29.2	cm
Volumen de muro de hormigón requerido	54.5	m^3

Tabla 15.47 Diseño del sistema de estabilización anaerobia de lodos correspondiente al quinto tren propuesto para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Porcentaje de SSV destruidos	50	por ciento
Concentración de sólidos en el reactor	5	por ciento
Tiempo de retención	15	d
Profundidad del reactor	7.44	m
Diámetro del reactor	15.2	m
Volumen efectivo del reactor	2 950	m^3
Número de reactores por batería	2	
Número de reactores primarios por batería	1	
Número de reactores secundarios por batería	1	
Número de baterías	1	
Gas producido	13.4	$m^3\ d^{-1}$
Calor requerido	506 000	BTU hr^{-1}
Gas requerido en el reactor	796	$m^3\ d^{-1}$
Total de gas natural que se requiere	38.6	$m^3\ d^{-1}$
Mano de obra de operación requerida	1 470	Horas al año
Trabajo de mantenimiento requerido	953	Horas al año
Energía eléctrica requerida	122 000	kWh por año
Volumen de excavación requerido	2 940	m^3
Espesor de losa	25.8	cm
Volumen de losa de hormigón requerido	106	m^3
Espesor de la pared	50.1	cm
Volumen de muro de hormigón requerido	444	m^3
Profundidad lateral del agua	7.44	m
Superficie/piso del edificio de control de 2 pisos	68.3	m^2
Tamaño de la tubería	15.3	cm
Longitud total del sistema de tuberías	159	m
Número de codos de 90 grados	26	
Número de tees	51	
Número de válvulas de tapón	37	
Total de sólidos secos tratados	4 520	kg d^{-1}

Tabla 15.48 Diseño del sistema de lechos de secado del quinto tren propuesto para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Área superficial total requerida	8 020	m^2
Profundidad inicial del lodo	30.5	cm
Contenido de sólidos final	50	por ciento
Tiempo de retención en el lecho de secado	28.5	d
Área superficial total requerida para el lecho de secado	8 020	m^2
Número de lechos	29	
Área superficial para cada lecho de secado	277	m^2
Longitud de cada lecho de secado	45.4	m
Volumen de excavación requerido	12 000	m^3
Volumen de concreto para la pared divisoria	806	m^3
Volumen de R. C. en el lugar para las pistas de camiones	183	m^3
Volumen de arena	1 830	m^3
Volumen de grava	2 450	m^3
Diámetro de la tubería para arcilla	15.3	cm
Longitud total de la tubería para arcilla	22 000	cm
Producción de sólidos en el lodo	4 290	kg d^{-1}
Horas de personal de operación requeridas	5 040	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	2 520	Horas hombre por año

15.4.5.2. Costos

En la Tabla 15.30 se presentan los costos del quinto tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR que trata un caudal promedio de 200 litros por segundo.

El costo total de construcción y equipamiento del tren de tratamiento, incluyendo los costos del sistema de bombeo y de todo los sistemas del tren de tratamiento, es de 41 782 000.0 pesos.

Con un costo anual de operación de 5 332 990.0 pesos, en este costo de operación se incluye la mano de obra de operación, mantenimiento, energía, materiales, suministros y la amortización de todos los equipos y del sistema de bombeo. Teniendo un costo total de 47 114 990.0 pesos.

15.4.6. Sexto tren de tratamiento

La sexta y última configuración del tren de tratamiento de lodos propuesta para una PTAR de capacidad media, conserva el proceso de estabilización anaerobia, pero cambia el proceso de espesamiento por gravedad al de flotación con aire disuelto y también cambia el proceso de lechos de secado por centrífugas para la deshidratación de los lodos. En la Ilustración 15.9 se presenta el esquema de este último tren de tratamiento.

15.4.6.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

De la simulación del tren de tratamiento de lodos, se presentan en la Tabla 15.50 y Tabla 15.51 los datos obtenidos de diseño del espesamiento por flotación con aire disuelto y acondicionamiento químico.

En la Tabla 15.52 se muestra el diseño del sistema de estabilización anaerobia del sexto tren de tratamiento de lodos.

En la Tabla 15.53 se presentan los datos del diseño del sistema de acondicionamiento químico de deshidratación y en la tabla 15.52 el diseño de la centrífuga.

15.4.6.2. Costos

En la tabla Tabla 15.55 se presentan los costos del sistema de acondicionamiento químico de lodos para el espesamiento y la deshidratación de los lodos.

En la Tabla 15.56 se presentan los resultados de los costos del sexto tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR que trata un caudal promedio de 200 litros por segundo.

El costo total de construcción y equipamiento del tren de tratamiento, incluyendo los costos del sistema de bombeo, el acondicionamiento químico y todos los sistemas del tren de tratamiento, sería de 61 172 000.0 pesos. Con un costo anual de operación de 8 370 490.0 pesos, en este costo de operación se incluye la mano de obra de operación, mantenimiento, energía, materiales, suministros y la amortización de todos los equipos y del sistema de bombeo. Teniendo un costo total de 69 542 490.0 pesos.

Tabla 15.49 Resultados de la estimación de los costos del quinto tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Estabilización anaerobia	Espesamiento por gravedad	Lechos de secado	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	38 300 000	2 610 000	11 500 000	Pesos
Costos de personal de operación	85 800	25 500	295 000	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	46 500	16 200	123 000	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	302 000	26 100	103 000	Pesos por año
Costos de energía	479 000	24 600	0	Pesos por año
Costos de amortización	3 660 000	256 000	1 070 000	Pesos por año

Tabla 15.50 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo del sexto tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1} (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Dosis de polímero	2.4	kg d^{-1}
Solución química liquida alimentada	0.96	m^3 d^{-1}
Requerimientos de mano de obra de operación y mantenimiento	783	Horas hombre por año
Requerimientos de mano de obra para el manejo de polímero seco y mezclado	442	Horas hombre por año

Ilustración 15.9 Esquema de la PTAR y del sexto tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

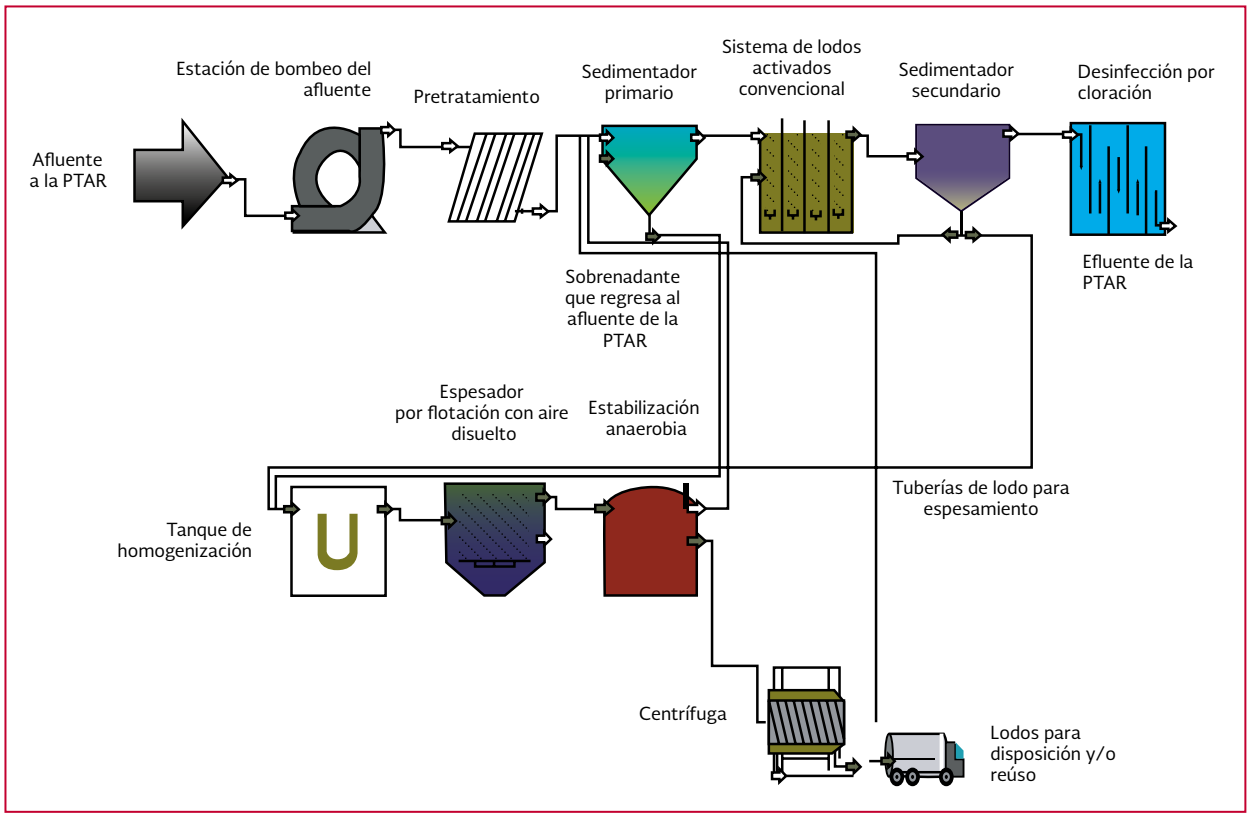


Tabla 15.51 Diseño del sistema de espesamiento por flotación con aire disuelto del sexto tren de tratamiento de lodo propuesto para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Relación aire sólidos	0.02	
Presión de aire	414	KPa
Carga de sólidos	48.8	kg m^{-2} d^{-1}
Flujo de recirculación	2 100	m^3 d^{-1}
Requerimientos de área superificial	98.2	m^2
Volumen del tanque a presión	2.92	m^3
Volumen del tanque de flotación	299	m^3
Tiempo de retención del tanque a presión	2	minutos
Tiempo de retención del tanque de flotación	3	Horas
Requerimientos de polímero	2.4	kg d^{-1}
Número de unidades	1	
Area superficial por unidad de flotación	116	m^2
Diámetro de la unidad de flotación	12.2	m
Cantidad de lodo generado	5 370	kg d^{-1}
Área de construcción del tanque	175	m^2
Volumen de excavación requerido	437	m^3
Espesor de la losa	25.6	cm
Volumen de la losa de concreto requerido	37.7	m^3
Espesor de las paredes	28.8	cm
Volumen de las paredes de concreto requerido	35	m^3
Profundidad del agua	2.63	m
Horas de personal de operación requeridas	1 160	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	362	Horas hombre por año
Energía requerida	30 2000	KWh por año

Tabla 15.52 Diseño del sistema de estabilización anaerobia de lodo para l sexta configuración del tratamiento de lodos generados por una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Porcentaje de SSV destruidos	50	por ciento
Concentración de sólidos en el reactor	5	por ciento
Tiempo de retención	15	d
Profundidad del reactor	7.44	m
Diámetro del reactor	15.2	m
Volumen efectivo del reactor	2 950	m^3
Número de reactores por batería	2	
Número de reactores primarios por batería	1	
Número de reactores secundarios por batería	1	
Número de baterías	1	
Gas producido	12	m^3 d^{-1}
Calor requerido	524 000	BTU hr^{-1}
Gas requerido en el reactor	824	m^3 d^{-1}
Total de gas natural que se requiere	40.1	m^3 d^{-1}
Mano de obra de operación requerida	1 370	Horas al año
Trabajo de mantenimiento requerido	882	Horas al año
Energía eléctrica requerida	110 000	kWh por año
Volumen de excavación requerido	2 940	m^3

Tabla 15.52 Diseño del sistema de estabilización anaerobia de lodo para l sexta configuración del tratamiento de lodos generados por una PTAR que trata un caudal de 200 L s-1 de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) (continuación)

Descripción	Valor	Unidades
Espesor de losa	25.8	cm
Volumen de losa de hormigón requerido	106	m^3
Espesor de la pared	50.1	cm
Volumen de muro de hormigón requerido	444	m^3
Profundidad lateral del agua	7.44	m
Superficie/piso del edificio de control de 2 pisos	68.3	m^2
Tamaño de la tubería	15.3	cm
Longitud total del sistema de tuberías	159	m
Número de codos de 90 grados	26	
Número de tees	51	
Número de válvulas de tapón	37	
Total de sólidos secos tratados	3 840	kg d^{-1}

Tabla 15.53 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo para deshidratación del sexto tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Dosis de polímero	53.5	kg d^{-1}
Solución química liquida alimentada	21.4	m^3 d^{-1}
Requerimientos de mano de obra de operación y mantenimiento	3 560	Horas hombre por año
Requerimientos de mano de obra para el manejo de polímero seco y mezclado	1 060	Horas hombre por año

Tabla 15.54 Diseño de la centrífuga del sexto tren de tratamiento propuesto para la deshidratación del lodo generado por una PTAR que trata un caudal de 200 L·s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Energía total requerida	52.3	kW
Requerimiento de energía por unidad	26.2	kW
Factor de seguridad	1.25	
Número de unidades	2	
Dosis química	1	por ciento en peso seco
Productos químicos requeridos	161	kg d^{-1}
Flujo de lodos	306	m^3 d^{-1}
Concentrado inicial de sólidos	5	por ciento
Horas de funcionamiento por día	8	h
Días de funcionamiento por semana	5	d
Número de centrífugas	2	
Energía por unidad	26.2	kW
Área de construcción	32.2	m^2
Sólidos secos producidos	3 640	kg d^{-1}
Mano de obra de operación requerida	3 040	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	515	Horas hombre por año
Energía eléctrica requerida	119 000	kWh por año

Tabla 15.55 Costos del acondicionamiento químico de lodos del sexto tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por flotación con aire disuelto	Centrífuga	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	134 000	909 000	Pesos
Costos de personal de operación	71 600	270 000	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	2 680	18 200	Pesos por año
Costos de energía	32 600	518 000	Pesos por año

Tabla 15.56 Resultados de la estimación de los costos del sexto tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Estabilización anaerobia	Espesamiento por flotación con aire disuelto	Centrífuga	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	38 300 000	9 600 000	12 400 000	Pesos
Costos de personal de operación	79 800	67 700	178 000	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	42 000	17 200	24 500	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	305 000	96 000	365 000	Pesos por año
Costos de energía	445 000	989 000	390 000	Pesos por año
Costos de amortización	3 660 000	0	1 300 000	Pesos por año

15.4.7. Comparación de los costos de los diferentes trenes de tratamiento propuestos.

Con el objetivo de poder hacer una comparación de los costos entre los seis diferentes trenes de tratamiento propuestos en la Tabla 15.57 se presenta un resumen de los costos de cada tren de tratamiento.

En la Ilustración 15.10 se muestra un gráfico de los costos de construcción, equipamiento y operación anual para todos los trenes de tratamiento de lodos propuestos con diferentes procesos, de esta forma es posible hacer una mejor comparación de los costos entre cada uno de los trenes propuestos.

De acuerdo a los datos presentados anteriormente, el sistema de tratamiento de lodos es más costo cuando se utilizan equipos que usan acondicionamiento químico, como espesamiento por flotación con aire disuelto, por gravedad en banas, deshidratación por filtros banda o centrífugas, independientemente del sistema de estabilización que se elija anaerobio o aerobia. Sin embargo cuando se utilizan equipos que no requieren acondicionamiento químico como espesamiento por gravedad o lechos de secado el costo del sistema de tratamiento de lodos es menor.

15.5. Estimación de costos para el tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal promedio de 800 L s^{-1} de agua residual cruda

Debido a la capacidad tan grande de tratamiento de aguas residuales municipales de esta PTAR y por la generación de lodos primario y secundario que se obtiene se decidió descartar el sistema de lechos de secado para la deshidratación de lodos. Por lo tanto, solo se realizaron un total

de cuatro propuestas diferentes. Los cuatro diferentes trenes de tratamiento son e incluyen:

Tabla 15.58 Trenes de tratamiento para un caudal de 800 L·s^{-1}

Tren	Unidades de tratamiento
1	Espesamiento por gravedad en bandas con acondicionamiento químico de lodos y sin recirculación, estabilización aerobia y deshidratación por filtros prensa de bandas.
2	Estabilización aerobia, espesamiento por flotación con aire disuelto con acondicionamiento químico y recirculación de lodos hacia el reactor correspondiente a la estabilización aerobia de lodos y deshidratación por centrífugas.
3	Espesamiento por gravedad en bandas con acondicionamiento químico de lodos y sin recirculación, estabilización anaerobia y deshidratación por filtros prensa de bandas.
4	El cuarto y último tren propuesto incluye espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico, estabilización anaerobia y espesamiento por centrífugas.

15.5.1. Primer tren de tratamiento

El esquema de este tren de tratamiento es igual al presentado en la Ilustración 15.7, únicamente difiere en la capacidad de tratamiento de aguas residuales de la planta, que para este caso será un caudal promedio de de 800 L s^{-1} lo cual equivale a 69 100 m^3 d^{-1}, teniendo un caudal mínimo de 43 200 m^3 d^{-1} y un caudal máximo de 95 000 m^3 d^{-1}. Espesamiento por gravedad en bandas con acondicionamiento químico de lodos y sin recirculación, estabilización aerobia y deshidratación por filtros prensa de bandas.

De igual manera que para las simulaciones anteriormente presentadas, la simulación para la estimación de los costos y del diseño de estos 4 trenes de tratamiento propuestos se realizó considerando una mezcla de lodo primario y secundario, en la Tabla 15.59 se mencionan sus características.

15.5.1.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

Para determinar el costo total de los diferentes trenes de tratamiento propuesto, también se realiza el diseño y costeo del sistema de bombeo de lodo hacia el primer equipo de tratamiento. Este sistema de bombeo será el mismo para todos los trenes de tratamiento propuestos, por lo que el diseño y costeo será el mismo para todos los casos. En la Tabla 15.60 se presenta el diseño de este sistema de bombeo.

En la Tabla 15.61 se presenta el diseño del equipo de espesamiento por gravedad en bandas.

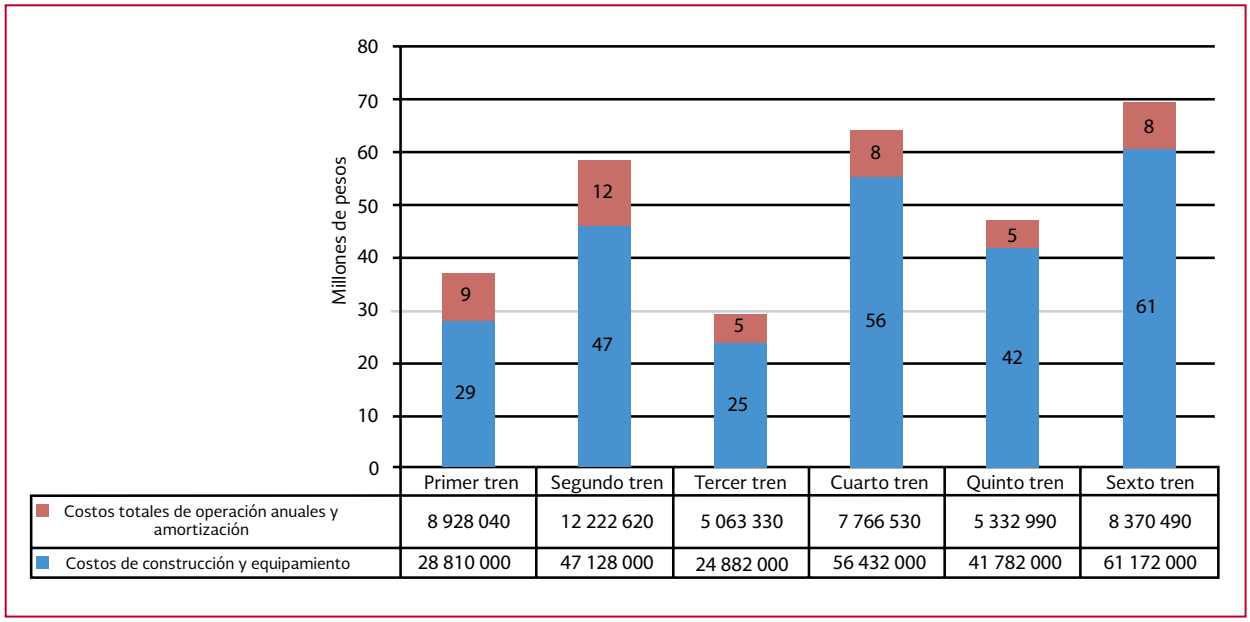
En la Tabla 15.62 se establece el diseño de la estabilización aerobia de lodos para el primer tren de tratamiento de lodos propuestos.

La última etapa del tren de tratamiento de lodos es la deshidratación con acondicionamiento químico por medio de filtro prensa de bandas, en la Tabla 15.63 se muestran los resultados del diseño.

Tabla 15.57 Resumen de los costos de los seis trenes de tratamiento de lodos propuestos para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

Concepto de los costos	Primer tren	Segundo tren	Tercer tren	Cuarto tren	Quinto tren	Sexto tren
Costo de construcción y equipamiento	28 912 000	47 128 000	24 882 000	56 432 000	41 782 000	61 172 000
Costos totales de operación anuales y amortización	8 928 040	12 222 620	5 063 330	7 766 530	5 332 990	8 370 490
Costo total	37 840 040	59 350 620	29 945 330	64 198 530	47 114 990	69 542 490

Ilustración 15.10 Estimación de costos para trenes de tratamiento con un caudal promedio de 200 L·s^{-1} como se describe en la Tabla 15.23 (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)



	Primer tren	Segundo tren	Tercer tren	Cuarto tren	Quinto tren	Sexto tren
Costos totales de operación anuales y amortización	8 928 040	12 222 620	5 063 330	7 766 530	5 332 990	8 370 490
Costos de construcción y equipamiento	28 810 000	47 128 000	24 882 000	56 432 000	41 782 000	61 172 000

15.5.1.2. Costos

En la Tabla 15.64 se presentan los costos del sistema de bombeo del lodo primario y secundario hacia el primer sistema del tren de tratamiento de lodo para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual.

Los resultados del diseño y costeo del sistema de bombeo para transportar el lodo primario y secundario hacia el primer sistema del tren de tratamiento de lodos presentados en la Tabla 15.64, son los mismos para los diferentes trenes de tratamiento que se proponen para el tratamiento del lodo obtenido por una PTAR que trata un caudal promedio de 800 L s^{-1} de agua residual.

En la Tabla 15.65 se presentan los costos de construcción y equipamiento de los sistemas de espesamiento y deshidratación con acondicionamiento químico.

En la Tabla 15.66 se presentan los costos de construcción, equipamiento, operación y mantenimiento de todo el tren de tratamiento de lodos.

El costo total de construcción y equipamiento de este primer tren de tratamiento es de 66 971 000.0 pesos. El costo de operación anual es de 14 755 030.0 pesos el cual incluye costos de mano de obra de operación, mantenimiento, materiales, suministros, energía, y amortización. Teniendo un costo total por un año de 81 726 030.0, que incluye construcción, equipamiento y operación.

Tabla 15.59 Características del lodo primario y secundario generado en la PTAR con un caudal promedio de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetros y unidades	Unidades	Sedimentador primario	Sedimentador secundario
Flujo promedio	$m^3\ d^{-1}$	210	829
Sólidos suspendidos	$g\ m^{-3}$	40 000	10 000
Sólidos volátiles	por ciento	78.9	76
DBO	$g\ m^{-3}$	23 200	1 930
DBO soluble	$g\ m^{-3}$	79.1	1.88
DQO	$g\ m^{-3}$	67 100	11 400
DQO soluble	$g\ m^{-3}$	300	2.82
NTK	$gN\ m^{-3}$	698	761
NTK soluble	$gN\ m^{-3}$	27.7	0.923
N amoniacal	$gN\ m^{-3}$	24.7	0.923
Nitritos	$gN\ m^{-3}$	0	0
Nitratos	$gN\ m^{-3}$	0.409	30.8
PT	$gP\ m^{-3}$	148	6.7
pH		7.6	7.6
Cationes	$g\ m^{-3}$	160	160
Aniones	$g\ m^{-3}$	160	160
Sólidos sedimentables	$mL\ L^{-1}$	0	0
Grasas y aceites	$g\ m^{-3}$	98.8	0
Temperatura en verano	°C	23	23
Temperatura en invierno	°C	10	10

Tabla 15.60 Datos del diseño del sistema de bombeo del lodo primario y secundario al tren de tratamiento del lodo de la PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

Parámetro	Resultados para el sistema de bombeo		Unidades
	Lodo primario	Lodo secundario	
Caudal de bombeo promedio diario	210	829	$m^3\ d^{-1}$
Capacidad total de bombeo	210	829	$m^3\ d^{-1}$
Capacidad de diseño por bomba	105	415	$m^3\ d^{-1}$
Número de bombas	3	3	
Número de baterías	1	1	
Capacidad de bombeo firme	210	829	$m^3\ d^{-1}$
Horas de personal de operación requeridas	303	362	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	235	288	Horas hombre por año
Energía requerida	1 870	7 360	KWh por año
Volumen de movimiento de tierras requerido	45.6	46.3	m^3
Área de construcción para las bombas	18.7	19	m^2

Tabla 15.61 Resultados del diseño del sistema de espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico de la primera configuración propuesta del sistema de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal promedio de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Ancho de la banda del filtro	2	m
Número de unidades	4	
Carga hidráulica por metro de ancho de banda del filtro	681	$m^3 d^{-1}$
Carga hidráulica requerida por metro de ancho de banda del filtro	4 360	$m^3 d^{-1}$
Contenido final de sólidos	7	por ciento
Fracción de sólidos capturados	0.993	
Horas de personal de operación requeridas	1 230	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	306	Horas hombre por año
Energía requerida	244 000	KWh por año
Polímero requerido	69.2	kg d^{-1}
Producción de sólidos secos	17 300	kg d^{-1}

Tabla 15.62 Diseño del sistema de estabilización aerobia del primer tren de tratamiento de lodo para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo de retención de sólidos	3.93	d
SS de diseño	12 000	g m^{-3}
SSV calculado	55.9	g m^{-3}
Relación SST:SSV calculada	0.00466	mg SSV/mg SS
Volumen total de los reactores	4 270	m^3
Longitud del tren	43	m
Ancho del tren	10	m
Profundidad lateral del agua	5	m
Número de baterías	1	
Número de equipos en paralelos por la batería	2	
Requerimiento de oxígeno para satisfacer la demanda promedio	238	kg d^{-1}
El flujo de aire necesario para satisfacer la demanda promedio	5 070	N m^3 hr^{-1}
Flujo de aire de diseño	19.8	N m^3 min^{-1} 1 000 m^3
Carga de sólidos volátiles	11.5	kg m^{-1} yr^{-1}
Sólidos acumulados	13 000	kg d^{-1}
Capacidad del reactor	51 200	kg
Volumen de lodo residual	1 950	m^3
Mano de obra de operación requerida	1 500	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	761	Horas hombre por año
Energía eléctrica requerida	775 000	kWh por año
Volumen de movimiento de tierras requerido	2 540	m^3
Volumen de losa de hormigón requerido	565	m^3
Volumen de muro de hormigón requerido	380	m^3
Longitud del pasamanos	110	m
Número de difusores por tren	126	
Número de cabezales por tren	6	

*Nm3 por minuto o por hora, son m3 normales de aire por hora o por minuto

Tabla 15.63 Resultados del diseño del sistema de deshidratación del primer tren de tratamiento de lodos de la PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Ancho de la banda del filtro	2	m
Número de unidades	3	
Carga hidráulica por unidad por metro de ancho de la banda	382	$m^3\ d^{-1}$
Carga hidráulica requerida por metro de ancho de la cinta	2 090	$m^3\ d^{-1}$
Contenido final de sólidos	19	por ciento
Fracción de sólidos de captura	0.996	
Mano de obra de operación requerida	912	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	228	Horas hombre por año
Energía	247 000	kWh por año
Polímero requerido	149	$kg\ d^{-1}$
Sólidos secos producidos	14 900	$kg\ d^{-1}$

Tabla 15.64 Costos del sistema de bombeo del lodo primario y secundario al sistema de espesamiento para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Valor de los costos del sistema de bombeo		Unidades
	Lodo primario	Lodo secundario	
Costo de construcción y equipamiento	459 000	612 000	Pesos
Costos de personal de operación	17 700	21 200	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	11 700	14 300	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	3 220	4 290	Pesos por año
Costos de energía	6 120	24 100	Pesos por año
Costos de amortización	46 800	62 400	Pesos por año

Tabla 15.65 Costos de construcción y equipamiento del sistema de espesamiento y deshidratación del primer tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico	Deshidratación en filtro prensa de bandas	Unidades
Costo del filtro bandas	13 200 000	9 940 000	Pesos
Construcción	4 560 000	4 180 000	Pesos
Instalación	3 310 000	2 480 000	Pesos
Sistema del polímero	4 900 000	3 680 000	Pesos
Bombas de alimentación del polímero	1 460 000	1 090 000	Pesos
Sistema de transportación del polímero	3 310 000	2 480 000	Pesos

Tabla 15.66 Resultados de la estimación de los costos del sexto tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico	Reactor Aerobio	Filtro bandas	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	30 800 000	11 300 000	23 800 000	Pesos
Costos de personal de operación	71 600	87 700	53 300	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	15 300	37 900	11 400	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	940 000	831 000	2 020 000	Pesos por año
Costos de energía	797 000	2 530 000	808 000	Pesos por año
Costos de amortización	2 980 000	1 060 000	2 300 000	Pesos por año

15.5.2. Segundo tren de tratamiento

El esquema de este tren de tratamiento es el correspondiente a la la Ilustración 15.6. Estabilización aerobia, espesamiento por flotación con aire disuelto con acondicionamiento químico y recirculación de lodos hacia el reactor correspondiente a la estabilización aerobia de lodos y deshidratación por centrífugas.

15.5.2.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

En la Tabla 15.67 se encuentran los valores de diseño obtenidos de la simulación para el proceso de estabilización aerobia de lodos para este segundo tren de tratamiento.

En la Tabla 15.68 y 15.69 se encuentran los valores de diseño obtenidos de la simulación para el proceso de espesamiento por flotación con aire disuelto y acondicionamiento químico para este segundo tren de tratamiento.

Finalmente el diseño del acondicionamiento químico y de la centrífuga se presentan en la Tabla 15.70 y Tabla 15.71 respectivamente.

15.5.2.2. Costos

En la Tabla 15.72 se presentan los costos de construcción, equipamiento, mano de obra, mantenimiento y energía del sistema de acondicionamiento quimico para espesamiento y deshidratación.

En la Tabla 15.73 se presenta la estimación de costos realizada para este segundo tren de tratamiento de lodos.

El costo total de construcción y equipamiento del tren de tratamiento, incluyendo los costos del sistema de bombeo, el acondicionamiento químico y todos los sistemas del tren de tratamiento, sería de 176 250 000.0 pesos. Con un costo anual de operación de 47 845 410.0 pesos, en este costo de operación se incluye la mano de obra de operación, mantenimiento, energía, materiales, suministros y la amortización de todos los equipos y del sistema de bombeo. Teniendo un costo total de construcción, equipamiento y operación por un año de 224 095 410.0 pesos.

Tabla 15.67 Diseño del sistema de estabilización aerobia de lodos del segundo tren de tratamiento del lodo de la PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Tiempo de retención de sólidos	13.5	d
SS de diseño	12 000	g m^{-3}
SSV calculado	28	g m^{-3}
Relación SST:SSV calculada	0.00233	mg SSV/mg SS
Volumen total de los reactores	33 100	m^3
Longitud del tren	111	m
Ancho del tren	10	m
Profundidad lateral del agua	5	m
Número de baterías	1	
Número de equipos en paralelos por batería	6	
Requerimiento de oxígeno para satisfacer la demanda promedio	269	kg d^{-1}
El flujo de aire necesario para satisfacer la demanda promedio	39 300	N m^3 hr^{-1}
Flujo de aire de diseño	19.8	N $m^3 \cdot min^{-1}$ 1000 m^3
Carga de sólidos volátiles	1.68	kg m^{-1} yr^{-1}
Sólidos acumulados	29 500	kg d^{-1}
Capacidad del reactor	397 000	kg
Volumen de lodo residual	15 100	m^3
Mano de obra de operación requerida	4 210	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	2 620	Horas hombre por año
Energía eléctrica requerida	6 000 000	kWh por año
Volumen de excavación requerido	15 300	m^3
Volumen de losa de hormigón requerido	4 770	m^3
Volumen de muro de hormigón requerido	2 970	m^3
Longitud del pasamanos	1 190	m
Número de difusores por tren	324	
Número de cabezales por tren	15	

*Nm^3 por minuto o por hora, son m^3 normales de aire por hora o por minuto.

Tabla 15.68 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo del segundo tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Dosis de polímero	14	kg d^{-1}
Solución química liquida alimentada	5.62	m^3 d^{-1}
Requerimientos de mano de obra de operación y mantenimiento	1 850	Horas hombre por año
Requerimientos de mano de obra para el manejo de polímero seco y mezclado	729	Horas hombre por año

Tabla 15.69 Diseño del sistema de espesamiento por flotación con aire disuelto del segundo tren de tratamiento de lodo propuesto para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Relación aire sólidos	0.02	
Presión de aire	414	KPa
carga de sólidos	48.8	kg m^{-2} d^{-1}
Flujo de recirculación	15 800	m^3 d^{-1}
Área superficial	575	m^2
Volumen del tanque a presión	22	m^3
Volumen del tanque de flotación	2 120	m^3
Tiempo de retención del tanque a presión	2	minutos
Tiempo de retención del tanque de flotación	3	Horas
Requerimientos de polímero	14	kg d^{-1}
Número de unidades	5	
Área superficial por unidad de flotación	116	m^2
Diámetro de la unidad de flotación	12.2	m
Cantidad de lodo generado	31 400	kg d^{-1}
Área de construcción del tanque	874	m^2
Volumen de excavación requerido	2 180	m^3
Espesor de la losa	25.6	cm
Volumen de la losa de concreto requerido	189	m^3
Espesor de las paredes	28.8	cm
Volumen de las paredes de concreto requerido	178	m^3
Profundidad del agua	2.63	m
Horas de personal de operación requeridas	2 850	Horas hombre por año
Horas de personal de mantenimiento requeridas	1 130	Horas hombre por año
Energía requerida	1 600 000	KWh por año

Tabla 15.70 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo para deshidratación del segundo tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Dosis de polímero	157	kg d^{-1}
Solución química liquida alimentada	63	m^3 d^{-1}
Requerimientos de mano de obra de operación y mantenimiento	6 570	Horas hombre por año
Requerimientos de mano de obra para el manejo de polímero seco y mezclado	1 440	Horas hombre por año

Tabla 15.71 Diseño de la centrífuga del segundo tren de tratamiento propuesto para la deshidratación del lodo generado por una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Energía total requerida	192	kW
Requerimiento de energía por unidad	96	kW
Factor de seguridad	1.25	
Número de unidades	2	
Dosis química	1	por ciento en peso seco
Productos químicos requeridos	472	kg d^{-1}
Flujo de lodos	1 120	m^3 d^{-1}
Concentración inicial de sólidos	4	por ciento
Horas de funcionamiento por día	8	h
Días de funcionamiento por semana	5	d
Número de centrífugas	2	
Energía por unidad	96	kW
Área de construcción	54.1	m^2
Sólidos secos producidos	10 700	kg d^{-1}
Mano de obra de operación requerida	5 470	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	928	Horas hombre por año
Energía eléctrica requerida	323 000	kWh por año

Tabla 15.72 Costos del acondicionamiento químico de lodos del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por flotación con aire disuelto	Centrífuga	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	289 000	2 290 000	Pesos
Costos de personal de operación	151 000	468 000	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	5 780	45 700	Pesos por año
Costos de energía	191 000	1 520 000	Pesos por año

Tabla 15.73 Resultados de la estimación de los costos del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por flotación con aire disuelto	Estabilización aerobia	Centrífuga	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	48 100 000	90 400 000	34 100 000	Pesos
Costos de personal de operación	166 000	246 000	320 000	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	57 600	134 000	47 500	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	481 000	3 900 000	1 230 000	Pesos por año
Costos de energía	5 230 000	19 600 000	1 060 000	Pesos por año
Costos de amortización	0	9 210 000	3 570 000	Pesos por año

15.5.3. Tercer tren de tratamiento

Para el tercer tren de tratamiento de lodos propuesto, el proceso inicia con el espesamiento de lodos por gravedad en bandas junto con el acondicionamiento químico, seguido por la estabilización anaerobia del lodo y terminando con la deshidratación del lodo por medio del filtro prensa de banda. En la Ilustración 15.8 se presenta el esquema para este tercer tren de tratamiento.

15.5.3.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

El diseño del espesador por gravedad en bandas es el mismo que se presenta en la Tabla 15.61, ya que para ambos trenes de tratamiento la primera etapa es el espesamiento por gravedad en bandas con acondicionamiento químico sin recirculación de lodos.

El diseño de la siguiente etapa que consiste en la estabilización anaerobia de lodos se muestra en la Tabla 15.74.

La última etapa es la deshidratación de los lodos con acondicionamiento químico por medio de filtros banda, el diseño correspondiente a este equipo está en la Tabla 15.75.

15.5.3.2. Costos

Los resultados de los costos del equipamiento y construcción del espesamiento por gravedad en bandas con acondicionamiento químico y del filtro prensa de bandas con acondicionamiento químico para la deshidratación se presentan en la Tabla 15.76. En la Tabla 15.77 se presentan los costos de los sistemas que integran el tercer tren de tratamiento de lodos.

El costo de operación anual del tren de tratamiento es de 20 608 930.0 pesos, en el cual incluye mano de obra de operación, mantenimiento de los equipos, materiales, suministros, energía y amortización. El costo de construcción y equipamiento es de 129 671 000.0 pesos. Haciendo un total de 150 279 930.0 pesos.

15.5.4. Cuarto tren de tratamiento

El cuarto y último tren de tratamiento de lodos propuesto, conserva el proceso de estabilización anaerobia, pero cambia el proceso de espesamiento por gravedad en bandas por el de gravedad convencional y la deshidratación en filtros prensa de bandas por centrífuga. El esquema de este último tren de tratamiento se presenta en la Ilustración 15.11.

15.5.4.1. Diseño de los sistemas de tratamiento

De la simulación del tren de tratamiento de lodos, se presentan en la Tabla 15.78 los datos obtenidos de diseño del espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico.

En la Tabla 15.79 se muestra el diseño del sistema de estabilización anaerobia del cuarto tren de tratamiento de lodos.

En la Tabla 15.80 se presentan los datos del diseño del sistema de acondicionamiento químico para la deshidratación y en la Tabla 15.81 el diseño de la centrífuga.

Tabla 15.74 Diseño del sistema de estabilización anaerobia de lodos correspondiente al tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 $L \cdot s^{-1}$ de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Porcentaje de SSV destruidos	50	por ciento
Concentración de sólidos en el reactor	5	por ciento
Tiempo de retención	15	d
Profundidad del reactor	7.44	m
Diámetro del reactor	15.2	m
Volumen efectivo del reactor	5 900	m^3
Número de reactores por batería	4	
Número de reactores primarios por batería	3	
Número de reactores secundarios por batería	1	
Número de baterías	1	
Gas producido	62.2	$m^3\ d^{-1}$
Calor requerido	1 450 000	BTU hr^{-1}
Gas requerido en el reactor	2 280	$m^3\ d^{-1}$
Total de gas natural que sea requiere	109	$m^3\ d^{-1}$
Mano de obra de operación requerida	3 370	Horas al año
Trabajo de mantenimiento requerido	2 160	Horas al año
Energía eléctrica requerida	327 000	kWh por año
Volumen de excavación requerido	5 870	m^3
Espesor de losa	25.8	cm
Volumen de losa de hormigón requerido	212	m^3
Espesor de la pared	50.1	cm
Volumen de muro de hormigón requerido	888	m^3
Profundidad lateral del agua	7.44	m
Superficie /piso del edificio de control de 2 pisos	113	m^2
Tamaño de la tubería	15.3	cm
Longitud total del sistema de tuberías	317	m
Número de codos de 90 grados	52	piezas
Número de tees	102	piezas
Número de válvulas de tapón	74	piezas
Total de sólidos secos tratados	17 500	kg d^{-1}

Tabla 15.75 Diseño del sistema de deshidratación del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Ancho de la banda del filtro	2	m
Número de unidades	2	
Carga hidráulica por unidad por metro de ancho de la banda	382	$m^3\ d^{-1}$
Carga hidráulica requerida por metro de ancho de la cinta	1 400	$m^3\ d^{-1}$
Contenido de sólidos final	19	por ciento
Fracción sólidos capturada	0.998	
Mano de obra de operación requerida		Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	1 220	Horas hombre por año
Energía	305	kWh por año
Polímero requerido	324 000	kg d^{-1}
Sólidos secos producidos	199	kg d^{-1}

Tabla 15.76 Costos de construcción y equipamiento del sistema de espesamiento y deshidratación del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico	Deshidratación en filtro prensa de bandas	Unidades
Costo del filtro bandas	13 200 000	6 620 000	Pesos
Construcción	4 560 000	3 800 000	Pesos
Instalación	3 310 000	1 660 000	Pesos
Sistema del polímero	4 900 000	2 450 000	Pesos
Bombas de alimentación del polímero	1 460 000	729 000	Pesos
Sistema de transportación del polímero	3 310 000	1 660 000	Pesos

Tabla 15.77 Resultados de la estimación de los costos del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico	Estabilización anaerobia	Deshidratación por filtro bandas y acondicionamiento químico	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	30 800 000	80 900 000	16 900 000	Pesos
Costos de personal de operación	71 900	197 000	71 300	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	15 500	109 000	15 400	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	943 000	734 000	2 710 000	Pesos por año
Costos de energía	800 000	1 300 000	1 060 000	Pesos por año
Costos de amortización	2 980 000	7 760 000	1 630 000	Pesos por año

Tabla 15.78 Diseño del sistema de espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico correspondiente al cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Concentración inicial	1.66	por ciento
Concentración de espesamiento	5	por ciento
Carga másica	48.8	kg m^{-2} d^{-1}
Carga hidráulica	2.94	m^3 m^{-2} d^{-1}
Tiempo de retención hidráulico	22.4	h
Número de tanques	2	
Volumen del tanque	1250	m^3
Profundidad	2.74	m
Superficie de área por tanque	228	m^2
Diámetro del tanque	17.1	m
Cantidad de lodos generados	1.66	kg d^{-1}
Volumen de lodo espesado	5	m^3 d^{-1}
Mano de obra requerida para la operación	48.8	Horas por año
Trabajo de mantenimiento requerido	2.94	Horas por año
Energía eléctrica requerida	22.4	kWh por año
Volumen de movimiento de tierras requerido	2	m^3
Espesor de losa	1250	cm
Volumen de losa de hormigón requerido	2.74	m^3
Espesor de la pared	228	cm
Volumen de muro de hormigón requerido	17.1	m^3

Tabla 15.79 Diseño del sistema de estabilización anaerobia de lodo para la cuarta configuración del tratamiento de lodos generados por una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Porcentaje de SSV destruidos	50	por ciento
Concentración de sólidos en el reactor	5	por ciento
Tiempo de retención	15	d
Profundidad del reactor	7.98	m
Diámetro del reactor	18.3	m
Volumen efectivo del reactor	9 190	m^3
Número de reactores por batería	4	
Número de reactores primarios por batería	3	
Número de reactores secundarios por batería (almacenamiento)	1	
Número de baterías	1	
Gas producido	53.6	$m^3\ d^{-1}$
Calor requerido	2 260 000	BTU hr^{-1}
Gas en el reactor	3 550	$m^3\ d^{-1}$
Total de gas natural que sea requiere	173	$m^3\ d^{-1}$
Mano de obra de operación requerida	3 770	Horas al año
Trabajo de mantenimiento requerido	2 410	Horas al año
Energía eléctrica requerida	365 000	kWh por año
Volumen de movimiento de tierras requerido	9 150	m^3
Espesor de losa	26.9	cm
Volumen de losa de hormigón requerido	312	m^3
Espesor de la pared	52.4	cm
Volumen de muro de hormigón requerido	1 180	m^3
Profundidad lateral del agua	7.98	m
Superficie/piso del edificio de control de 2 pisos	163	m^2
Tamaño de la tubería	20.3	cm
Longitud total del sistema de tuberías	360	m
Número de codos de 90 grados	52	
Número de tees	102	
Número de válvulas de tapón	74	
Total de sólidos secos tratados	20 000	kg d^{-1}

Tabla 15.80 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo para deshidratación del cuarto tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Descripción	Valor	Unidades
Dosis de polímero	279	kg d^{-1}
Solución química liquida alimentada	112	$m^3\ d^{-1}$
Requerimientos de mano de obra de operación y mantenimiento	9 530	Horas hombre por año
Requerimientos de mano de obra para el manejo de polímero seco y mezclado	1 700	Horas hombre por año

Ilustración 15.11 Esquema de la PTAR y del cuarto tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

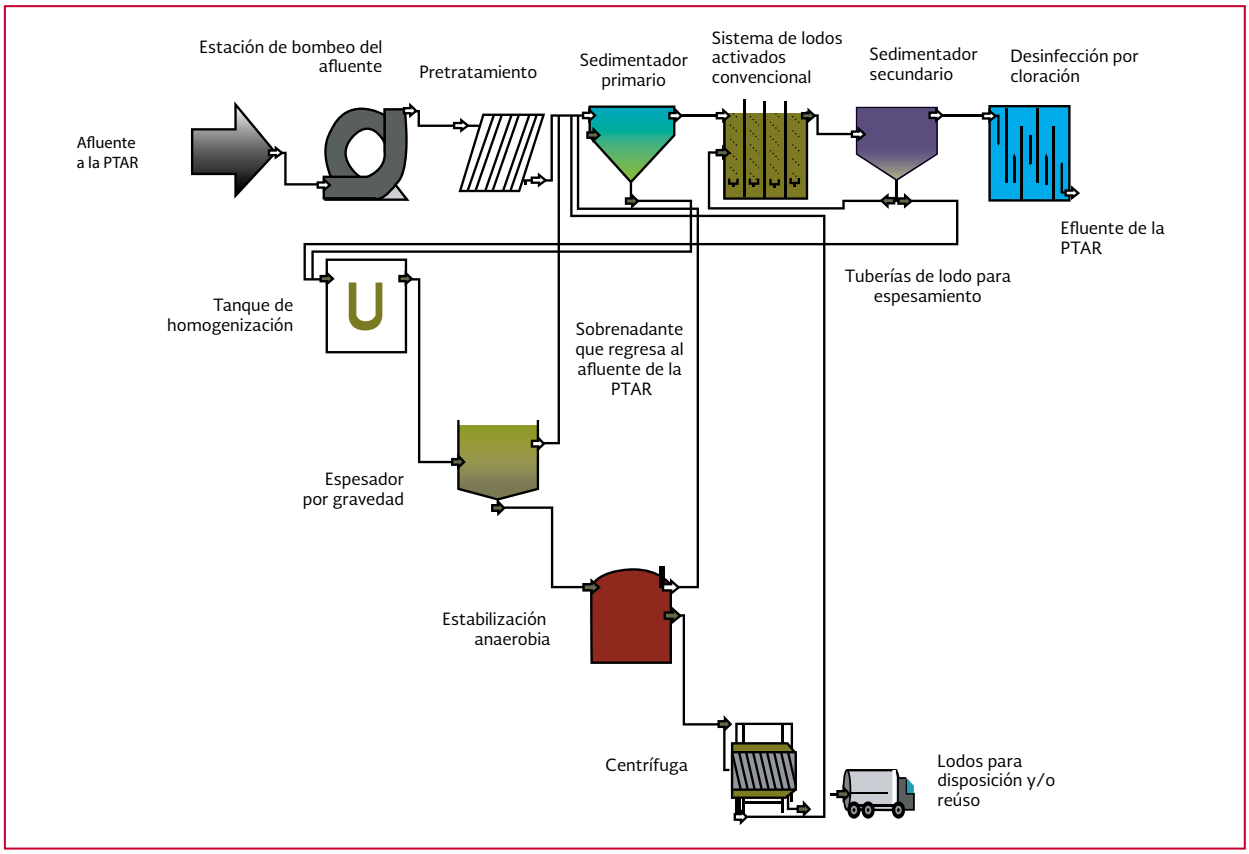


Tabla 15.81 Diseño de la centrífuga del cuarto tren de tratamiento propuesto para la deshidratación del lodo generado por una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Parámetro	Valor	Unidades
Energía total requerida	273	kW
Requerimiento de energía por unidad	137	kW
Factor de seguridad	1.25	
Número de unidades	2	
Dosis química	1	por ciento en peso seco
Productos químicos requeridos	838	kg d^{-1}
Flujo de lodos	1 600	m^3 d^{-1}
Concentración inicial de sólidos	5	por ciento
Horas de funcionamiento por día	8	h
Días de funcionamiento por semana	5	d
Número de centrífugas	2	
Consumo de energía por unidad	137	kW
Área de construcción	64.6	m^2
Sólidos secos producidos	19 000	kg d^{-1}
Mano de obra de operación requerida	9 060	Horas hombre por año
Trabajo de mantenimiento requerido	1 520	Horas hombre por año
Energía eléctrica requerida	550 000	kWh por año

15.5.4.2. Costos

En la Tabla 15.82 se presentan los costos del sistema de acondicionamiento químico de lodos para la deshidratación.

En la Tabla 15.83 se presentan los resultados de los costos del cuarto tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR que trata un caudal promedio de 800 litros por segundo.

El costo total de construcción y equipamiento del tren de tratamiento, incluyendo los costos del sistema de bombeo, el acondicionamiento químico y todos los sistemas del tren de tratamiento, sería de 159 601 000.0 pesos. Con un costo anual de operación de 26 178 830.0 pesos, en este costo de operación se incluye la mano de obra de operación, mantenimiento, energía, materiales, suministros y la amortización de todos los equipos y del sistema de bombeo. Teniendo un costo total de 185 779 830.0 pesos.

Comparación de los costos de los diferentes trenes de tratamiento propuestos. En la Tabla 15.84 se presenta un resumen de los costos de cada tren de tratamiento propuesto para hacer una comparación.

Para poder hacer una mejor comparación de los costos en la Ilustración 15.12 se presenta un gráfico de la estimación de costos para las cuatro configuraciones diferentes propuestas sobre el tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal promedio de 800 L s^{-1} de agua residual municipal.

En base a los costos obtenidos, podemos observar que el sistema de tratamiento que incluye, espesamiento en bandas, estabilización aerobia y deshidratación con filtro bandas resulto ser el sistema de tratamiento de lodos más económico para una PTAR que trata un caudal promedio 800 L s^{-1} de agua residual municipal. Con el objetivo de visualizar cómo se van incrementando los costos de un mismo tren de tratamiento de lodos cuando se incrementa la capacidad de tratamiento de la planta. En la Ilustración 15.13 se muestra un gráfico de los costos de construcción, equipamiento y operación anual de un tren de tratamiento que incluye espesamiento por gravedad en bandas con acondicionamiento químico, estabilización anaerobia y deshidratación por medio de un filtro banda con acondicionamiento químico para las tres diferentes capacidades de plantas de tratamiento de agua residual municipal que se utilizaron. En la el gráfico el número 1 corresponde a la PTAR que trata un caudal promedio de 20 L s^{-1}, el número 2 a 200 L s^{-1} y el número 3 a 800 L s^{-1}.

Tabla 15.82 Costos del acondicionamiento químico de lodos del cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Centrífuga	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	3 740 000	Pesos
Costos de personal de operación	656 000	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	74 800	Pesos por año
Costos de energía	2 700 000	Pesos por año

Tabla 15.83 Resultados de la estimación de los costos del cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Espesamiento por gravedad	Estabilización anaerobia	Centrífuga	Unidades
Costo de construcción y equipamiento	5 490 000	104 000 000	45 300 000	Pesos
Costos de personal de operación	64 000	220 000	529 000	Pesos por año
Costos de personal de mantenimiento	36 200	123 000	77 600	Pesos por año
Costos de materiales y suministros	54 900	988 000	1 820 000	Pesos por año
Costos de energía	38 500	1 550 000	1 800 000	Pesos por año
Costos de amortización	535 000	9 950 000	4 750 000	Pesos por año

Tabla 15.84 Resumen de los costos de las cuatro diferentes configuraciones propuestas para el tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Concepto de los costos	Primer tren	Segundo tren	Tercer tren	Cuarto tren
Costo de construcción y equipamiento	66 971 000	176 250 000	129 671 000.0	159 601 000
Costos totales de operación anuales y amortización	14 755 030	47 845 410	20 608 930	26 178 830
Costo total	81 726 030	224 095 410	150 279 930	185 779 830

Ilustración 15.12 Estimación de costos para trenes de tratamiento para un caudal promedio de 800 L s^{-1} como se muestra en la Tabla 15.58 (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013).

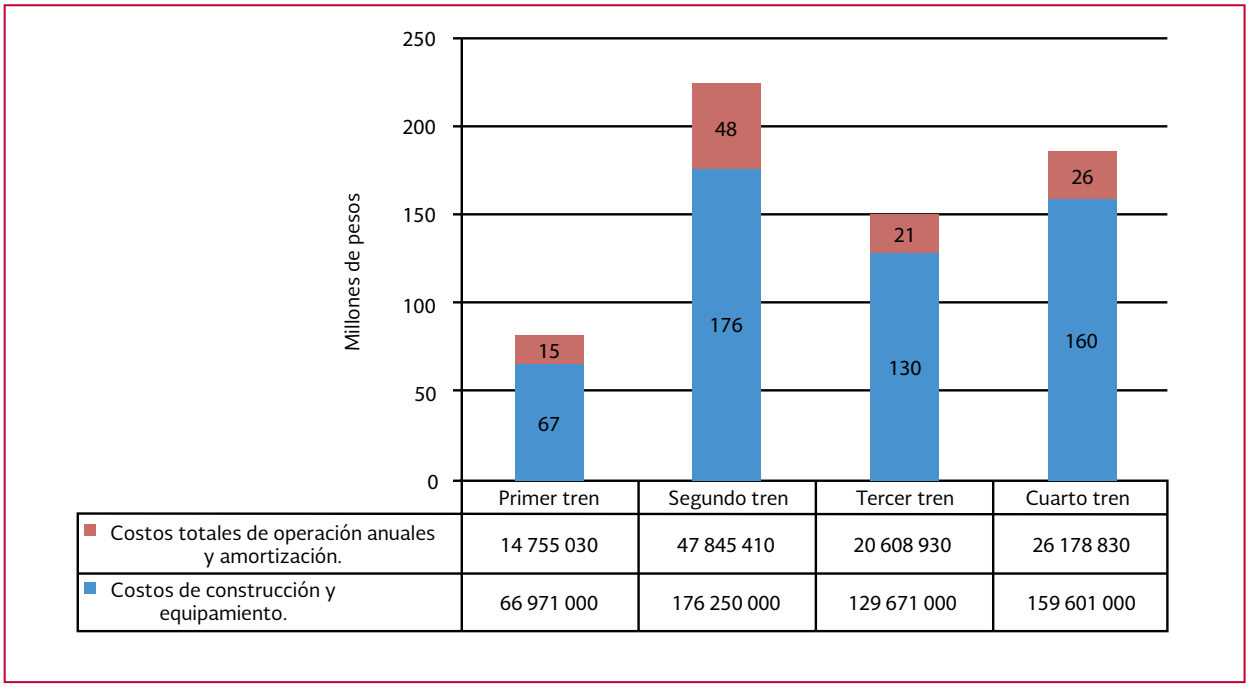
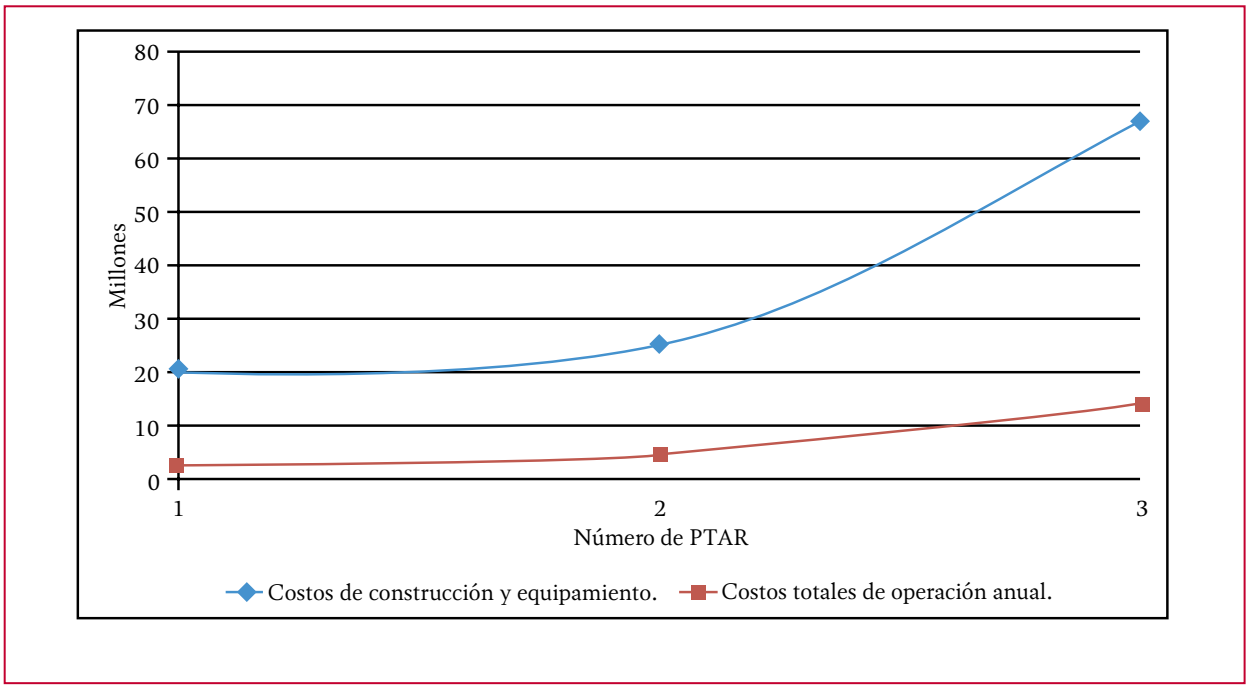


Ilustración 15.13 Gráfico comparativo de los costos de un mismo tren para las tres diferentes capacidades de plantas de tratamiento de aguas residuales (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)



15.6. Costos de los equipos

En la Tabla 15.85 se presentan los costos de algunos equipos utilizados en los diferentes trenes de tratamiento, el costo que se muestra es solamente del equipo, no incluye accesorios, tuberías, bombas ni la instalación y arranque de los equipos.

Tabla 15.85 Costos de algunos equipos de los diferentes trenes de tratamiento, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013)

Equipo	Costo, pesos
Espesador por gravedad de 27.43 m de diámetro	1 740 000
Espesador de banda de 1 m	3 000 000
Espesador de banda de 2 m	3 310 000
Unidad estándar de espesamiento por flotación con aire disuelto de 32.52 m^2	1 390 000
Para la estabilización aerobia, aireador de baja velocidad de 20 hp	260 000
Para la estabilización aerobia difusor de burbuja gruesa	390
Brazo difusor	182 000
Cubierta flotante de 31.24 m de diámetro	5 320 000
Unidad para la circulación del gas con un diámetro de 18.29 m	1 570 000
Unidad de Calentamiento 1 millón de BTU h^{-1}	662 000
Equipo de seguridad para el gas de 0.05 m de diámetro	519 000
Filtro banda de 1 m para deshidratación	3 000 000
Filtro banda de 2 m para deshidratación	3 310 000
Centrífuga de 50 hp	3 250 000

Conclusiones del libro

El libro reúne la experiencia de los últimos años en el tratamiento y disposición de lodos residuales. Es un volumen que presenta la tecnología convencional para el diseño de sistema de tratamiento de lodos residuales tomando como referencia la revisión bibliográfica actualizada del tema e incluyendo la experiencia que durante más de 20 años han adquirido los autores a lo largo de su trabajo de investigación, desarrollo y transferencia tecnológica. También se considera la experiencia de algunas plantas de tratamiento de aguas residuales del país en procesos de tratamiento y disposición de lodos, que se presentan como estudios de caso.

Después de terminar de elaborar el libro se concluye lo siguiente:

La tecnología convencional para el tratamiento y disposición de lodo se sigue utilizando actualmente para el diseño de sistemas de tratamiento.

Aunque en el país la tecnología más utilizada para la estabilización de lodos es la estabilización aerobia, la estabilización anaerobia es la que tiene un mayor desarrollo en el futuro con el fin de aprovechar el metano generado dentro del proceso para la generación de energía eléctrica que conlleva un ahorro en el costo de energía al utilizar una fuente externa.

Con el fin de proporcionar las bases para el uso y disposición segura de lodo en el suelo o en la agricultura, el libro ofrece una extensa descripción, diseño o estudios de caso de los sistemas de composteo y vermicomposteo, así como de la disposición de lodo en suelo.

También el libro hace referencia al uso del biogás como fuente de energía alternativa y ofrece una comparación de costos sobre diferentes trenes de tratamiento de lodos.

El libro es una guía que muestra la matriz de tecnología más utilizada para el tratamiento y disposición de lodos que ayudará a la persona interesada a seleccionar la más adecuada para cada caso en particular. Presenta una serie de ejemplos prácticos o estudios de caso que le ayudarán a realizar el diseño conceptual de un sistema de tratamiento y disposición de lodos.

A

Resistencia específica del lodo residual

Los lodos residuales ofrecen resistencia para la eliminación del agua. Por lo tanto se desarrolló una técnica a nivel laboratorio que permite medir la resistencia del lodo antes y después de aplicar un reactivo químico (sal inorgánica o polímero). Esta prueba es útil para la selección del reactivo y de la dosis requerida en el acondicionamiento o en la deshidratación del lodo.

A.1. Objetivo

Calcular la resistencia específica de un lodo residual después de un tratamiento de coagulación/ floculación utilizando diferentes coagulantes. Determinar la velocidad de filtración y seleccionar el coagulante que reduzca la resistencia a la filtración.

A.2. Campo de aplicación

Incluye a todos los lodos residuales de las plantas de tratamiento de agua y se aplica generalmente para reducir el volumen del lodo en el espesamiento antes de entrar a los procesos de estabilización (capítulo 6) o en la deshidratación (capítulo 12) antes de la disposición final o uso.

A.3. Definiciones

Resistencia específica.- Es una medida de la capacidad de filtración de un lodo y es numéricamente igual a la diferencia de presión requerida para producir un volumen unitario de filtrado con una determinada viscosidad o peso específico, por volumen unitario de lodo.

A.4. Fundamento teórico

Esta técnica se basa en la medición de la resistencia que ofrece un lodo residual que se ha tratado con un coagulante, para eliminar el agua por medio de la filtración al vacío.

Las variables que afectan al proceso de extracción del agua son:

- La concentración de sólidos del lodo
- La viscosidad del lodo y del filtrado
- La compresibilidad del lodo, que está relacionada con la naturaleza de las partículas.
- La composición química y física de las partículas (por ejemplo: pH, alcalinidad, carga superficial y tamaño de partícula)

La ecuación de filtración básica se deriva de la ley de Poiseille y D'Arcy's:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{PV^2}{\mu(R_{ESP}CV + AR_m)}$$

Ecuación A.1

donde:

V = Volumen del filtrado, cm^3

t = Tiempo en s

P = Presión de vacío aplicada, $g \cdot cm^{-2}$

A = Area filtrada, cm^2

C = Concentración de sólidos por unidad de volumen del filtrado, $g \cdot cm^{-3}$

R_{esp} = Resistencia específica, $s^2 \cdot g^{-1}$

R_m = Resistencia inicial del medio filtrante, $s^2 \cdot cm^{-2}$

μ = Viscosidad del filtrado, poises, g/cm s

La integración y el arreglo de esta ecuación permite el cálculo de la resistencia específica del lodo, R_{esp}. La ecuación queda:

$$\frac{t}{V} = \left(\mu \frac{CR_{ESP}}{2PA^2}\right)V + \mu \frac{R_m}{PA}$$

Ecuación A.2

Una gráfica aritmética de t / V contra V genera una relación lineal con una pendiente "b" igual a $\mu R_{esp} C/2\ PA^2$ y una intercepción con la ordenada de $\mu Rm/PA$. La pendiente queda:

$$b = \frac{\mu R_{ESP} C}{2PA^2}$$

Ecuación A.3

Y la resistencia específica es:

$$R_{ESP} = \frac{2PA^2 b}{\mu C}$$

Ecuación A.4

Los sólidos depositados por volumen del filtrado, C, son determinados por:

$$C = \frac{1}{\left[\frac{(100 - ST_i)}{ST_1}\right] - \left[\frac{(100 - ST_f}{ST_f}\right]}$$

Ecuación A.5

donde:

C = Concentración de sólidos por volumen filtrado, por ciento ó gr/ml

ST_i = Contenido de sólidos iniciales del lodo de entrada, por ciento ó gr/ml

ST_f = Contenido de sólidos finales de la torta de lodos, por ciento ó gr/ml

A.5. Equipo y materiales

Aparato para la resistencia específica, ver figura 1.

- Probeta volumétrica de vidrio de 200-250 ml. con cuello esmerilado, 29/32
- Adaptador de vidrio embudo-probeta con brazo lateral
- Embudo buchner de 9 cm de diámetro interno
- Bomba de vacío 1/4 hp (rango de presión, 10-30 pulgasdas de Hg)
- Reloj cronometro
- Caja de papel Whatman Nº 42 de 9 cm de diámetro
- Cinta masking tape
- Espátula plana y ancha con mango de madera

A.6. Condiciones para el experimento

Si la muestra no se analiza inmediatamente, se debe almacenar a 4°C para analizarse en un plazo no mayor de 1 semana. La cantidad de muestra por cada prueba es de 200 ml más 50 ml para determinar los ST(sólidos totales) iniciales. La cantidad total de muestra, depende del alcance del estudio.

Interferencias

Un periodo de almacenamiento largo puede alterar las características de coagulación de la muestra por la actividad biológica o por otros factores.

Precauciones

Verificar que el equipo este debidamente sellado en sus conexiones al realizar la filtración, ya que puede variar la presión de succión durante la filtración, la cual debe ser constante para cada muestra.

Para tener una lectura más exacta de volumen filtrado, se adhiere una cinta masking tape sobre la escala de medición de la probeta, en donde se marca el nivel del volumen del filtrado en cada intervalo de tiempo fijado.

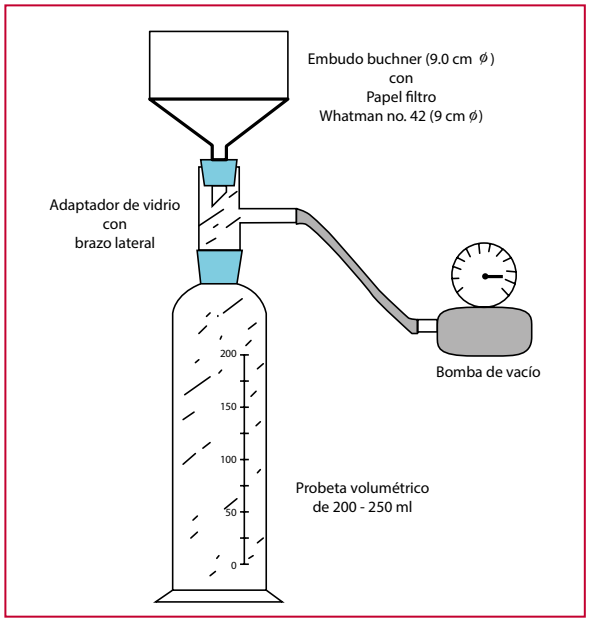
La muestra debe estar a la temperatura del área de trabajo, se recomienda que la cantidad de muestra necesaria, se lleve al área unas horas antes de iniciar la prueba.

A.7. Procedimiento experimental

Instalación del equipo de filtración

Montar el equipo de filtración como se ve en la Ilustración A.1, verificar que no haya fugas en sus conexiones.

Ilustración A.1 Equipo de filtración para determinación de la resistencia especifica de lodos



Ajustar el vacío entre 15-20 pulgadas de Hg, con los tornillos de la bomba regule la presión si es necesario.

Desarrollo de la prueba

1. De la muestra inicial separare 50 mL de lodo para determinar la cantidad de sólidos totales iniciales, (ST_i)

2. En el embudo, colocar el papel filtro, humedecerlo con agua destilada y aplicar vacío para sellarlo e inmediatamente agregar de 100 a 200 mL de la muestra al embudo buchner
3. Cuando empiece a salir el filtrado registre o marque en la cinta adherida, el volumen del filtrado en intervalos de tiempo de 30 segundos si la filtración es rápida o cada minuto si la filtración es lenta, hasta que se filtre toda la muestra.
4. Estos datos se utilizan para calcular la velocidad de filtración
5. Cuando ya no se obtenga filtrado y la torta comience a agrietarse, libere la presión. Pase la torta de lodo al papel aluminio o charola correspondiente (con ayuda de la espátula) y tome peso 1
6. Determine la concentración de sólidos totales de la torta de lodos , peso 2 (STf).
7. Repita el procedimiento 1 a 6 usando diferentes concentraciones de coagulantes o polímeros
8. Determine la resistencia específica de lodos para cada una de las muestra y selecciones las condiciones que generen la mínima resistencia específica del lodo como se muestra en la sección de cálculos

Práctica

Inicialmente se determina la resistencia específica del lodo crudo y posteriormente la resistencia específica después de aplicar diferentes dosis de polímero.

Para aplicar el polímero se realiza una prueba de jarras con las siguientes condiciones:

Mezcla rápida. 100 rpm, 1 minuto

Cálculos

Con los datos obtenidos de tiempo y volumen, se calcula t/V. Posteriormente se obtiene la pendiente "b", de la correlación lineal de t/V contra V. Dibujar t/v. vs. v.

Cálculo de los ST_f

Con los pesos obtenidos, determine el peso de la muestra húmeda y de la muestra seca y posteriormente calcule el por ciento de ST_f con las siguientes fórmulas:

Muestra húmeda o muestra seca = (Peso de la muestra húmeda o seca - Peso papel filtro - peso charola).

$$\%ST_f = \frac{Peso\ muestra\ seca\ \ (peso\ 2)}{Peso\ muestra\ húmeda\ (peso\ 1)} \text{X}\ 100$$

Ecuación A.6

Con los resultados de ST_i y ST_f obtenemos el coeficiente "C", ecuación (5) del punto 4.

Para el cálculo considerar

Viscosidad del filtrado $\mu = 0.00895$ *poises*

La resistencia específica (R_{esp}) de la muestra se calcula con la ecuación (4) del punto 4.

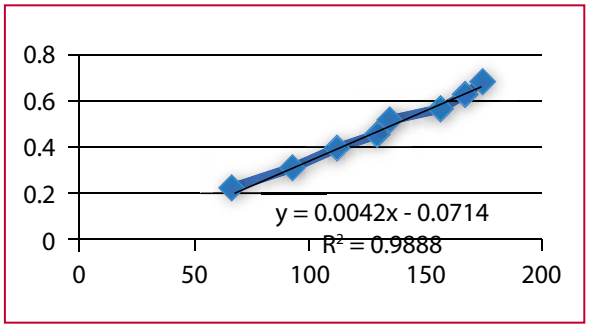
Con los cálculos de resistencia específica de cada muestra (diferentes dosis de coagulante), se puede graficar la R_{esp} vs dosis de coagulante, el valor óptimo lo determina la resistencia específica mínima.

A.8. Ejemplo de aplicación

Calcular la resistencia específica de un lodo cuya prueba en el filtro buchner dio los siguientes resultados.

t (s)	V (mL)	t/V (s/mL)
14.5	66	0.22
29.5	92	0.31
45	112	0.4
59	129	0.46
70	134	0.52
89	156	0.57
105	167	0.63
120	174	0.69

Ilustración A.2 t/v . vs. v



La pendiente de la línea es igual a b

b= 0.004 seg/cm^6

Condiciones específicas de la prueba

Área del papel filtro, A = 0 104.6 cm^2

Presión de vacío, P = 15 pulgadas de Hg = 526 g·cm^{-2}

Concentración inicial del lodo, C1 = 4.4 g/100 mL = 4.4 por ciento

Concentración final de lodo, Cf = 20 g/100 mL = 20 por ciento

Viscosidad del filtrado, μ = 0.0895 poises

Cálculo de los sólidos depositados por unidad de volumen de filtrado. Usar ecuación

$$C = \frac{1}{\left[\frac{(100 - ST_i)}{ST_i}\right] - \left[\frac{(100 - ST_f}{ST_f}\right]}$$

Ecuación A.7

C = 1/ (95.6/4.4) – (80/20) = 0.056 g mL^{-1} ó 5.6 por ciento

Calcule la resistencia específica del filtrado con la ecuación A.4.

$$R_{ESP} = \frac{2PA^2b}{\mu C}$$

Ecuación A.8

R_{esp} = 2(526)(104.6)^2(0.004)/(0.00895) (0.056)

R_{esp} = 0.92x10^6 s^2·g^{-1}

Glosario

Abiótico. Sin elementos vivos en el ambiente.

Acetogénisis. Proceso metabólico que convierte los ácidos volátiles a acetato. El sustrato primario de la metanogénesis acetoclástica.

Acidez. Sustancia que puede reaccionar con una base para formar un sal. Sustancia que puede donar un ión hidrógeno o protón

Acondicionamiento. Proceso químico, físico o biológico diseñado par mejorar las características de espesamiento o desaguado de los lodos.

Aerador. Equipo utilizado para introducir aire al agua o agua residual

Aerobio. Condición garantizada por la presencia de oxígeno libre.

Alcali. Una sustancia con propiedades básicas

Anaerobio. Condición que se caracteriza por la ausencia de oxígeno libre y otros receptores de electrones tales como nitratos y sulfatos. Como proceso anaerobio implica la presencia activa de microorganismos estrictamente anaerobios.

Anóxico. Condición garantizada por la ausencia de oxígeno libre.

Biocombustible. Un material orgánico combustible (lodo) que puede utilizarse como un sustitio de un combustible sólido.

Biodegradable. Capacidad de degradación de la materia por los microorganismos.

Biogas. Gases producidos por la estabilización anaerobia de la materia orgánica.

Bioscrubber. Un sistema de tratamiento de aire en el cual los microorganismos oxidan los contaminantes.

Biosólidos. Sólidos o lodos removidos durante el tratamiento del agua residual que han sido estabilizados y que han alcanzado los criterios de la legislación NOM-004-SEMARNAT-2002.

Co-estabilización. Un proceso en el cual dos o más tipos de sustratos se estabilizan al mismo tiempo (mismo reactor). Por ejemplo. Lodos con basura orgánica.

Composteo. Estabilización aerobia de la materia orgánica sólida por bacterias y hongos.

Criterios de diseño. Especificaciones o guías de ingeniería que específican detalles de construcción y materiales. Específicaciones que se deben cumplir al diseñar un proceso, estructura o instalación con el fin de cumplir con sus objetivos.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO). Un medida estándar que mide la materia orgánica biogedegradable contenida en el agua residual y cuantifica la cantidad de oxígeno consumida por los microorganismos dentro de un período de tiempo (típicamente 5 días a 20°C).

Densidad aparente. Relación peso-volumen para un sólido, incluyendo los poros o espacios libres en el material.

Deshidratación. Un proceso que remueve

una porción del agua contenida en los sólidos. La deshidratación se distingue del espesamiento en que el sólido resultante o torta puede manejarse como un sólido, no como un líquido.

Estabilización aerobia termofílica autotérmica. Es un proceso de estabilización aerobia en el cual los microorganismos generan sufciente calor para mantener temperaturas en el rango termofílico.

Estabilización aerobia. Proceso para la estabilización de los lodos que considera la oxidación directa de la materia orgánica biodegradable y la oxidación del material celular de los microorganismos.

Estabilización alcalina. Proceso por el cual se estabilizan los lodos por medio de la cal u otros materiales alcalinos, suministrando suficiente material para elevar el pH por encima de 12 durante 2 hojas.

Estabilización anaerobia. Proceso de estabilización de lodos operado específicamente sin oxígeno en el cual la materia orgánica alimentada se convierte a metano y dióxidos de carbono.

Estándares de diseño. Estándares establecidos para el diseño de procesos, equipos o estructuras. Esos estándares pueden ser o no obligatorios.

Lecho o cama de secado. Un área que contiene área o un material poroso donde se depositan los lodos para deshidratarse por medio de la filtración y la evaporación.

Lodo activado. Los sólidos o biomasa activa en un proceso de lodos activados.

Material acondicionador. En el composteo son los materiales adicionados al lodo para proporcionar energía, porosidad, contenido de sólidos o incrementar la relación carbono/nitrógeno.

Proceso de lodos activados. Un proceso biológico de tratamiento de agua residual en el cual una mezcla de agua residual y lodo enriquecido con microorganismos (biomasa) se mezcla y área para facilitar la degradación biológica por microorganismos.

Sólido estabilizado. Lodo o sólido en el cual la concentración de sólidos volátiles se ha reducido significativamente por medio de un proceso de estabilización (aerobio, anaerobio, químico). El material estabilizado no es putrescible, no produce olor y no atrae vectores.

Tiempo de retención. Es el tiempo teóricamente requerido para desplazar el contenido de un tanque o unidad a una velocidad de descarga determinada.

Vermicomposteo. Estabilización de la materia orgánica sólida por lombrices y bacterias.

Bibliografía

Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993. (22 de Octubres de 1993). *Que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente*. Mèxico, Mèxico: Diario Oficial de la Federación .

Alexander Martín. (1980). Intrucción a la microbiología del suelo. *AGT. Editor*, 404 - 426.

Amaravadi, L., M.S., B., & R.F. , B. (1990). Vermial virucidal Activity: Implications for Management Pthogenic Biological Wastes on Land. *Biological Wastes. Vol. 34, No. 4*, 349-358.

Anderson, A. a. (1979). A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil. Biol. Biochem*, 10:218-221.

Anderson, A., & K.H., D. (1979). A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils. *Soil. Biol. Biochem.*, 10:218-221 pp.

Anderson, P. (2008). *Trace Organic Compounds and Implications for Wastewater Treatment: Technological Brief. .* Alexandria, Virginia.: Water Environment Research Foundation.

APHA,AWWA and WEF. (2012). *Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater. 22 Ed.* APHA, AWWA, WEF.

Appelhof, M., Webster, K., & Buckerfiel, J. (1996). Vermicomposting in Australia and New Zealand. *BioCycle*, 37(6):63-64.

B. M., B. R., Q. S., P. J., & M. W. (2002). Volume reduction and biological stabilization of sludge in small sewage plants by solar drying. *Drying Technology*, 20, (4-5), 829-837. .

Bare, W.F.R, Jones, N., & Middlebrooks, E. (1975). Algae Removal Using Dissolved Air Flotation. *Journal Water Pollution Control Federation, 47*, 153.

Bates, T. A. (1975). Uptake of metals from sewage sludge amended soils. *Proceedings International Conference on Heavy Metals in the Environment, Vol. 1*, 403-416.

Beardsley, J. A. (1976). *Sludge Drying Beds Are Practical, Water and Sewage Works* (Vol. 1).

Benavides, L. (1997). Guía para el Diseño de Rellenos de Seguridad en América Latina. *CEPIS- OPS*.

Benefield Larry , D., Judkins, J. F., & Parr, A. D. (1984). *Treatment Plant Hydraulics for Environmental Engineers.* New Jersey: Prentice Hall, Inc. Englewood Cliffs.

Bollo, E. (marzo de 2001). Lombricultura una alternative de reciclaje. *Soboc Grafic, Quito, Ecuador. 2ª. Edic, ISBN-9978-40-812-6*, 149 pp.

Bolt, G. a. (1978). Soil Chemestry, A. Basic Elements. *B. Physico-chemical models. Elsevier Scientific Publishing Company. New York, U.S.A. ISBN 0444414355 (v. 1, American Elsevier)*, 264-271.

Bolt, G., M. B., & J. B. (1978). Soil Chemestry, A. Basic Elements. *B. Physico-chemical models ISBN 0444414355 (v. 1, American Elsevier)*, 264-271.

Bonilla, V., & N. T. (2008). Secado Solar de Lodos. *Tesis de Maestría.* México.: Ingeniería Ambiental. UNAM.

Bouche, M. (1972). Lombriciens De France: Ecologie et Systèmatique. *Ann. Zool., Ecol., Anim., No hors serie*, 671.

Bouche, M. (1977). Stratégies lombriciennes. *Ecol. Bull*, 25:122-132.

Brandt, R., Elliot, H., & O´Connor, G. (2002). Comparative Evaluation of Water Extractible P in Biosolids and Livestock Manures. *Proceedings of the Water Environment* .

Bratby, J., & Ambrose, W. (1995). Design and Control of Flotation Thickeners. *Water Sci. Technol., 31*(3-4), 247-261.

Burges, A. (1958). *Micro-organisms in the soil.* London.: Hutchinson & Co.

Butler, R. C., Finger, R. E., Pitts, J. F., & Strutynski, B. (1977). Adventages of Cothickening Primary and Secondary Sludges in Disolved Air Flotation Thickeners. *Water Environ. Res., 69*(3), 311-316.

C., V. N. (2008). Secado solar de lodos residuales municipales. *XXXI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.* Santiago de Chile: AIDIS.

Camp, Dresser, & McKee, I. (August de 1980). Compendium on solid Waste Management by Vermicomposting. *US EPA, Municipal Environmental Research Laboratory*. Cincinnati, OH, , USA: Technical Report No. EPA-600/8-80-033.

Canada Soil Survey Committee. (1978). The Canadian system of soil classification. *Canada Dept. of Agriculture, ISBN 0660016206 (0-660-01620-6). Canada, Ottawa*.

Canada Soil Survey Committee. (1978). The Canadian system of soil classification. *Canada Dept. of Agriculture, ISBN 0660016206 (0-660-01620-6)*.

Capistrán , F., Aranda , E., & Romero, J. (2001). Manual de Reciclaje, Compostaje y Lombricompostaje. *Instituto de Ecología, A.C. 1era. Ed., 1era. Reimp*, 151 p, v, 80 a 138 pp.

Cardoso V, L. E.-Z. (2008). Vermicomposting technology for stabilizing the sewage sludge from rural wastewater treatment plants. *Water Practice and Technology. Vol 3. Issue 1*.

Cardoso V., L. y. (2006). Biodegradación de desechos de curtiduría y lodo residual por composteo y vermicomposteo. *Ingeniería Hidráulica en México. Vol 21, N° 2*.

Cardoso V., L., & Ramírez C. , E. (25-27 de October de 2001). Vermicomposting of Sewage Sludge: A New Technology for México. *Specialised Conference on Sludge Management: regulation, treatment, utilization and disposal*. Acapulco, Mexico.

Cardoso V., L., & Ramírez C., E. (3 al 8 de Diciembre de 2000). Vermiestabilización de Lodos Residuales. *XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Puerto Alegre, Brasil: AIDIS y ABES.

Cardoso V., L., Ramírez C., E., Escalante E., V., & Moeller , C. G. (Diciembre de 1999). Criterios y especificaciones técnicas para

la disposición o uso de lodos residuales de plantas de tratamiento municipales: Parte III Alternativas de solución al tratamiento y aprovechamiento de los lodos residuales y lirio acuático por vermicomposteo. *Proyecto TC-9911, contratado por la Subdirección General de Construcción, Gerencia de Proyectos de Agua Potable y Saneamiento de la Comisión Nacional del Agua*. Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Cardoso V., L., Ramírez C., E., & Rivas H., A. (2000). *Instalación de un sistema de vermiestabilización a escala real en una planta de tratamiento municipal.* Informe final del Proyecto Contratado por Comisión Nacional del Agua al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Cardoso V., L., Ramírez C., E., Garzón Zúñiga, M., Chacón, J., & Paredes, J. (24-27 de June de 2007). Treatments techniques for the biosolids production in the petrochemical industry. *IWA Specialist Conference. Conference Proceedings,Moving Forward: Wastewater biosólidos sustainability: Technical, managerial and public synergy*. Moncton, New Brunswick, Canadá: R.J. LeBlanc, P.J. Laughton and R. Tyagi.

Cardoso V., L., Ramírez C., E., Lugo V., N., & Figueroa C., O. (1999). *Alternativas de solución al tratamiento y aprovechamiento de lodos residuales y lirio acuático por vermicomposteo*. Informe final del Proyecto Contratado por Comisión Nacional del Agua al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Cardoso Vigueros, L., Ramìrez Camperos , E., Mijaylova Nacheva, P., López A., S., & Moeller C., G. (1996). *Alternativas de tratamiento y reúso de lodos residuales*.

Cardoso vigueros, L., Ramìrez Camperos, E., Mijaylova Nacheva, P., López A., S., & Moeller Chàvez, G. (1996). *Alternativas de tratamiento y reúso de lodos residuales*.

Cardoso, L., & E. Ramírez., M. G.-Z. (2007). Treatment techniques for the biosolids production in the petrochemical industry. *Wastewater biosolid sustainability. Technical Managerial and Public SYNERGY. IWA Conference*. Moncton, Canada: IWA.

Cardoso, V. L. (2003). Vermicomposting of sewage sludge: a new technology for México. *Water Science and Technology. V 46, N°10*, 153-158.

Chaney, & R.L. (1973). Crop and food-chain effects of toxic elements in sludges and effluents. *In Proc., Jt. Conf. Recycling Municipal Sludges and Effluents on Lands. Nat. Assoc. St., Univ. and Land Grant Coll*, 129-141.

Chaney, & R.L. (1978). Heavy metal limitation in use of sludge and sludge compost on cropland. In Conf. Sludge Mangt. *Alternatives: What win we do after the 1981 ocean disposal ban? Proc*, 54-59, 115-127.

Chaney, & R.L. (1983). Potential effects of waste constituents on the food chain. *In: J.F. Parr, P.B. Marsh, and J.M. Kla (eds.). Land Treatment of Hazardous Wastes. Noyes Data Corp., Park Ridge, N.J.*

Chaney, R. (1978). Heavy metal limitation in use of sludge and sludge compost on cropland. In Conf. Sludge Mangt. Alternatives: What win we do after the 1981 ocean disposal ban? *Scientists Com*, 54-59, 115-127.

Chaney, R., G. B., B. D., G. E., & J. D. (1980). Health risks associated with toxic metals in municipal sludge. *sludge-health risks of land application. Ann Arbor Sci*, 57-58 pp.

Chaney, R.L. (1980). Health risks associated with toxic metals in municipal sludge. *In:*

G. Bitton, B.L. Damron, G.T. Edds., J.M. Davidson (eds.) sludge-health risks of land application. Ann Arbor Sci. Pub. Michigan, USA., 57-58.

Charles., D. (1882). *The formation of vegetable mould, through the action of worms, with observations on their habits.* Obtenido de http://darwin-online.org.uk/EditorialIntroductions/Freeman_VegetableMouldandWorms.html.

Chernicharo de Lemos, C. A. (2007). *Anaerobic Reactors. IWA, 1 edition. ISBN:1843391643.*

Chosson , J., & Dupuy, P. (1983). Improvement of the Cellulolytic Activity of a Natural Population of Aerobic Bacteria-Enrichment Culture, Isolation and Characterization of Worm Gut and Compost Cellulolytic Strains. *European Journal of Applied Microbiologý and Biotechnology, Vol. 18, No. 3,* , 163-167.

Code of Federal Regulations. (s.f.). *Title 40 Protection of Environment Chapter 1—Environmental Protection Agency*. Obtenido de Subchapter O—Sewage Sludge. Part 503 Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge: http://www.washingtonwatchdog.org/documents/cfr/title40/part503.html#503.1

Collier, J., & D. L. (1982). Conversion of Municipal Wastewater Treatment Plant Residual Sludges into Earthworm Castings for Use as Topsoil, Nacional Science Foundation. *Technical Report No. NSF/CEE-81008*, 43.

Conagua. (2012). *Estadísticas del agua en México.* México, D.F.: SEMARNAT.

Conagua. (Diciembre de 2012). *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratameinto de aguas residuales en operación.* México, D.F.: SEMARNAT.

Conagua. (2013). Comisión Nacional del Agua. México.

Constantino Costantinidis. (1970). *Bonifica ed Irrigazione*. Obtenido de Edagricole. Bologna: http://es.wikipedia.org/wiki/Porosidad_del_suelo

Contreras S. , M., Álvarez-Bernal, D., & Luc Dendoove. (24 al 26 de Mayo de 2006). Remediación de suelos contaminados con hidrocarburos usando lombrices. *XV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales*. Guadalajara, México.

Council for Agricultural Science and Technology. (1980). Effects of sewage sludge on the cadmium and zinc content of crops. *Council Agr. Sci. and Tech.*, 83, 77.

Council for Agricultural Science and Technology. (1980). Effects of sewage sludge on the cadmium and zinc content of crops. *Council Agr. Sci. and Tech.*, 83, 77 .

Couteux, M., Mousseau, M., Célérier, M., & Bottner, P. (1991). *Increased atmospheric CO2 and litter quality: decomposition of sweet chestnut leaf with animal food webs of different complexities. .* Oikos 61.

Crespo Pichardo, G. (2008). (C. t. Programa, Ed.) Recuperado el 14 de Febrero de 2008, de http://www.cm.colpos.mx/meteoro/progde/textu/index.htm.

Cueva Estrada, M. M., & Salazar Benitez, P. X. (2000). *Proyecto de lombricultura en la provincia de Santa Elena para promover el cultivo de productos agrícolas con sello verde en base a lombricompuesto.* Guayaquil, Ecuador.: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Instituto de Ciencias Humanísticas y Económicas.

D. L., Mackenzie, David A., & Cornwell. (1992). *Introduction to Environmental Engineering*. McGrawHill.

Dante, L., & Haggblom., M. (june de 1999). Earthworm Egg Capsules as Vectors for the Environmental Introduction of Biodegradative Bacteria. *Applied and Environmental Microbiology, Vol. 65, no. 6.*, 2376-2381.

Davis L., M. a. (1992). *Introduction to Environmental Engineering*. McGrawHill.

De Koning, H., Cantanhede, A., & Benavides , L. (1994). Desechos Peligrosos y Salud en América Latina y el Caribe. Washington DC: Organización Panamericana de la Salud.

Dichtl , N., Rogge, S., & Bauerfeld, K. (2007). Novel strategies in sewaga sludge treatment. *Clean 35*, 473-479.

Dickson, N., T. Richard, & Kozlowski, R. (1991). Composting to reduce the waste stream: a guide to small scale food and yard waste composting. *Natural Resource, Agriculture, and Engineering Service (NRAES), Publication No. 43*, 44.

Difilippo, J. D., Malina, & J. F. (1968). Compactión of Size Reduced Refuse. *Center for research in water resources*. Austin, Texas.: The university of Texas civil engineering department of environmental health engineering research laboratory.

Donovan, J. (1981). *Engineering Assesment of Vermicomposting Municipal Wastewater Sludges*. Cincinnati, OH: United States Environmental Protection Agency. Municipal Research Laboratory, EPA-600S2-81-075.

E. Ramírez C., S. L. (2000). Transformaciones en la digestión alcalina de lodos residuales municipales. *Memoras del XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Porto Alegre, Brasil: AIDIS.

E. Ramírez Camperos, L. C. (1994). Criterios de diseño para un sistema de composteo de lodos residuales. *Ingeniería Ambiental. N° 25*.

Eastman Bruce , R., Philip, N. K., Clive, A. E., Trytek, L., Bintoro Gunadi, L. Stermer, A., & R. Mobley, J. (2001). The Effectiveness of Vermiculture in Human Pathogen Reduction for USEPA Biosolids Stabilization. *Compost Science & Utilization, Vol. 9, No. 1*, 38-49.

Eastman, B. R. (1999). Achieving Pathogen Stabilization Using Vermicomposting . *BioCycle. Vol. 40 No. 11*.

EL and IEEP (Eco Logic and Institute for European Environmental Policy). (2009). *Report on the implementation of the Sewage Sludge Directive 86/278/EEC*. Obtenido de <http://ec.europa.eu/environment/waste/reporting/pdf/Sewage por ciento20sludge_Directive.pdf/>.

Environmental Protection Agency. (3 de August de 1988). Analytical Method for the National Sewage Sludge Survey. *Office of Water Regulations and Standars (WH-522), Industrial Technology Division*, 3-115 pp. USEPA.

Environmental Protection Agency. (1988b). Guidance for Writing Case-byCase Permit Requirements for Municipal Sewage Sludge. *DRAFT. USEPA, Washington,*, 30, 41, 36, 74 y 118.

Environmental Protection Agency, EPA. (1979). *Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal* . US: Center for Environmental Research Information Technology Transfer.

Environmental Protection Agency. (1986). Land Application of Municipal Sludge. *EPA-625/1-83-016. Cincinnati, OH*, A-1.

EPRI. (1998). *Mechanical Freeze Thaw of Water and Wastewater Residuals*. Status Report, TR-112063, Electric Power Research Institute, Palo alto, CA.

Epstein, E., J.M., T., & R. C. (1976). Effects of Sewage Sludge and Sludge Compost Applied Soil on Some Physical and Chemical Properties. J. *Environ Qual*, 5:422-426.

Farrell, J.R., J.E. Smith, and S.W. Hathway. (1974). Lime Stabilization of Primary Sludges. *JWPCF. Vol 46,*, p 113.

Flottweg SE. (2013). *Flottweg, Separation Technology*. Germany.

Foust, A. (1990). *Principios de operaciones unitarias* (Primera ed.). México: CECSA.

Fytili, D., & Zabaniotou, A. (2008). Utilization of sewage sludge in EU application of old and new methods: a review. *Renewable & Sustainable Energy Review* , 12, 116–140.

G. R., H. C., H. G., & U. I. (1997). Regrowth of faecal coliforms and salmonellae in stored biosolids and soil amended with biosolids. *Water Science Technology*, 35, (11-12), 269-275. .

Garelli, B. A., Swartz, B. J., & Dring, R. W. (1992). Improved Centrifuge Dewatering by Steam and Carbon Dioxide Injection. *Water Environment & Technplogy*, *4*(6).

Geotechnical Special Publication No.26. (1990). Waste Containment Systems. Rudolph Bonaparte.

Gray, K., K. S., & A. B. (1971). A review of composting-Part 1. *Process Biochem*, 6:32-36.

Greater Moncton Sewarage Commission and UN-HABITAT. (2008). *Global atlas of exreta, wastewater sludge, and biosolids management:moving forward the sustainable and welcome uses of a flobal resource*. Moncton: ISBN:978-92-1-132009-1.

Greater Moncton Sewerage Commission. (s.f.). *http://www.gmsc.nb*. Obtenido de http://www.gmsc.nb.ca/compost/overview

Guillermo, C. P. (02 de Febrero de 2008). *Clase textural version 1.0.0.1. Copyright* . Obtenido de http://www.cm.colpos.mx/meteoro/progde/textu/index.htm.

H. J. (1963). Chemistry of micronutrients in solids. *Adv. Agron.*, 15, 119-159.

Harrison, J. R. (October de 1978). Developments in Dewatering Wastewater Sludges. *Sludge Treatment and Disposal.* .

Harsterstein, R., Neuchauser, E., & Kaplan , D. (1979). Reproductive potential of the earthworm Eisenia foetida. *Oecologia 43*, 329-340.

Hartenstein, R. (1981). *Utilization of Earthworms and Microorganisms in Stabilization, Decontamination and Detoxification of Residual Sludges from Treatment of Wastewater, National Science Foundation* (Vols. Vol. 80, No. 5). Washington, DC, USA: Water Pollution Control.

Hartenstein, R., D.L., K., & E.F., N. (1984). Earthworms and Trickling Filters for Wastewater Treatment. *Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 56, No. 3, Part 1*, 294-298.

Haug, , R. (1993). *The practical handbook of Compost Engineering*. Lewis Publishe, Boca Ratón.

Haug, R., Stuckey, D., Gosset, J., & Mc Carty, P. (1978). *Effect of Thermal Pretreatment on Digestibility and Dawaterability of Organic Sludges*. Journal of WPCF.

Horn S. (2003). Accelerated Air-Drying Of Sewage Sludge Using a Climate-Controlled Solar Drying Hall.

Hornor, S., & M.J. , M. (1981). Effect of the Earthworm, Eisenia foetida (Oligochaeta),

on Fluxes of Volatile Carbon and Sulfur Compounds from Sewage Sludge. *Soil Biology and Biochemistry, Vol. 13, No. 5*, 367-373.

Hydromantis-Software CapdetWorks. (2013). Software for the Preliminary Desing and Costing of Wastewater Treatment Systems. Hamilton, Ontario, Canada.

Imhoff, K., & G.M., F. (1959). *Sewage Treatment*. New York: John Wiley and Sons.

Ingham, R., Trofymov, J., Ingham, E., & Colema, D. (1985). Interactions of bacteria, fungi and their nematode grazers: effects on nutrient cycling and plant growth. . *Ecol. Monogr. 55*, 119-140.

Jannett, J. C., & Santry, I. W. (1969). Characteristics of Sludge Drying. *Journal of the Sanitary Engineering Division ASCE. SA, 5*, 849.

Jiménez Cisneros, B., Maya Rendon, C., & Salgado Velasquez, G. (2001). The elimination of helminth ova, faecal coliforms, salmonella and protozoan cysts by various physicochemical processes in wastewater and sludge. *Water Science Technology*, 43, 179-182. .

Jones , C., Lawton , J., & Shachak , M. (1997). Positive and negative effects of organisms as physical ecosystem engineers. *Ecology* , 78: 1946-1957.

Jones, C., Lawton , J., & Shachak , M. (1994). Organisms as ecosystem engineers. *Oikos* , 69: 373-386. .

Kaplan , D., Hartenstein , R., & Neuhauser , E. (1980). Physicochemical requirements in the environment of the earthworm Eisenia foetida. *Soil Biol. Biochem*, 12:347-352.

Kelessidis, A. A., & Stasinakis. (2012). Comparative study of the methods used for treatment and final disposal of sewage sludge in European countries. *Waste Management 32 (2012)*, 1186–1195.

Kendorf, H. a. (1980). . Sorption of Metals on Humics Acid. Geochem. *Cosmochim. Acta 44*, 1701-1708.

Kinniburg,, D., Jackson, M., & J.K. , S. (1976). Adsorption of alkaline earth, transition, and heavy metals by hidrous gels of iron and aluminum. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 40:796-799.

Kinninburg, D. M. (1976). Adsorption of alkaline earth, transition, and heavy metals by hidrous gels of iron and aluminum. *Soil. Sci. Soc. Amer. J*, 40:796-799.

Komline, T. (1976). Flotation for Water and Wastewater Treatment. *Proceedings of the Water Research Centre Conference*.

Kreit, F. (1965). *1965* (Primera ed.). México: CECSA.

ksb. (s.f.). *http://www.ksb.com*. Obtenido de http://www.ksb.com/ksb-us/Products_and_Services/waste_water/municipal_waste_water_treatment/municipal_waste_water_treatment

Lang, M., & Jager, P. (1992). Odor control for municipal sludge composting. *bioCycle V33, N°8*.

Lankford Perry, W., Eckenfelder, & J. W. (1990). Toxicity Reduction in Industrial Efluents. New York.: Van Nostrand Reinhold.

Lattes, E. L. (1990). *Tratado Elemental de Hidráulica*. Cuernavaca, Mor: CNA, IMTA, Coordinación de Investigación.

Lavelle , P., Blanchart , E., Martin, A., Martin, S., Spain , A., Toutain, F., . . . Schaefer, R. (1993). A hierarchal model for decomposition in terrestrial ecosystem: application to soil of the humid tropics. *Biotropica 25(2*, 130-150.

Lavelle, P. (1996). Diversity of soil fauna and ecosystem function. *Biol. Int.*, 33:3-16.

Lavelle, P. (1997). Faunal activities and soil processes: adaptive strategies that determine ecosystem function. *Adv. Ecol. Res*, 27:93-132.

Lavelle, P. (s.f.). The structure of earthworm communities. In: Earthworm Ecology. *J. Satchell. Chapman and Hall,*, 449-466.

Lavelle, P., Barois, I., Martin, A., Zaidi, Z., & Schaefer, R. (1989). Management of earthworms populations in agroecosystems: a possible way to maintain soil quality. *En Clarholm, M., Bergström, L. eds. Ecology of arable land. Kluber Academic Publishers*, 109-122.

Legall , J., Dicovskiy, L., & Valenzuela, Z. (2004). *Manual básico de lombricultura para condiciones tropicales.* Obtenido de http://usuarios.arnet.com.ar/mmorra/libro2.htm.

Leson, G., & otros. (1992). Biological removal of hydrogen sulfide from biogas. *Proc. 84 annual meeting air waste management*. Vancouver.

Lester, N. (1987a). Heavy metals in wastewater and sludge treatment process. . *Vol. I. Sources Analysis and legislation. CRC Press, Florida.*

Lill JT, M. R. (2003). Ecosystem engineering by caterpillars increases insect herbivore diversity on white oak. *Ecology 84*, 682-690.

Loehr , R., E.F, N., & M.R., M. (1985.). Factor Affecting the Vermistabilization Process: Temperature, Moisture Content and Polyculture. *Water Research, Vol. 19, No. 10*, 1311-1317.

Loehr , R., J.H. , M., E.F. , N., & M.R, M. (1984). *Waste Management Using Earthworms: Engineering and Scientific Relationships*. Washington, DC: National Science Foundation, Technical Report No. NSF/CEE-84007.

Loehr, R., J.H. , M., & E.F., N. (July de 1985). Liquid Sludge Stabilization Using Vermistabilization. *Journal of Water Pollution Control Federation, Vol. 57, No. 7,*, 817-826.

Lue-Hing, C., L., D. Z., & R. K. (1992). Municipal Sewage Sludge Management. Processing, Utilization and Disposal. (L. Technomic Publishing, Ed.) *Water Quality Management Library. V4*.

Malina, J., & Pohland, F. (1992). *Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes. Water Quality Management Library Vol. 7. Technomic. 214 p.*

Mark , J. H. (1977). *Water and Waste – Water Technology.* New York: Jhon Wiley & Sons, Inc.

Martín, A. (1980). *Intrucción a la microbiología del suelo.* AGT. Editor, S.A.

Martin, J. a. (1977). Biological Properties of Soil. In. L.F. Elliot and F.J. Stevenson (eds.) Soils for Management of Organic Wastes and Wastes Waters. *American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.*

Mataix, C. (1972). *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulica.* México D.F: Harper & Row Publishers Inc; Harla, S.A.

Messenger JR, H. d. (1993). Evaluation of the dual digestion system: par 1: Overview of the Milnerton experience. *Water SA Vol 19 N° 3*, 185-191.

Metcalf & Eddy. (2006). *Wastewater Engineering. "Treatment and Reuse".* New York.: Mac Graw Hill.

Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering Treatment and Reuso* (4ta ed.). US: MacGrawHill.

Metcalf, & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse. 4th edition. McGraw Hill, New York. ISBN: 0-07-041878-0.*

Mijaylova Nacheva Petia, G. M. (2003). Characterization and dewaterability of raw and stabilizaed sludge using differente treatment methods. *Water Science and Technology V 46, N° 10*, 123-130.

Mijaylova Nacheva, P. (1999). *Curso Teórico Práctico para el Tratamiento de Lodos Residuales*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua, México.

Mijaylova Nacheva, P., & G. Moeller, E. R. (2007). Comparison of sewage sludge tretament systems for regions of hot climate. *Water Practice and Technology. Vol 21. N° 1.*

Milieu Ltd., WRc and Risk & Policy Analysts Ltd (RPA). (2010). *Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land.* Obtenido de Final Report,Part III: Project Interim Reports, DG ENV.G.4/ETU/2008/0076r,10.2.2010: Http://ec.europa.eu/environment/waste/sludge/pdf/part_iii_report.pdf

Mitchell, M., Mulligan, R., Hartenstein, R., & Neuhauser, E. (1977). Conversion of sludges into "topsoils" by earthworms. *Compost Science* , 18, 28-32.

Mitchell, M., S.G., H., & B.I., A. (July de 1980). Decomposition of Sewage Sludge in Drying Beds and the Potential Role of the Earthworm, Eisenia foetida. *Journal of Environmental Quality, Vol. 9, No. 3,*, 373-378.

Moreno, A. G., De Mischis , C., & Tesaire, E. (2002.). *Curso de Taxonomía de Oligoquetos, Anatomía Externa.* Obtenido de http://www.ucm.es/info/tropico/investigacion/grupodetaxonomia/Cursos/externa/setas.PDF

Moss, L. H., & Donovan, J. F. (2013). *Enabling the Future: Advancing Resource Recovery from Biosolids.* Obtenido de Water Environment Federation: http://wef.org/biosolids/.

Murthy, S., & Novak, J. (2001). *Pesonal communication.*

Myers, P. (06 de October de 2001). *"Annelida" (On-line), Animal Diversity Web.* Obtenido de http://animaldiversity.ummz.umich.edu/site/accounts/information/Annelida.html.

NCASI. (1978). A Review of the Operational Experience With Belt Filter Presses for Sludge in the North American Pulp and Paper Industry. *Prepared for National Council of the Paper Indsutry for Air and Stream Improvement, Technical Bulletin 315.*

NMX-FF-109-SCFI-2008, D. N. (10 de junio de 2008). Establece las especificaciones de calidad que debe cumplir el humus de lombriz que se produce o se comercializa en territorio nacional. *Diario Oficial de la Federación*. México.

Noland, R., & Dickerson, R. (1978). *Thickening of Sludge. US, EPA Technology Transfer Seminar on Sludge Treatment and Disposal.* (Vol. 1). Cincinnati, Ohio: Technology Transfer.

Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT. (15 de Agosto de 2002). Lodos y biosólidos, especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Mèxico, Mèxico: Diario Oficial de la Federación.

Norma Oficial Mexicana NOM-052. (23 de Junio de 2005). SEMARNAT. Mèxico,

Mèxico: Diario Oficial de la Federación.

Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT. (23 de Junio de 2005). Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Mèxico, Mèxico: Diario Oficial de la Federación.

Norma oficial mexicana, NOM-053-SEMARNAT. (Abril de 2003). Que establece el procedimiento para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. México: Diario Oficial de la Federación.

North East Biosolids and Residual Association. (2007). *A National Biosolids Regulation, Quality, End Use and Disposal Surver, Final Report*. Obtenido de North East Biosolids and Residual Association: Tamworth, New Hampshire: http://www.nebiosolids.org

OMOE/OMAF. (1981). Ontario Ministry of Agriculture and Food/Ontario Ministry of the Environment. *Guidelines for Sewage Sludge Utilization on Agricultural Lands*.

Ortíz, V. y. (1987). *Edafología. 7ª.* . Chapingo, México.: Ed. UACH.

Page, A. T. (1983). Proceedings of the 1983 Workshop on Utilization of Municipal Wastewater and Sludge on Land. USEPA, U.S. Army Corps of Engineers, USDA. *Cooperative State Research Service National Science Foundation and University of California-Kearney Foundation of Soil Science.*

Pan American Health Organization, W. H. (1989). Health and Environmental Criteria for the Utilization on Sewage Sludge on Land. *PAHO. WHO, and EHP, Washington, D.C., Series No. 8*.

Parker, P. J., Collins, A. G., & DeWolfe, J. R. (200). Freeze Thaw Residuals Conditioning. *Journal American Water Works Association, 92*(4).

Pelczar, M. J. (1991). *Microbiología. (2a. ed. en español)*. McGraw-Hill.

Pepper, I. C. (1996). *Pollution in the twenty First Century. In Pollution Science*. San Diego: Academic Press.

Perry , D., & Chilton , C. (1982). *Manual del Ingeniero Químico*. México.: Mc Graw Hill.

Pineda Rodríguez , J. A. (2006). *Lombricultura. Instituto Hondureño del Café. Gerencia Técnica*. Dirección de Generación de Tecnología.

Poincelot, R. (1975). The Biochemistry and Methodology of Composting. *Conn. Agric. Exp. Sta. Bull. No. 754*, 18.

Potash and Phosphate Institute. (1979). Soil Fertility Manual. *Reprinted by permission of the Potach and Phosphate Institute, Atlanta, GA for Hach Company.*, 10.

Qasim, S. R. (1999). *Wastewater Treatment Plants Planning, Design and Operation* (2da ed.). Texas, Estados Unidos de América: Technomic.

R. L. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA. *Agricultural Handbook No. 60 U.S. Department of Washington D.C. USA*.

R., H. (1982). Metabolic parameters of the Earthworms Eisenia foetida in relation to Temperature. *Biotechnology and Bioengineering, Vol. XXIV*, 1803-1811.

Ramalho, R. S. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. España: Reverte.

Ramirez Camperos, E., Cardoso Vigueros, L., Moeller Chávez, G., & Escalante Estrada , V. (1999). *Criterios para el diseño de rellenos sanitarios de lodos.* Jiutepec, Mor.:

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Comisión Nacional del Agua.

Ramírez Camperos, E., Lina, C. V., & Socorro, L. A. (1989). *Composteo en pila estática desarrollo experimental. Proyecto AR89-02.* Jiutepec, Morelos: IMTA.

Ramírez Camperos, E., Vigueros, L. C., & Armenta, S. L. (1991). *Manual para el composteo de lodos residuales.* Jiutec,Morelos: IMTA.

Ramírez Esperanza, L. C., & Mijaylova, S. L. (1997). Pollutant reduction during sewage sludge composting. *Proceedings of international conference on sludge management*. Czestochowa, Polonia: 1997.

Ramírez González, A. (1996). Hidráulica aplicada al proyecto de plantas de tratamiento de aguas residuales. *Tesis de Maestría en Ingeniería Ambiental* . UNAM.

Ramírez, E., Cardoso, L., & López, S. y. (1991). *Estudio de factibilidad para el montaje de un sistema de composteo. Informe interno.* Jiutepec, Morlos: IMTA.

Ramírez, E., Cardoso, L., & López, S. y. (1993). Tratamiento y disposición de lodos residuales municipales. *Biotecnología. ISSN 0188-4786. V.3*, 73-81.

Recommended Standards for Sewage Works. (1971). *Recommended Standards for Sewage Works.* Great lakes/Upper Mississippi River Board of State Sanitary Engineers.

Reyes García Carolina, L. M. (2008). México. En G. M. UN-HABITAT, *Global aatlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management:moving forward the sustainable and welcome uses of a global resoursce.* ISBN:978-92-1-132009-1.

Richards, L. (1998). *Suelos salinos y sódicos.* México: LIMUSA.

Rife, J. C., & Carayon, A. M. (2010). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, WEF, ASCE y EWRI.* US, Virginia: MacGrawHill.

Rodale, J.I. y Staff of Organic Gardening and Farming. (1971). *The Complete Book of Composting.* . Pasadena, California, E.U. : Rodale Press. Emmaus.

S., H., K., B., J. , M., & M., B. (2005). *Accelerated Air drying of Sewage Sludge using a Climate-Controlled Solar Drying Hall.* Germany: Brisbane Water -University of Hohenheim, Stuttgart.

Salazar, C. (s.f.). *La huerta orgánica en la escuela.* Obtenido de http://www.galeon.com/alas/numero02/lombricultura.htm.

Sandoval Yoval, L. (2000). Biofiltración una nueva opción tecnológica para eliminar emisiones contaminantes a la atmósfera. En IMTA, *Curso teórico práctica de tratamiento de lodos residuales.* Jiutepec, Morelos: IMTA.

Santaelises Soriano , M. (Mayo de 2010). *Morfología de la Lombriz*. Obtenido de Lombricultura Pachamama: http://www.lombricultura.cl/lombricultura.cl/userfiles/file/biblioteca/lombriz/MORFOLOGIA por ciento20DE por ciento20LA por ciento20LOMBRIZ.pdf.

Schuldt, M. (2004). *Lombricultura fácil.* Buenos Aires, Argentina. : Work Graf, S.R.L, ISBN 987-43-7070-X.

Schuldt, M., A. , R., Gutierrez, D., Gregoric, J., Bodnar, N., Revora, V., . . . J., V. (Octubre de 2001). Crecimiento, madurez sexual y potencial reproductor de Eisenia foetida (Annelida, Lumbricidae) con scrap de arroz, estiércol de conejo y residuos domiciliarios. 11a. *Jornada Nacional de Lombricultura; Gral. Cabrera*. Córdoba.

Schuldt, M., Rumi, A., Guarrera,, l., & Belaustegui, P. (1998). Programación de muestreos de Eisenia foetida (Annelida, lumbricidae). *Adecuación a diferentes alternativas de manejo.*

Schuldt, T., & Ross., D. (s.f.). *Curso de lombricultura*. Obtenido de www.manualdelombricultura.com.

Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología. (s.f.). Manual de Rellenos Sanitarios. Dirección General de Contaminación Ambiental.

Seginer, I., & M., B. (2005). Prediction of evaporation rate in a solar dryer for sewage sludge. *Agricultura Engineering International: the CIGRE journal. Manuscruipt EE 05 009. Vol VII.*

Service., U.S.D.A. Sóil Conservation. (1971). National Engineering Handbook. *U.S. Govt. Printing Office, Washington, D.C.*

SMISA. (1992). Ingeniería Ambiental. *Revista año 1992, N°. 14, SMISA, A.C.*, 22.

Sociedad Mexicana de Mecánica A. C. (1991). Geotecnia y Medio Ambiente. *Simposio*. Auditorio de Colegio de Ingenieros Civiles de México.

Spinosa, L. (2007). Status and perspective of sludge management. *Conference Proceeding. IWA Specialist Conference Moving Forward Wastewater Biosolids Sustainability.* New Brunswick, Canada.: Technical Managerial, and Public Synergy.

Stafford, E.A. and C.A. Edwards. (January de 1986). Comparision of Heavy Metal Uptake by Eisenia foetida with that of Other Common Earthworms. *US. Department of Commerce, National Technical Information Service*. Springfield, USA: Technical Report No. AD-A164-779/Q/XAB.

Stevenson, F. (1972). Humus Chemestry, Genesis, Composition and Reactions. . *John Wiley and Sons, New York*, 443.

T.L. , R., & Trautmann,. (1998). *C/N Ratio. Cornell Waste Management Institute* . Obtenido de Dept of Crop and Soil Sciences. Cornell University.In: http://cwmi.css.cornell.edu/composting.htm.

Thermo-System. (Septiembre de 2013). *http://www.thermo-system.com*. Obtenido de http://www.thermo-system.com/es/productos/secado-solar-de-lodos/

Topaç F. O. (2006). Efficiencies of the open-sun and the covered sludge drying beds for the microbial stabilization of municipal sludge. *AIDIS*, 639-646.

Tsukanoto, J., & Watanabe, H. (1977). Influence of temperature on hatching and growth of Eisenia foetida (Oligochaeta: Lumbricidae). *Pedobiología*, 17:338-342.

United States Environmental Protection Agency. (1978). Process Design Manual Municipal Sludge . *Landfills. EPA-625/1-78-010 SW-705. U.S. Environmental Protection Agency.*

United States Environmental Protection Agency. (1995). "Process Design Manual" Land Application of Sewage Sludge and Domestic Septage. *Land Application of Sewage Sludge and Domestic Septage. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development*.

United States Environmental Protection Agency. (1995). Process Design Manual"Surface Disposal of Sewage Sludge and Domestic Septage. *EPA/625/R-95/002, U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development*.

United States, Environmental Protection Agency. (1984). *"Environmental Regulations and Technology"* . Washington DC 20460: Use and Disposal of Municipal Wastewater Sludge. EPA.

United States, Environmental Protection Agency. (1989). *"Environmental Regulations and Technology", control of pathogens in municipal wastewater sludge.* Cincinnati, OH 45268: EPA/625/10-89/006.

US EPA. (1978). Sludge treatment and disposal. Vol 1 y 2. EPA-625/4-78012. *Environmental Research Information Center*.

US EPA. (1979). Process design manual for sludge treatment and disposal. *EPA 625/79-011. Center for environmental research information. Technology transfer*.

US EPA. (1990). *Autothermal thermophilic aerobic digestion of municipal wastewater sludge.* Cincinnati, OH: US EPA.

US, EPA. (1978). *Operations Manual Sludge Handling and Conditioning, EPA 430/9-78-002.* Washinton, D.C., US: U.S. Environmental Protection Agency Office of Water Program Operations Branch Washington, D.C.

US, EPA. (1979). *Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal.* US: Center for Environmental Research Information Technology Transfer.

US, EPA. (1979). *Process Design Manual for Sludge Treatment and Disposal.* US: Center for Environmental Research Information Technology Transfer.

US, EPA. (1985). *Design Manual, Dewatering Municipal Wastewater Sludges EPA/625/1-87/014.* Cincinnati, OH, US: Center for Environmental Research Information.

US, EPA. (2000). *Biosolids Technology Fact Sheet Centrifuge Thickening and Dewatering EPA832-F-00-053.* Washington, D. C.: Office of Water Washington, D. C.

USEPA. (2006). *Emergency Technologies for Biosolids Management*. EPA 832-R-06-005, United States Environmental Protection Agency.

USEPA. EPA 832-R-06-005. (2006). *EMERGING TECHNOLOGIES FOR BIOSOLIDS MANAGEMENT.* CINCINNATI, OH: US EPA.

Valencia Bonilla, N. T. (2008). Secado Solar de Lodos. *Tesis de Maestría.* México.: Ingeniería Ambiental. UNAM.

Valiente Balderas, A. (2002). *Secado.* México.: UNAM.

Valiente, A. (1980). Prácticas de laboratorio de transferencia de masa. Facultad de Química UNAM. .

Valiente, A. (2002). *Secado.* México.: UNAM.

Velazco, A., & Fernández, F. (1989). Caracterización microbiológica del desecho de lombriz de tierra. *Cultivos Tropicales*, 1: 95-97.

Verselind, P. A., & Matel, J. (1990). Freezing of Water and Wastewater Sludges. (A. S. Engineers, Ed.) *Journal of the Environmental Engineering Division, Mayissue*.

Von Sperling, M., & Augusto de Lemos Chernicharo, C. (2005). *Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions* (Vol. 1). London, UK: IWA Publishing.

Water Environment Federation. (1994). *Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, Volumen I y II.* Vermont U.S.A: Inc. Brattlebord.

Water Pollution Control Federation. (1959). *MOP 8 Sewage Treatment Plant Design.* US: Water Pollution Control Federation.

wATER pOLLUTION cONTROL fEDERATION. (1980). *sLUDGE tHICKENING.* wASHINGTON, D.C.: Lancaster Press.

WEF. (1998). *Design of Wastewater Treatment Plants* (Vol. 3). Alexandria, VA: Water Environment Federation.

WEF, ASCE, EWRI. . (2010). *Design of municipal wastewater treatment plants. Vol3. Solids processing and management. 5Ed.* New York. : Mac Graw Hill.

WEF, WERF, US EPA. (2012). *Solids Process Design and Management*. US: McGrawHill.

WEF, WERF, US EPA. (2012). *Solids Process Design and Management*. US: McGrawHill. ISBN: 978-0-07-178095-7.

WENDEWOLF. (2013). *http://www.wendewolf.com*. Obtenido de http://www.wendewolf.com/index.php?lang=pt

Westlake, K. (1997). Sustainable Landfill-Possibility or Pipe-Dream? *Waste Management and Research. V15, N|5*, 452-461.

Westphal Patricia and Lee Christensen. . (1983). Lime Stabilization: effectiveness of two process modifications. *Journal WPCF, V55*, 11.

Wikipedia, Eciclopedia Libre. (14 de Marzo de 2010). *Clitelo*. Obtenido de http://es.wikipedia.org/wiki/Clitelo.

Wiley John - Sons. (1983). *Practical Waste Management*. New York- Brisbane- Toronto- Singapore: Holmes John R. Chichester .

Willson B., G., & Dalmat, D. (August de 1986). Measuring Compost Stability. *BioCycle*, 34-37.

Wright, J., Jones , C., & Flecker , A. (2002). An ecosystem engineer, the beaver, increases species richness at the landscape scale. *Oecologia*, 132: 96-101.

Tabla de conversiones de unidades de medida

Sigla	Significado
mg	miligramo
g	gramo
kg	kilogramo
mm	milímetro
cm	centímetro
m	metro
ml	mililitro
l	litro
m^3	metro cúbico
s	segundo
h	hora
d	día
mg/l	miligramo por litro

Sigla	Significado
kg/m^3	kilogramo por metro cúbico
l/s	litros por segundo
m^3/d	metros cúbicos por día
Sm^3/h	condiciones estándar de metro cúbico por hora
Scfm	condiciones estándar de pies cúbicos por minuto
°C	grados Celsius
psia	libra-fuerza por pulgada cuadrada absoluta
cm/s	centímetro por segundo
m/s	metro por segundo
HP	caballo de fuerza (medida de energía)
kW	kilowatt
UNT	unidades nefelométricas de turbiedad

Longitud

Sistema métrico	Sistema Inglés	Siglas
1 milímetro (mm)	0.03	in
1 centímetro (cm) = 10 mm	0.39	in
1 metro (m) = 100 cm	1.09	yd
1 kilómetro (km) = 1 000 m	0.62	mi
Sistema Inglés	**Sistema métrico**	
1 pulgada (in)	2.54	cm
1 pie (ft) = 12 pulgadas	0.30	m
1 yarda (yd) = 3 pies	0.91	m
1 milla (mi) = 1 760 yardas	1.60	km
1 milla náutica (nmi) = 2 025.4 yardas	1.85	km

Superficie

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm^2 = 100 mm^2	0.15	in^2
1 m^2 = 10 000 cm^2	1.19	yd^2
1 hectárea (ha) = 10 000 m^2	**2.47**	**acres**
1 km^2 = 100 ha	0.38	mi^2
Sistema Inglés	**Sistema métrico**	
1 in^2	6.45	cm^2
1 ft2 = 144 in^2	0.09	m^2
1 yd^2 = 9 ft^2	0.83	m^2
1 acre = 4 840 yd^2	4 046.90	m^2
1 $milla^2$ = 640 acres	2.59	km^2

Volumen/capacidad

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm^3	0.06	in^3
1 dm^3 = 1 000 cm^3	0.03	ft^3
1 m^3 = 1 000 dm^3	1.30	yd^3
1 litro (L) = 1 dm^3	1.76	pintas
1 hectolitro (hL) = 100 L	21.99	galones
Sistema Inglés	**Sistema métrico**	
1 in^3	16.38	cm^3
1 ft^3 = 1 728 in^3	0.02	m^3
1 onza fluida EUA = 1.0408 onzas fluidas RU	29.57	mL
1 pinta (16 onzas fluidas) = 0.8327 pintas RU	0.47	L
1 galón EUA = 0.8327 galones RU	3.78	L

Masa/peso

Sistema métrico	Sistema inglés	
1 miligramo (mg)	0.0154	grano
1 gramo (g) = 1 000 mg	0.0353	onza
1 kilogramo (kg) = 1 000 g	2.2046	libras
1 tonelada (t) = 1000 kg	0.9842	toneladas larga
Sistema Inglés	**Sistema métrico**	
1 onza (oz) =437.5 granos	28.35	g
1 libra (lb) = 16 oz	0.4536	kg
1 stone = 14 lb	6.3503	kg
1 hundredweight (cwt) = 112 lb	50.802	kg
1 tonelada larga = 20 cwt	1.016	t

Temperatura

$^{o}C = \frac{5}{9}(^{o}F - 32)$	$^{o}F = \frac{9}{5}(^{o}C) + 32$

Otros sistemas de unidades		Multiplicado por	Sistema Internacional de Unidades (SI)	
Unidad	**Símbolo**	**Factor de conversión**	**Se convierte a**	
Longitud				
Pie	pie, ft.,'	0.30	metro	m
Pulgada	plg, in,"	25.40	milímetro	mm
Presión/esfuerzo				
Kilogramo fuerza/cm^2	kg_f/cm^2	98 066.50	pascal	Pa
Libra/pulgada^2	lb/ plg^2, PSI	6 894.76	pascal	Pa
atmósfera técnica	at	98 066.50	pascal	Pa
metro de agua	m H_2O (mca)	9 806.65	pascal	Pa
mm de mercurio	mm Hg	133.32	pascal	Pa
bar	bar	100 000.00	pascal	Pa
Fuerza/ peso				
kilogramo fuerza	kg_f	9.80	newton	N
Masa				
libra	lb	0.45	kilogramo	kg
onza	oz	28.30	gramo	g
Peso volumétrico				
kilogramo fuerza/m^3	kg_f/m^3	9.80	N/m^3	N/m^3
libra /ft^3	lb/ft^3	157.08	N/m^3	N/m^3
Potencia				
caballo de potencia	CP, HP	745.69	watt	W
caballo de vapor	CV	735.00	watt	W
Viscosidad dinámica				
poise	μ	0.01	pascal segundo	Pa s
Viscosidad cinemática				
viscosidad cinemática	ν	1	stoke	m^2/s (St)
Energía/ Cantidad de calor				
caloría	cal	4.18	joule	J
unidad térmica británica	BTU	1 055.06	joule	J
Temperatura				
grado Celsius	°C	tk=tc + 273.15	grado Kelvin	K

Nota: El valor de la aceleración de la gravedad aceptado internacionalmente es de 9.80665 m/s^2

Longitud								
de / a	mm	cm	m	km	mi	milla náutica (nmi)	ft	in
mm	1.000	0.100	0.001					
cm	10000	1.000	0.010				0.033	0.394
m	1 000.000	100.000	1.000	0.001			3.281	39.370
km			0.001	1.000	0.621	0.540	3 280.83	0.039
mi			1 609.347	1.609	1.000	0.869	5 280.000	
nmi			1 852.000	1.852	1.151	1.000	6 076.115	
ft		30.480	0.305				1.000	12.000
in	25.400	2.540	0.025				0.083	1.000

Superficie								
de / a	cm^2	m^2	km^2	ha	mi^2	acre	ft^2	in^2
cm^2	1.00						0.001	0.155
m^2	10 000.00	1.00					10.764	1 550.003
km^2			1.000	100.000	0.386	247.097		
ha		10 000.00	0.010	1.000	0.004	2.471		
mi^2			2.590	259.000	1.000	640.000		
acre		4 047.00	0.004	0.405	0.002	1.000		
ft^2	929.03	0.09					1.000	0.007
in^2	6.45						144.000	1.000

Volumen								
de / a	cm^3	m^3	L	ft^3	gal. EUA	acre-ft	in^3	yd^3
cm^3	1.000		0.001				0.061	
m^3		1.000	1 000.000	35.314	264.200			1.307
L	1 000.000	0.001	1.000	0.035	0.264		61.023	
ft^3		0.028	28.317	1.000	7.481			0.037
gal. EUA		0.004	3.785	0.134	1.000		230.974	
acre-ft		1 233.490				1.000		
in^3	16.387		0.016		0.004		1.000	
Yd^3		0.765		27.000				1.000

Gasto								
de / a	l/s	cm^3/s	gal/día	gal/min	l/min	m^3/día	m^3/h	ft^3/s
l/s	1.000	1 000.000		15.851	60.000	86.400	3.600	0.035
cm^3/s	0.001	1.000	22.825	0.016	0.060	0.083		
gal/día		0.044	1.000			0.004		
gal/min	0.063	63.089	1 440.000	1.000	0.000	5.451	0.227	0.002
l/min	0.017	16.667	0.000	0.264	1.000	1.440	0.060	
m^3/día	0.012	11.570	264.550	0.183	0.694	1.000	0.042	
m^3/h	0.278		6 340.152	4.403	16.667	24.000	1.000	0.010
ft^3/s	28.316			448.831	1 698.960	2 446.590	101.941	1.000

Eficiencia de pozo		
de a	gal/min/pie	l/s/m
gal/min/pie	1.000	0.206
l/s/m	4.840	1.000

Permeabilidad						
de a	cm/s	gal/día/Pie²	millones gal/día/acre	m/día	pie/s	Darcy
cm/s	1.000	21 204.78		864.000	0.033	
gal/día/pie²		1.000		0.041		0.055
millón gal/ día/acre			1.000	0.935		
m/día	0.001	24.543	1.069	1.000		1.351
pie/s	30.480			26 334.72	1.000	
Darcy		18.200		0.740		1.000

Peso								
de a	grano	gramo	kilogramo	libra	onza	tonelada corta	tonelada larga	tonelada métrica
Grano (gr)	1.000	0.065						
Gramo (g)	15.432	1.000	0.001	0.002				
Kilogramo (kg)		1 000.000	1.000	2.205	35.273			0.001
Libra (lb)		453.592	0.454	1.000	16.000			
Onza (oz)	437.500	28.350			1.000			
t corta			907.180	2 000.000		1.000		0.907
t larga			1 016.000	2 240.000		1.119	1.000	1.016
t métrica			1 000.000	2 205.000		1.101	0.986	1.000

Potencia								
de a	CV	HP	kW	W	ft lb/s	kg m/s	BTU/s	kcal/s
CV	1.000	0.986	0.736	735.500	542.500	75.000	0.697	0.176
HP	1.014	1.000	0.746	745.700	550.000	76.040	0.706	0.178
kW	1.360	1.341	1.000	1 000.000	737.600	101.980	0.948	0.239
W			0.001	1.000	0.738	0.102		
ft lb/s				1.356	1.000	0.138	0.001	
kg m/s	0.013	0.013	0.009	9.806	7.233	1.000	0.009	0.002
BTU/s	1.434	1.415	1.055	1 055.000	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal/s	5.692	5.614	4.186	4 186.000	3 088.000	426.900	3.968	1.000

Presión							
de a	**atmósfera**	**Kg/cm²**	**lb/in²**	**mm de Hg**	**in de Hg**	**m de H_20**	**ft de H_2O**
atmósfera	1.000	1.033	14.696	760.000	29.921	10.330	33.899
kg/cm²	0.968	1.000	14.220	735.560	28.970	10.000	32.810
lb/in²	0.068	0.070	1.000	51.816	2.036	0.710	2.307
mm de Hg	0.001	0.001	0.019	1.000	0.039	0.013	0.044
in de Hg	0.033	0.035	0.491	25.400	1.000	0.345	1.133
m de agua	0.096	0.100	1.422	73.560	2.896	1.000	3.281
ft de agua	0.029	0.030	0.433	22.430	0.883	0.304	1.000

Energía								
de a	**CV hora**	**HP hora**	**kW hora**	**J**	**ft.lb**	**kgm**	**BTU**	**kcal**
CV hora	1.000	0.986	0.736				2 510.000	632.500
HP hora	1.014	1.000	0.746				2 545.000	641.200
kW hora	1.360	1.341	1.000				3 413.000	860.000
J				1.000	0.738	0.102		
ft.lb				1.356	1.000	0.138		
kgm				9.806	7.233	1.000		
BTU				1 054.900	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal				4 186.000	3 087.000	426.900	426.900	1.000

Transmisividad			
de a	**cm²/s**	**gal/día/pie**	**m²/día**
cm²/s	1.000	695.694	8.640
gal/día/ft	0.001	1.000	0.012
m²/día	0.116	80.520	1.000

Conversión de pies y pulgadas, a metros												
ft, in/m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.000	0.025	0.051	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.279
1	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584
2	0.610	0.635	0.660	0.686	0.711	0.737	0.762	0.787	0.813	0.838	0.864	0.889
3	0.914	0.940	0.965	0.991	1.016	1.041	1.067	1.092	1.176	1.143	1.168	1.194
4	1.219	1.245	1.270	1.295	1.321	1.346	1.372	1.397	1.422	1.448	1.473	1.499
5	1.524	1.549	1.575	1.600	1.626	1.651	1.676	1.702	1.727	1.753	1.778	1.803
6	1.829	1.854	1.880	1.905	1.930	1.956	1.981	2.007	2.032	2.057	2.083	2.108
7	2.134	2.159	2.184	2.210	2.235	2.261	2.286	2.311	2.337	2.362	2.388	2.413
8	2.438	2.464	2.489	2.515	2.540	2.565	2.591	2.616	2.642	2.667	2.692	2.718
9	2.743	2.769	2.794	2.819	2.845	2.870	2.896	2.921	2.946	2.972	2.997	3.023
10	3.048	3.073	3.099	3.124	3.150	3.175	3.200	3.226	3.251	3.277	3.302	3.327
11	3.353	3.378	3.404	3.429	3.454	3.480	3.505	3.531	3.556	3.581	3.607	3.632
12	3.658	3.683	3.708	3.734	3.759	3.785	3.810	3.835	3.861	3.886	3.912	3.937
13	3.962	3.988	4.013	4.039	4.064	4.089	4.115	4.140	4.166	4.191	4.216	4.242
14	4.267	4.293	4.318	4.343	4.369	4.394	4.420	4.445	4.470	4.496	4.521	4.547
15	4.572	4.597	4.623	4.648	4.674	4.699	4.724	4.750	4.775	4.801	4.826	4.851
16	4.877	4.902	4.928	4.953	4.978	5.004	5.029	5.055	5.080	5.105	5.131	5.156
17	5.182	5.207	5.232	5.258	5.283	5.309	5.334	5.359	5.385	5.410	5.436	5.461
18	5.486	5.512	5.537	5.563	5.588	5.613	5.639	5.664	5.690	5.715	5.740	5.766
19	5.791	5.817	5.842	5.867	5.893	5.918	5.944	5.969	5.994	6.020	6.045	6.071
20	6.096	6.121	6.147	6.172	6.198	6.223	6.248	6.274	6.299	6.325	6.350	6.375
21	6.401	6.426	6.452	6.477	6.502	6.528	6.553	6.579	6.604	6.629	6.655	6.680
22	6.706	6.731	6.756	6.782	6.807	6.833	6.858	6.883	6.909	6.934	6.960	6.985
23	7.010	7.036	7.061	7.087	7.112	7.137	7.163	7.188	7.214	7.239	7.264	7.290
24	7.315	7.341	7.366	7.391	7.417	7.442	7.468	7.493	7.518	7.544	7.569	7.595
25	7.620	7.645	7.671	7,696	7.722	7.747	7.772	7.798	7.823	7.849	7.874	7.899
26	7.925	7.950	7.976	8.001	8.026	8.052	8.077	8.103	8.128	8.153	8.179	8.204
27	8.230	8.255	8.280	8.306	8.331	8.357	8.382	8.407	8.433	8.458	8.484	8.509
28	8.534	8.560	8.585	8.611	8.636	8.661	8.687	8.712	8.738	8.763	8.788	8.814
29	8.839	8.865	8.890	8.915	8.941	8.966	8.992	9.017	9.042	9.068	9.093	9.119
30	9.144	9.169	9.195	9.220	9.246	9.271	9.296	9.322	9.347	9.373	9.398	9.423
31	9.449	9.474	9.500	9.525	9.550	9.576	9.60 1	9.627	9.652	9.677	9.703	9.728
32	9.754	9.779	9.804	9.830	9.855	9.881	9.906	9.931	9.957	9.982	10.008	10.033
33	10.058	10.084	10.109	10.135	10.160	10.185	10.211	10.236	10.262	10.287	10.312	10.338
34	10.363	10.389	10.414	10.439	10.465	10.490	10.516	10.541	10.566	10.592	10.617	10.643
35	10.668	10.693	10.719	10.744	10.770	10.795	10.820	10.846	10.871	10.897	10.922	10.947

La segunda columna es la conversión de pies a metros; las siguientes columnas son la conversión de pulgadas a metros que se suman a la anterior conversión.

Tabla de conversión de pulgadas a milímetros								
Pulgadas	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
0	0	3.175	6.35	9.525	12.7	15.875	19.05	22.225
1	25.4	28.575	31.75	34.925	38.1	41.275	44.45	47.625
2	50.8	53.975	57.15	60.325	63.5	66.675	69.85	73.025
3	76.2	79.375	82.55	85.725	88.9	92.075	95.25	98.425
4	101.6	104.775	107.95	111.125	114.3	117.475	120.65	123.825
5	127.0	130.175	133.35	136.525	139.7	142.875	146.05	149.225
6	152.4	155.575	158.75	161.925	165.1	168.275	171.45	174.625
7	177.8	180.975	184.15	187.325	190.5	193.675	196.85	200.025
8	203.2	206.375	209.55	212.725	215.9	219.075	222.25	225.425
9	228.6	231.775	234.95	238.125	241.3	244.475	247.65	250.825
10	254.0	257.175	260.35	263.525	266.7	269.875	273.05	276.225
11	279.4	282.575	285.75	288.925	292.1	295.275	298.45	301.625
12	304.8	307.975	311.15	314.325	317.5	320.675	323.85	327.025
13	330.2	333.375	336.55	339.725	342.9	346.075	349.25	352.425
14	355.6	358.775	361.95	365.125	368.3	371.475	374.65	377.825
15	381.0	384.175	387.35	390.525	393.7	396.875	400.05	403.225
16	406.4	409.575	412.75	415.925	419.1	422.275	425.45	428.625
17	431.8	434.975	438.15	441.325	444.5	447.675	450.85	454.025
18	457.2	460.375	463.55	466.725	469.9	473.075	476.25	479.425
19	482.6	485.775	488.95	492.125	495.3	498.475	501.65	504.825
20	508.0	511.175	514.35	517.525	520.7	523.875	527.05	530.225
21	533.4	536.575	539.75	542.925	546.1	549.275	552.45	555.625
22	558.8	561.975	565.15	568.325	571.5	574.675	577.85	581.025
23	584.2	587.375	590.55	593.725	596.9	600.075	603.25	606.425
24	609.6	612.775	615.95	619.125	622.3	625.475	628.65	631.825
25	635.0	638.175	641.35	644.525	647.7	650.875	654.05	657.225
26	660.4	663.575	666.75	669.925	673.1	676.275	679.45	682.625
27	685.8	688.975	692.15	695.325	698.5	701.675	704.85	708.025
28	711.2	714.375	717.55	720.725	723.9	727.075	730.25	733.425
29	736.6	739.775	742.95	746.125	749.3	752.475	755.65	758.825
30	762.0	765.175	768.35	771.525	774.7	777.875	781.05	784.225

Fórmulas generales para la conversión de los diferentes sistemas

Centígrados a Fahrenheit	°F=9/5°C+32
Fahrenheit a Centígrados	°C=5/9 (°F-32)
Réaumur a Centígrados	°C=5/4 °R
Fahrenheit a Réaumur	°R=4/9 (°F-32)
Réaumur a Fahrenheit	°F=(9/4°R)+32
Celsius a Kelvin	°K=273.15+^{0}C
Fahrenheit a Rankine	°Ra=459.67+°F
Rankine a Kelvin	°K=5/9°Ra

Factores químicos de conversión					
	A	B	C	D	E
Constituyentes	epm a ppm	ppm a epm	epm a gpg	gpg a epm	ppm a ppm $CaC0_3$
calcio Ca^{+2}	20.04	0.04991	1.1719	0.8533	2.4970
hierro Fe^{+2}	27.92	0.03582	1.6327	0.6125	1.7923
magnesio Mg^{+2}	12.16	0.08224	0.7111	1.4063	4.1151
potasio K^{+1}	39.10	0.02558	2.2865	0.4373	1.2798
sodio Na^{+1}	23.00	0.04348	1.3450	0.7435	2.1756
bicarbonato $(HCO_3)^{-1}$	61.01	0.01639	3.5678	0.2803	0.8202
carbonato $(CO_3)^{-2}$	30.00	0.03333	1.7544	0.5700	1.6680
cloro $(Cl)^{-1}$	35.46	0.02820	2.0737	0.4822	1.4112
hidróxido $(OH)^{-1}$	17.07	0.05879	0.9947	1.0053	2.9263
nitrato $(NO_3)^{-1}$	62.01	0.01613	3.6263	0.2758	0.8070
fosfato $(PO_4)^{-3}$	31.67	0.03158	1.8520	0.5400	1.5800
sulfato $(SO_4)^{-2}$	48.04	0.02082	2.8094	0.3559	1.0416
bicarbonato de calcio $Ca(HCO_3)_2$	805.00	0.01234	4.7398	0.2120	0.6174
carbonato de calcio ($CaCO_3$)	50.04	0.01998	2.9263	0.3417	1.0000
cloruro de calcio ($CaCl_2$)	55.50	0.01802	3.2456	0.3081	0.9016
hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$	37.05	0.02699	2.1667	0.4615	1.3506
sulfato de calcio ($CaSO_4$)	68.07	0.01469	3.9807	0.2512	0.7351
bicarbonato férrico $Fe(HCO_3)_3$	88.93	0.01124	5.2006	0.1923	0.5627
carbonato férrico $Fe_2(CO_3)_3$	57.92	0.01727	3.3871	0.2951	0.8640
sulfato férrico $Fe_2(CO_4)_3$	75.96	0.01316	4.4421	0.2251	0.6588
bicarbonato magnésico $Mg(HCO_3)_2$	73.17	0.01367	4.2789	0.2337	0.6839
carbonato magnésico ($MgCO_3$)	42.16	1.02372	2.4655	0.4056	1.1869
cloruro de magnesio ($MgCl_2$)	47.62	0.02100	2.7848	0.3591	1.0508
hidróxido de magnesio $Mg(OH)_2$	29.17	0.03428	1.7058	0.5862	1.7155
sulfato de magnesio ($MgSO_4$)	60.20	0.01661	3.5202	0.2841	0.6312

epm = equivalentes por millón
ppm = partes por millón
gpg = granos por galón
p.p.m. $CaC0_3$ = partes por millón de carbonato de calcio

Ilustraciones

Ilustración 2.1 Sistema de gestión ambiental 20
Ilustración 2.2 Entrevistas con productores de Aguascalientes sobre el impacto del uso de lodos residuales en sus cultivos 24
Ilustración 2.3 Comité de tratamiento de aguas residuales en Cabo San Lucas en coordinación con Organismo Operador 25
Ilustración 2.4 Comunicación interna para lograr un trabajo unificado 27
Ilustración 2.5 Lento avance del personal demandado por las empresas en México 29
Ilustración 3.1 Sitios de generación de lodos residuales dentro del tren de tratamiento de agua residual 32
Ilustración 3.2 Lodo generado en el sedimentador primario de una PTAR. 33
Ilustración 3.3 Lodo generado en el sedimentador secundario. Cortesia PTAR de Valle de Bravo 34
Ilustración 3.4 Muestreo de lodos en lechos de secado por el método del cuarteo 41
Ilustración 3.5 Interrelaciones entre los diferentes tipos de sólidos en agua y lodos residuales 46
Ilustración 3.6 Equipo y materiales que se usan para determinar los diferentes tipos de sólidos en los lodos y aguas residuales 48
Ilustración 3.7 Fraccionamiento de la demanda química de oxígeno (DQO) del afluente 63
Ilustración 3.8 Esquema del ejemplo para determinar la cantidad de lodo, (US, EPA, 1979) 68
Ilustración 4.1 Criterios potenciales para la selección de procesos de lodos 75
Ilustración 4.2 Tecnología para el tratamiento de lodos residuales 75
Ilustración 4.3 Diagrama de flujo de la planta 80
Ilustración 5.1 Clasificación de bombas para el tratamiento de aguas residuales 90
Ilustración 5.2 Bomba cortadora y desmenuzadora 92
Ilustración 5.3 Detalles de la bomba de émbolo 94
Ilustración 5.4 Bomba de cavidad progresiva 94
Ilustración 5.5 Bomba de diafragma operada con aire 95
Ilustración 5.6 Bomba de lóbulo giratorio 95
Ilustración 5.7 Bomba de manguera peristáltica 96
Ilustración 5.8 Bomba con impulsor de aire 96
Ilustración 5.9 Bomba de tornillo de Arquímedes 97
Ilustración 5.10 Para tuberías de 150 mm (6”) y operación rutinaria 101
Ilustración 5.11 Para tuberías de 200 mm (8”) y operación rutinaria 101

Ilustración 5.12 Para tuberías de 150 mm (6”) y caso más desfavorable 101
Ilustración 5.13 Para tuberías de 200 mm (8”) y caso más desfavorable 101
Ilustración 5.14 Tanque de aeración 103
Ilustración 5.15 Se refiere al funcionamiento, capacidad (gasto en L s^{-1} contra carga dinámica total (H en metros) 105
Ilustración 5.16 Se refiere a la potencia (hp) que requiere la bomba para las condiciones del proyecto, de acuerdo al gasto bombeado (L. s^{-1}) 105
Ilustración 5.17 Se refiere a la eficiencia máxima de la bomba (N en %) que se alcanza con un gasto determinado (L s^{-1}) 106
Ilustración 5.18 Banda transportadora 107
Ilustración 5.19 Aplicación de banda transportadora cerrada en planta de tratamiento de aguas residuales 108
Ilustración 5.20 Aplicación de una banda transportadora 108
Ilustración 5.21 Operación de una banda transportadora 110
Ilustración 5.22 Partes de una banda transportadora 112
Ilustración 5.23 a), b) Transportadoras tipo tornillo 112
Ilustración 5.24 Aplicación del transportador de tornillo 113
Ilustración 5.25 Tornillo lavador de arena, PTAR Tijuana B.C. 114
Ilustración 5.26 Mantenimiento de tornillo transportador 114
Ilustración 5.27 Tornillo para transportar sólidos de microcriba 115
Ilustración 6.1 Parámetros básicos para la evaluación de un sistema de acondicionamiento de lodos, (EPA, 1979) 118
Ilustración 6.2 Distribución del tamaño de partícula de materiales comunes, (US, EPA, 1979) 119
Ilustración 6.3 Perfil de concentración típica de los lodos de aguas residuales municipales en un espesador por gravedad en continuo, (EPA, 1979) 121
Ilustración 6.4 Sistema de dosificación de polímero sólido (WEF ,2012) 127
Ilustración 6.5 Tolva para dosificación de polímero 127
Ilustración 6.6 Tanques para la preparación de soluciones 128
Ilustración 6.7 Mezclador estático 129
Ilustración 6.8 Sistema de dosificación de polímero liquido 129
Ilustración 6.9 Sistema de dosificación de polímero en emulsión (Cortesía de PTAR de Valle de Bravo, Estado de México) 130
Ilustración 6.10 Espesador estático gravitacional de lodo con sistema de varilla, (Mijaylova, 1999) 134
Ilustración 6.11 Perfil de Concentraciones típicas de los lodos de aguas residuales municipales en un espesador de gravedad en operación continua, (EPA, 1979) 135
Ilustración 6.12 Esquema de un sistema de espesamiento por flotación con aire disuelto, (WEF, et al., 2012) 137
Ilustración 6.13 Unidad típica de espesamiento por flotación con aire disuelto para lodos activados residuales., (Metcalf & Eddy, 2003) 137

Ilustración 6.14 Equipo para espesamiento por gravedad en banda 140
Ilustración 6.15 Diagrama de flujo de un sistema de espesamiento por gravedad en bandas, (Mijaylova, 1999) 142
Ilustración 6.16 Esquema de una centrífuga, (Metcalf & Eddy, 2003) 143
Ilustración 6.17 Esquema de una centrífuga para el espesamiento de lodos, (Flottweg SE, 2013) 143
Ilustración 6.18 Esquema de un espesador rotatorio, (WEF, WERF, US EPA, 2012) 145
Ilustración 6.19 Diagrama de flujo simplificado del espesamiento por membrana operando por lotes, (WEF, et al., 2012) 145
Ilustración 6.20 Esquema de una instalación típica de un espesamiento por membranas acoplado a un sistema de estabilización, (WEF, et al., 2012) 146
Ilustración 6.21 Esquema del transportador de desplazamiento, el cual está montado en el interior del recipiente y gira a una velocidad ligeramente diferente, (WEF, et al., 2012) 154
Ilustración 7.1 Proceso simplificado de estabilización anaerobia, EPA, 2012 164
Ilustración 7.2 Reactor anaerobio de lodos 168
Ilustración 7.3 Configuración del proceso anaerobio de etapas de temperatura, EPA, 2012 171
Ilustración 7.4 Proceso de estabilización dual, EPA, 2012 172
Ilustración 7.5 Descripción del proceso de estabilización simplificado, EPA, 2012 175
Ilustración 7.6 Esquema de la estabilización anaerobia en dos etapas 177
Ilustración 7.7 Configuración del proceso anaerobio mesofilico de una etapa, EPA, 2012 178
Ilustración 7.8 Diagrama esquemático típico de un reactor anaerobio de alta tasa de una etapa, Metcalf & Eddy, 2003 178
Ilustración 7.9 Formas típicas de reactores anaerobios: (a) cilíndrica con construcción de concreto armado. b).- Diseño Alemán convencional con construcción de concreto armado. c).- Forma de huevo con revestimiento de acero.-Cubiertas y salidas, Metcalf & Eddy, 2003 179
Ilustración 7.10 Dispositivos utilizados para el mezclado de los reactores anaerobios de alta tasa: a) sistemas de inyección de gas no confinado. b) sistemas de inyección de gas confinado, c).- sistemas de agitación mecánica d).- sistemas de bombeo mecánico, Metcalf & Eddy, 2003 181
Ilustración 8.1 Ejemplo de un reactor aerobio semicontinuo (Metcalf & Eddy, 2003) 188
Ilustración 8.2 Ejemplo de un reactor aerobio semicontinuo (Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering Treatment and Reuso, 2003) 188
Ilustración 8.3 Diagrama de flujo del proceso de estabilización convencional continua (WEF, ***et al***., 2012) 190
Ilustración 8.4 Ejemplos del proceso de estabilización aerobia convencional continúa 191
Ilustración 8.5 Configuración alternando reactores en operación semicontinua (WEF, *et al*., 2012) 191
Ilustración 8.6 Configuración de reactores en régimen semicontinuo (WEF, *et al*., 2012) 191
Ilustración 8.7 Configuración de reactores en serie y régimen continuo (WEF, *et al*., 2012) 192
Ilustración 8.8 Configuración en régimen semicontinuo (WEF, *et al*., 2012) 192

Ilustración 8.9 Velocidad de reacción contra la temperatura de estabilización, (US, EPA, 1979) 196
Ilustración 8.10 Efecto de la concentración de sólidos sobre el coeficiente de velocidad de reacción (US, EPA, 1979) 196
Ilustración 8.11 Influencia del tiempo de retención de sólidos y de la temperatura del reactor sobre la velocidad específica de consumo de oxígeno en el reactor aerobio, (US, EPA, 1979) 198
Ilustración 8.12 Efecto del tiempo de retención de sólidos sobre el pH durante la estabilización aerobia, (US, EPA, 1979) 199
Ilustración 8.13 Reducción de sólidos volátiles en función de la temperatura del líquido y la edad del lodo en el reactor (US, EPA, 1979) 200
Ilustración 8.14 SSV en función del tiempo de aeración, (Ramalho, 1996) 204
Ilustración 8.15 SSV degradables remanentes en función del tiempo de aeración 206
Ilustración 8.16 Curva de utilización de oxígeno 209
Ilustración 9.1 Composteo de lodos de aguas residuales 216
Ilustración 9.2 Mezclado de lodos residuales con materiales acondicionadores 217
Ilustración 9.3 Pila estática de composteo en su etapa termofílica 217
Ilustración 9.4 Pilas en curado 217
Ilustración 9.5 Criba para composta 217
Ilustración 9.6 Composteo en camellón 218
Ilustración 9.7 Composteo en pila estática 218
Ilustración 9.8 Reactores experimentales 218
Ilustración 9.9 Camión para transporte de lodos a sitio de composteo 221
Ilustración 9.10 Sistema de aeración para las pilas estáticas. 221
Ilustración 9.11 Picadora para el fraccionamiento del material acondicionador 221
Ilustración 9.12 Canal perforado para la inyección de aire 221
Ilustración 9.13 Mezclador estático y bandas transportadoras para los materiales y mezcla 221
Ilustración 9.14 Ventilador centrífugo para el sistema de composteo 221
Ilustración 9.15 Sistema para el control de olor. Cortesía planta de composteo de Betsville, Maryland 223
Ilustración 9.16 Sistema de control de olor durante el composteo 230
Ilustración 9.17 Tren de tratamiento de agua residual 232
Ilustración 9.18 Esquema del área requerida para pilas de composteo 238
Ilustración 9.19 Esquema del área requerida para pilas de curado 239
Ilustración 9.20 Esquema del área requerida para el almacenamiento de la composta 240
Ilustración 9.21 Esquema del área requerida para 2 pilas de hoja de jardín 241
Ilustración 9.22 Esquema del área requerida para pedaceria de madera 242
Ilustración 9.23 Dimensiones de las áreas del sistema de composteo 243
Ilustración 9.24 Tubería enterrada en el fondo de la zanja con difusores para la inyección de aire 244
Ilustración 9.25 Tuberías perforadas sobre la base de concreto 244
Ilustración 9.26 Tuberías enterradas y perforadas en la base de concreto 245

Ilustración 9.27 Canales perforados 245
Ilustración 10.1 Inspección sistema de vermicomposteo 252
Ilustración 10.2 Modelo jerárquico de los principales factores determinantes de los procesos del suelo, Lavelle et al. 1993 adaptado por Jiménez et al. 2003 254
Ilustración 10.3 Relaciones de interacción entre los microorganismos y los macroorganismos del suelo 255
Ilustración 10.4 Modelo jerárquico de los principales factores determinantes de los procesos del suelo, Lavelle et al. 1993 adaptado por Jiménez et al. 2003 255
Ilustración 10.5 Función de las lombrices como bioreactores, Capistran, ***et al***. 2001 257
Ilustración 10.6 Clasificación ecológica de las lombrices de la tierra. (Lavelle, 1981, tomado de Capistrán, 2001) 258
Ilustración 10.7 Lombrices formadoras de suelo 258
Ilustración 10.8 Lombrices composteadoras, del género Eisenia, sp., alimentadas con lodo residual 259
Ilustración 10.9 Lombrices composteadoras, del género Eisenia, sp., alimentadas con lodo residual 259
Ilustración 10.10 Características morfológicas generales 261
Ilustración 10.11 Clitelo y metámeros, (Schuldt M. , 2004) 262
Ilustración 10.12 Cápsulas, cocones, capullos o puestas de Eisenia, sp 263
Ilustración 10.13 Ciclo biológico de Eisenia, sp, fotos L.Cardoso 264
Ilustración 10.14 Lodos adecuados para vermicomposteo provenientes de lechos de secado 266
Ilustración 10.15 Etapas del proceso de vermicomposteo en un lodo aerobio, (US EPA, 1979) 267
Ilustración 10.16 Etapas del proceso de vermicomposteo con un lodo anaerobio o tóxico, (US EPA, 1979) 268
Ilustración 10.17 Sistema de vermicomposteo abierto para excretas de bovino, Argentina 272
Ilustración 10.18 Sistema abierto de vermicomposteo de excretas de bovino, Jalisco 272
Ilustración 10.19 Sistema cerrado de vermicomposteo con alimentación automatica, Norman Q. Arancon y Clive A. Edwards, 2007 272
Ilustración 10.20 Comportamiento de temperaturas en lechos de vermicomposteo, (Cardoso V., Ramírez C., Garzón Zúñiga, Chacón, & Paredes, 2007) 274
Ilustración 10.21 Tamaño y trituración de partículas para composteo y vermicomposteo 276
Ilustración 10.22 Pruebas de aceptación de alimento 282
Ilustración 10.23 Alimentación y riegos periódicos del sistema de vermicomposteo de San Nicolás de Ibarra, Jalisco. 283
Ilustración 10.24 Sistema de vermicomposteo con alimentación en auto siembra 284
Ilustración 10.25 Proceso de transformación del alimento en el vermicomposteo 284
Ilustración 10.26 Transformación del lodo residual a un biosólido granular 285
Ilustración 10.27 Cambios en parámetros fisicoquímicos de la materia orgánica durante el vermicomposteo (ejes verticales) durante el transcurso del proceso (eje horizontal), Khiel, 1985, modificado por Capistran, ***et al***., 2001) 286
Ilustración 10.28 Comportamiento de la relación STV/ST 287

Ilustración 10.29 Secuencia de muestreo para determinar la densidad de población de lombrices 291
Ilustración 10.30 Estudios experimentales de vermicomposteo 293
Ilustración 10.31 Sistema de vermicomposteo IMTA para una planta de tratamiento de <1 $L \cdot s^{-1}$ 293
Ilustración 10.32 Esquemas del vermicompostero del Instituto Mexicano de Tecnologia del Agua 294
Ilustración 10.33 Vermicompostero de San Nicolás de Ibarra, Chapala, Jalisco 296
Ilustración 10.34 Vermicompostero de Chapala, Jalisco 297
Ilustración 10.35 Capacitación por parte del personal del CEA a estudiantes de la región sobre vermicomposteo de lodos 298
Ilustración 11.1 Efectos del pH 301
Ilustración 11.2 Estabilización convencional con cal (Clase B) 302
Ilustración 11.3 Pasteurización in-vessel (Clase A) Fuente WEF et al; 2009 304
Ilustración 11.4 Proceso N-Viro. (Opción 1) (Clase A) 304
Ilustración 11.5 Proceso N-Viro. (Opción 2.) (Clase A) 306
Ilustración 11.6 Tecnologia PORI ST (Clase A) 306
Ilustración 11.7 Proceso de fijación quimica 307
Ilustración 11.8 Ilustración 11.8 Proceso Bio-Fix 307
Ilustración 11.9 Proceso RDP (Clase A) 307
Ilustración 11.10 Dosis de cal en función del pH para diferentes tipos de lodos, Fuente: EPA 1978 310
Ilustración 11.11 Dos teóricas de óxido de calcio requeridas para obtener lodo Clase A o lodo clase B a diferentes porcentajes de sólidos totales en el lodo 311
Ilustración 11.12 Componentes de un sistema de estabilización de lodo líquido, Fuente: EPA 1979 314
Ilustración 11.13 Apagador y alimentador de cal y tanque de mezclado 315
Ilustración 11.14 Esquema típico de un post tratamiento con cal. Fuente: Metcalf & Eddy 2003 315
Ilustración 11.15 Componentes de un silo de almacenamiento de cal 316
Ilustración 11.16 Sistema de alimentación y dosificación de cal 316
Ilustración 11.17 Sistema de mezclado lodo-cal 317
Ilustración 11.18 Variación del pH con la dosis de cal para diferentes concentraciones de sólidos totales en el lodo 322
Ilustración 11.19 Resistencia específica del lodo con bajas concentraciones de cal 323
Ilustración 11.20 Variación del pH con el tiempo. Lodo residual con 2.26 por ciento de ST 325
Ilustración 11.21 Variación de la resistencia específica del lodo con diferentes dosis 325
Ilustración 12.1 Curva de velocidad de evaporación, (Ramalho, 1996) 332
Ilustración 12.2 Lecho de secado de arena típico, (WEF, et al., 2012) 333
Ilustración 12.3 Lecho de secado de arena 335
Ilustración 12.4 Lecho de secado pavimentado, (US, EPA, 1979) 336
Ilustración 12.5 Lecho de secado pavimentado por decantación y evaporación: a) vista isométrica, b) vista transversal, (Metcalf & Eddy, , 2003) 337
Ilustración 12.6 Sección transversal de un lecho de secado de malla de alambre, (Metcalf & Eddy, 2003) 339
Ilustración 12.7 Esquema de un lecho de secado al vacío 340

Ilustración 12.8 Eficiencia típica de los lechos de secado al vacío, ($lb \cdot ft^{-2}$ x 4.883 = $kg \cdot m^{-2}$ y $ft^2 \cdot lb^{-1}$ x 0.2048 = $m^2 \cdot kg^{-1}$ (Mijaylova, 1999) 342
Ilustración 12.9 Remoción del agua en una centrífuga, (WEF, et al., 2012) 344
Ilustración 12.10 Esquema de las dos configuraciones de la centrífuga de tornillo a) contracorriente y b) cocorriente, (Metcalf & Eddy, 2003) 345
Ilustración 12.11 Ejemplo de una centrífuga de tornillo comercial 346
Ilustración 12.12 Diagrama de flujo de un sistema de filtración, (EPA, 1979) 347
Ilustración 12.13 Diferentes diseños alternativos para la obtención de la descarga de agua en los filtros prensa de bandas 348
Ilustración 12.14 Filtro prensa de bandas, (WEF, et al., 2012) 349
Ilustración 12.15 Esquema de las instalaciones de un sistema de filtro prensa de bandas, (Metcalf & Eddy, 2003) 349
Ilustración 12.16 Filtro prensa de bandas nuevo y en operación y PTAR de Valle de Bravo Edo. de México 350
Ilustración 12.17 Filtro prensa de placas, (Metcalf & Eddy, 2003) 351
Ilustración 12.18 Filtro prensa de placas de volumen variable, (EPA, 1979) 352
Ilustración 12.19 Mecanismos durante el secado solar de lodos, (Thermo - System, 2013) 354
Ilustración 12.20 Mecanismos de transferencia de calor, (Valiente, 2002) 354
Ilustración 12.21 Curvas típicas de secado para condiciones constantes: (a) Contenido de humedad en función del tiempo; (b) velocidad de secado en función del contenido de humedad, (Valiente, 2002) 356
Ilustración 12.22 Curva típica del mecanismo de capilaridad, (Valiente, 2002) 357
Ilustración 12.23 Curva típica del mecanismo de difusión, (Foust, 1990) 358
Ilustración 12.24 Modelos en operación: (a) Secado solar en invernadero; (b) Secado solar con cubierta, (Valencia, 2008) 359
Ilustración 12.25 Sistema de ventilación dentro del área de secado (Thermo - Systems, 2013) 360
Ilustración 12.26 Invernadero con sistema de ventilación abatible, (WENDEWOLF, 2013) 360
Ilustración 12.27 Sistema Wendewolf para el movimiento y secado del lodo, (WENDEWOLF, 2013) 360
Ilustración 12.28 Sistema de secado de lodos, (Thermo-System, 2013) 361
Ilustración 12.29 Vista del invernadero utilizado para el secado de lodos y el sistema de extracción de aire, (Thermo-System, 2013) 363
Ilustración 12.30 Invernadero con ventilas laterales para entrada de aire, (Thermo-System, 2013) 363
Ilustración 12.31 Carro eléctrico (Mole) para mover y secar el lodo, (Thermo-System, 2013) 363
Ilustración 12.32 Carro eléctrico en operación, (Thermo-System, 2013) 363
Ilustración 12.33 Sistema de aspas mecánicas para el mezclado de lodo, (Thermo-System, 2013) 364
Ilustración 12.34 Secado solar sin cubierta, (Valencia, 2008) 365
Ilustración 12.35 Secado solar de lodos industriales al aire libre. (Cardoso *et al.*, 2007) 365
Ilustración 12.36 Secado solar de lodos industriales al aire libre. (Cardoso et al., 2007) 370
Ilustración 12.37 Esquema de un sistema de acondicionado en línea de un filtro prensa de placas, (US, EPA, 1979) 378

Ilustración 12.38 Ejemplo de la variación de la concentración y carga másica de la DBO y SST durante un mes, (Metcalf & Eddy, 2003) 382
Ilustración 12.39 Instrumentos de Medición de la Estación Meteorológica Automática: (a) sensor de temperatura; (b) sensor de radiación solar; (c) sensor de dirección y velocidad del viento, (Valencia, 2008) 385
Ilustración 12.40 Cargador frontal con diferentes dispositivos que pueden utilizarse para el mezclado de lodo 388
Ilustración 12.41 Balance de sólidos en el filtro prensa 395
Ilustración 12.42 Balance de sólidos en la centrífuga 395
Ilustración 13.1 Perfil de suelo y su posición relativa con la capa vegetal y el subsuelo, Fuente: J. Ibáñez, 2008 403
Ilustración 13.2 Triángulo de texturas, Fuente: Crespo, 2008 404
Ilustración 13.3 Estructura del suelo y su efecto en la infiltración del agua 405
Ilustración 13.4 Curva características de humedad en tres tipos diferentes de suelo, arcilloso, arenoso y limoso, Fuente: (Service., U.S.D.A. Sóil Conservation, 1971) 406
Ilustración 13.5 Relación entre las características de humedad del suelo y su textura 407
Ilustración 13.6 Ciclo de la materia orgánica en el suelo 411
Ilustración 13.7 Destino del nitrógeno en el suelo 416
Ilustración 13.8 Destino de los metales pesados en el suelo 417
Ilustración 13.9 Disponibilidad de los elementos con relación al pH 419
Ilustración 13.10 Reacciones de la materia orgánica con los metales pesados y la asimilación de estos por las plantas 421
Ilustración 13.11 Prácticas de aplicación agrícola no recomendables, se deben proteger los cuerpos receptores y dosificar adecuadamente el lodo residual 431
Ilustración 13.12 Tratamientos para obtener lodos Clase A, B y C 433
Ilustración 13.13 Esquema de un relleno de lodos, Fuente: CEPIS /OPS (1997) 438
Ilustración 13.14 Métodos utilizados para rellenos de lodos o de codisposición 439
Ilustración 13.15 Sección transversal de una trinchera angosta, EPA(1995) 440
Ilustración 13.16 Sección transversal de una trinchera ancha, Fuente: EPA,1995 440
Ilustración 13.17 Método de relleno en pilas Fuente: EPA, 1995 441
Ilustración 13.18 Aptitud de los diferentes tipos de suelos para la instalación de rellenos de lodos Fuente: CEPIS/OPS 1997 445
Ilustración 13.19 Bajo dren para recolección de lixiviados 447
Ilustración 13.20 Método permeable para el control de gases 448
Ilustración 14.1 Aptitud de los diferentes tipos de suelos para la instalación de rellenos de lodos Fuente: CEPIS/OPS 1997 458
Ilustración 14.2 Filtro de cerámica. Cortesía PTAR de León, Guanajuato 462
Ilustración 14.3 Deshumidificador de biogás 462
Ilustración 14.4 Torre biológica para desulfuración. Cortesía PTAR León, Guanajuato 463
Ilustración 14.5 Filtración y adsorción del biogás. Cortesía de Conagua 463

Ilustración 14.6 Quemador de biogás. Cortesía Conagua 464
Ilustración 14.7 Tanque para almacenamiento de biogás. Cortesía CONAGUA 465
Ilustración 14.8 Sistema de compresión de biogás. Cortesía PTAR de León, Guanajuato 465
Ilustración 14.9 Unidad de cogeneración. Cortesía de Conagua 466
Ilustración 14.10 Microturbinas 467
Ilustración 14.11 Calderas para producción de vapor. Cortesía PTAR de León, Guanajuato. 467
Ilustración 14.12 Celda de combustible 467
Ilustración 14.13 Diagrama del balance de masa para la producción de biogas en un digestor anaerobio, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) y (Von Sperling & Augusto de Lemos Chernicharo, 2005) 468
Ilustración 15.1 Esquema de la PTAR y del sistema de tratamiento de lodos que tiene estabilización aerobia, espesamiento por gravedad y lechos de secado para una PTAR que trata un caudal promedio de agua residual de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 474
Ilustración 15.2 Esquema de la PTAR y del tren de tratamiento de lodos que incluye estabilización aerobia, espesamiento por gravedad en bandas y filtro prensa en bandas para una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 478
Ilustración 15.3 Esquema de la PTAR y del tren de tratamiento de lodos que incluye espesamiento por gravedad, estabilización anaerobia, lechos de secado para la deshidratación de los lodos de una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 481
Ilustración 15.4 Esquema de la PTAR y del tren de tratamiento de lodos que incluye espesamiento por gravedad, estabilización anaerobia y filtros prensa de bandas para la deshidratación de los lodos de una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 20 L·s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 485
Ilustración 15.5 Estimación de costo para trenes de tratamiento con un caudal promedio de 20 L s^{-1} como se muestra en la Tabla 15.2 (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 487
Ilustración 15.6 Esquema de la PTAR y del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 493
Ilustración 15.7 Esquema de la PTAR y del tercer tren de tratamiento de lodos que incluye espesamiento por gravedad en bandas con acondicionamiento químico, estabilización aerobia y filtros banda para la deshidratación de los lodos de una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 496
Ilustración 15.8 Esquema de la PTAR y del cuarto tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 500

Ilustración 15.9 Esquema de la PTAR y del sexto tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 506
Ilustración 15.10 Estimación de costos para trenes de tratamiento con un caudal promedio de 200 L·s^{-1} como se describe en la Tabla 15.23 (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 511
Ilustración 15.11 Esquema de la PTAR y del cuarto tren de tratamiento propuesto para el lodo generado por una PTAR con un caudal promedio de agua residual de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 523
Ilustración 15.12 Estimación de costos para trenes de tratamiento para un caudal promedio de 800 L s^{-1} como se muestra en la Tabla 15.58 (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 525
Ilustración 15.13 Gráfico comparativo de los costos de un mismo tren para las tres diferentes capacidades de plantas de tratamiento de aguas residuales (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 526
Ilustración A.1 Equipo de filtración para determinación de la resistencia especifica de lodos 531
Ilustración A.2 t/v . vs. v 533

Tablas

Tabla 1.1 Principales procesos de tratamiento de agua residual municipal, (Conagua, 2012) 3
Tabla 1.2 Tecnología emergente para el acondicionamiento de lodos (Water Pollution Control Federation, 1995) EPA 2006, WEF 2012) 6
Tabla 1.3 Tecnología emergente para el espesamiento de lodos (EPA, 2006, WEF, 2012) 7
Tabla 1.4 Tecnología emergente para la estabilización de lodos (EPA, 2006, WEF, 2012) 8
Tabla 2.1 Leyes y normas relativas al manejo de lodos residuales 10
Tabla 2.2 Códigos de peligrosidad de los residuos (CPR). (Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT, 2005) 11
Tabla 2.3 Límites máximos permisibles para los constituyentes tóxicos en el extracto PECT, (Norma oficial mexicana, NOM-053-SEMARNAT, 2003) 13
Tabla 2.4 Opciones tecnológicas para la reducción de atracción de vectores, (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002) 15
Tabla 2.5 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos, (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002) 16
Tabla 2.6 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos, (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002) 16
Tabla 2.7 Aprovechamiento de biosólidos, (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002) 17
Tabla 2.8 Frecuencia de muestreo y análisis para lodos y biosólidos, (Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT, 2002) 17
Tabla 3.1 Características del lodo residual según su origen (Metcalf & Eddy, 2003) 35
Tabla 3.2 Equipos y materiales para el muestreo (NOM-004-SEMARNAT-2002) 36
Tabla 3.3 Preservación y tiempo máximo de análisis de muestras de lodo con diferentes parámetros 39
Tabla 3.4 Constituyentes sólidos encontrados en los lodos (adaptado de Metcalf y Eddy, Inc., 2003) 42
Tabla 3.5 Resumen de las propiedades físicas de los lodos (adaptado de Metcalf & Eddy, 2003) 43
Tabla 3.6 Clasificación de los sólidos presentes en el agua y lodos residuales, (Metcalf y Eddy, 2003) 44
Tabla 3.7 Resumen de propiedades biológicas de los lodos adaptada de (Metcalf & Eddy, Wastewater Engineering Treatmentand Reuso, 2003) 46
Tabla 3.8 Resumen de las propiedades químicas en los sólidos (adaptada de Metcalf & Eddy, 2003) 47
Tabla 3.9 Características de los materiales residuales del tratamiento preliminar de cribado adaptado de (US, EPA, 1979) 51
Tabla 3.10 Composición química de sólidos primarios y de lodos activados de purga (adaptada de Metcalf & Eddy, 2003) 51
Tabla 3.11 Características físicas y cantidades de lodos producidos por diferentes operaciones y procesos de tratamiento (adaptado de Metcalf & Eddy, 2003) 52
Tabla 3.12 Eficiencias de remoción de los clarificadores primarios (adaptado de WEF et al., 2009) 58
Tabla 3.13 Producción de lodos en procesos de crecimiento suspendido (WEF,2012) 60

Tabla 3.14 Símbolos utilizados para representar los parámetros cinéticos en los procesos biológicos. (EPA, 1979) 60
Tabla 3.15 Composición del afluente y efluente del tratamiento primario de agua residual municipal 64
Tabla 3.16 Datos de diseño para el cálculo de la producción de lodo residual del sistema de lodos activados, (US, EPA, 1979) y (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 68
Tabla 4.1 Características del agua residual y lodos residuales (WEF et al., 2010) 80
Tabla 4.2 Masa del afluente 80
Tabla 4.3 DBO soluble en el efluente 81
Tabla 4.4 Sedimentador primario 81
Tabla 4.5 Fracción volátil de los lodos primarios 81
Tabla 4.6 Parámetros de operación del reactor de lodos activados 82
Tabla 4.7 Masa de DBO y SST en el efluente 82
Tabla 4.8 Lodo secundario de desecho o purga de lodo del sedimentador secundario 82
Tabla 4.9 Parámetros de operación del espesador de bandas 82
Tabla 4.10 Flujo y características del sobrenadante o reciclo del espesador 83
Tabla 4.11 Parámetros de operación del reactor anaerobio 83
Tabla 4.12 Balance de masa en el reactor anaerobio 83
Tabla 4.13 Balance de masa alrededor del reactor 83
Tabla 4.14 Flujo del sobrenadante del reactor anaerobio y lodo estabilizado anaerobio 84
Tabla 4.15 Masa de DBO y SST en el sobrenadante del digestor anaerobio 84
Tabla 4.16 Características del deshidratador de bandas 84
Tabla 4.17 Lodo deshidratado o torta de lodos 84
Tabla 4.18 Características del filtrado o reciclo del filtro de bandas 85
Tabla 4.19 Flujos de reciclo a la planta de tratamiento 85
Tabla 4.20 Nuevos flujos másicos al sedimentador primario 85
Tabla 4.21 Características del proceso secundario (lodos activados y sedimentador secundario) 86
Tabla 4.22 Balance en el espesador de bandas 87
Tabla 4.23 Parámetros de operación del reactor anaerobio 87
Tabla 4.24 Operación del reactor anaerobio 87
Tabla 4.25 Balance de masa alrededor del reactor anaerobio. 87
Tabla 4.26 Características del sobrenadante y de los lodos estabilizados 88
Tabla 4.27 DBO y SST en el sobrenadante 88
Tabla 4.28 Características de la deshidratación 88
Tabla 4.29 Lodo deshidratado 88
Tabla 4.30 Características del filtrado 88
Tabla 4.31 Resumen de flujos y características del reciclo 88
Tabla 5.1 Características de las bombas centrífugas (WEF, 1994) 90
Tabla 5.2 Clasificación de las bombas centrífugas 90
Tabla 5.3 Características de bombas de desplazamiento positivo (WEF,1994) 91
Tabla 5.4 Bombas para lodos por principio de funcionamiento 98
Tabla 5.5 Aplicación de bombas para aguas residuales 99

Tabla 5.6 Encuesta que muestra las bombas más utilizadas para lodos 99
Tabla 5.7 Valores del coeficiente CM para lodos 100
Tabla 5.8 Piezas especiales y longitudes equivalentes 103
Tabla 6.1 Reducción del volumen del lodo mediante tratamientos físicos, (Mijaylova , 1999) 117
Tabla 6.2 Dosis típicas de cloruro férrico y cal para la deshidratación de lodos de aguas residuales municipales, (WEF, et al.,2012) 124
Tabla 6.3 Polímeros catiónicos en polvo, (US, EPA, 1979) 125
Tabla 6.4 Ejemplo de Polímeros catiónicos líquidos, (US, EPA, 1979) 126
Tabla 6.5 Dosis típicas de acondicionadores químicos para el espesamiento por gravedad (WEF et al., 2012) 132
Tabla 6.6 Concentraciones típicas de lodos no espesados y espesados y cargas superficiales de sólidos recomendadas para el diseño de los espesadores, (Metcalf & Eddy, 2003) 136
Tabla 6.7 Datos típicos de operación de los espesadores por flotación con aire disuelto, (WEF, et al., 2012) 138
Tabla 6.8 Carga de sólidos típicos de unidades de espesamiento por flotación con aire disuelto, (Metcalf & Eddy, 2003) 139
Tabla 6.9 Carga hidráulica típica de un espesador por gravedad en bandas, (Metcalf & Eddy, 2003) 141
Tabla 6.10 Ventajas y desventajas del espesamiento por gravedad, (EPA, 1979) 146
Tabla 6.11 Ventajas y desventajas del espesamiento por flotación con aire disuelto, (EPA, 1979) 146
Tabla 6.12 Ventajas y desventajas del espesamiento por gravedad en bandas, (US, EPA, 1979) 147
Tabla 6.13 Ventajas y desventajas del espesamiento en centrífugas, (US, EPA, 1979) 147
Tabla 6.14 Ventajas y desventajas del espesamiento rotatorio, (EPA, 1979) 147
Tabla 6.15 Cargas uniformes típicas (WEF, et al., 2012) 148
Tabla 6.16 Guía sobre la carga pico de sólidos y la carga hidráulica pico de los espesadores de bandas por gravedad (WEF, et al., 2012) 152
Tabla 6.17 Características del lodo para el dimensionamiento del espesador por gravedad, (Metcalf & Eddy, 2003) 158
Tabla 6.18 Características para el diseño del espesador 160
Tabla 7.1 Características para el funcionamiento de reactores termofílicos y mesofílicos 169
Tabla 7.2 Destrucción de sólidos volátiles en función del tiempo de estabilización (Metcalf & Eddy, 2003) 174
Tabla 7.3 Parámetros típicos para el diseño de reactores anaerobios de lodos, (Sperling & Chernicharo, 2005) 183
Tabla 7.4 Características del reactor y del proceso de estabilización anaerobio 186
Tabla 8.1 Ventajas y Desventajas de la estabilización aerobia (WEF, et al., 2012) 193
Tabla 8.2 Criterios de diseño para la estabilización aerobia, (Metcalf & Eddy, 2003) 194
Tabla 8.3 Características del sobrenadante, (US, EPA, 1979) 200
Tabla 8.4 Criterios de diseño (US, EPA, 1979) 201
Tabla 8.5 Principales resultados para el diseño del reactor 203
Tabla 8.6 Datos de laboratorio para el diseño de un reactor continúo (t=20°C) 204

Tabla 8.7 Balance de materia para condiciones de invierno, sobre una disminución del 80 por ciento de SSV 205
Tabla 8.8 SSV degradables remanentes función del tiempo de aeración 206
Tabla 8.9 Balance de materia para funcionamiento en verano 208
Tabla 8.10 Principales resultados para el diseño del reactor 211
Tabla 9.1 Materiales acondicionadores para el composteo (Ramírez, et al., 1994) 215
Tabla 9.2 Principales sistemas de composteo 218
Tabla 9.3 Parámetros para el control del proceso 219
Tabla 9.4 Métodos para medir la estabilidad de la composta 220
Tabla 9.5 Otros parámetros utilizados para medir la estabilidad de la composta (Haug, 1993) 220
Tabla 9.6 Equipos para el composteo 220
Tabla 9.7 Comparación de abonos y composta de lodo residual 222
Tabla 9.8 Consideraciones para el diseño de un sistema de composteo 223
Tabla 9.9 Características de los materiales al inicio del proceso de composteo 225
Tabla 9.10 Área perforada a lo largo de un difusor (EPA, 1986) 228
Tabla 9.11 Criterios generales para el diseño de biofiltros con composta (Sandoval, 2000) 229
Tabla 9.12 Características del agua residual de una planta de tratamiento 231
Tabla 9.13 Características de los materiales para el composteo 233
Tabla 9.14 Capacidad calorífica y relación C/N 233
Tabla 9.15 Proporción de agua y sólidos en 1 kilo de lodo 233
Tabla 9.16 Proporción de agua y sólidos en 1 kilo de hojas 234
Tabla 9.17 Proporción de agua y sólidos en 1 kilo de madera 234
Tabla 9.18 Cálculo de materiales requeridos por día 234
Tabla 9.19 Balance de masa por día 235
Tabla 9.20 Energía disponible en el sistema 236
Tabla 9.21 Manejo diario de materiales 237
Tabla 9.22 Cálculo del área de composteo 237
Tabla 9.23 Cálculo del área de curado 239
Tabla 9.24 Cálculo para el área de almacenamiento de la composta 240
Tabla 9.25 Cálculo del área de materiales acondicionadores para 7 dias 241
Tabla 9.26 Áreas requeridas para el sistema de composteo 242
Tabla 10.1 Reducción de patógenos durante el vermicomposteo en un sistema a escala real. Eastman, (1999) 251
Tabla 10.2 Clasificación taxonómica de Eisenia foetida, Fauna Europea, 2013 260
Tabla 10.3 Áreas y dimensiones para un sistema de vermicomposteo 270
Tabla 10.4 Equipos para el sistema de vermicomposteo 271
Tabla 10.5 Parámetros de control del vermicomposteo 273
Tabla 10.6 Materiales con alto contenido de carbono y nitrógeno, (Dickson, et al., 1991) 277
Tabla 10.7 Cálculos para la determinación de la relación carbono-nitrógeno en vermicompostas, DOF, 2008 278
Tabla 10.8 Características de lodos de curtiduría y lirio acuático 279

Tabla 10.9 Características de un lodo residual y un material acondicionador 279
Tabla 10.10 Materiales para alimentación de las lombrices 283
Tabla 10.11 Pronostico de producción de lombrices y humus, Arancon y Clive, 2007 288
Tabla 10.12 Específicaciones Fisicoquímicas del Humus de Lombriz (vermicomposta) 289
Tabla 10.13 Costos de inversión y operación para un sitio de vermicomposteo de 1 tonelada de lodo líquido por día, (Donovan, 1981) 292
Tabla 11.1 Reacciones con constituyentes inorgánicos 300
Tabla 11.2 Dosis de Cal Requerida para Estabilización de Lodo, en la Planta de Lebanon, Ohio.Fuente: Farrel (1974) 309
Tabla 11.3 Determinaciones de Dosis de Cal a Nivel Piloto para Mantener 309
Tabla 11.4 Criterios recomendados en Estados Unidos y Europa para el diseño de sistemas de estabilización alcalina de lodos 311
Tabla 11.5 Producción de lodos en la planta de tratamiento 317
Tabla 11.6 Parámetros de control y monitoreo del sistema de encalado 321
Tabla 11.7 Características del lodo utilizado en las pruebas de jarras 321
Tabla 11.8 Cambios en la composición de los sólidos después del encalado 323
Tabla 11.9 Características del lodo utilizado en las pruebas de jarras 324
Tabla 11.10 Microorganismos patógenos antes y después del encalado 326
Tabla 12.1 Efectos del acondicionamiento con químicos inorgánicos, polímeros orgánicos, o calentamiento sobre la mezcla de lodo primario y lodo residual del sistema de lodos activados, (US, EPA, 1985) 328
Tabla 12.2 Dosis típicas de polímeros adicionados a los filtros prensa de bandas, (US, EPA, 1979) 331
Tabla 12.3 Dosis típicas de polímero seco adicionado a las centrífugas para el acondicionamiento de los lodos previo a la deshidratación, (US, EPA, 1979) 331
Tabla 12.4 Datos del desempeño de los lecho de secado por vacío para diferentes tipos de lodos, (Metcalf & Eddy, 2003) 341
Tabla 12.5 Datos del desempeño de las centrífugas de tornillo para diferentes tipos de lodos, (Metcalf & Eddy, , 2003) 345
Tabla 12.6 Datos del desempeño de un filtro prensa de bandas para diferentes tipos de lodo, (Metcalf & Eddy, 2003) 350
Tabla 12.7 Resultados obtenidos de secado solar, (Thermo-System, 2013) 364
Tabla 12.8 Comparación de los diferentes tipos de deshidratación, (WEF, 1998) y (US, EPA, 1979) 367
Tabla 12.9 Resumen de criterios de diseño para lechos de arena, (US, EPA, 1979) 369
Tabla 12.10 Datos para el ejemplo del diseño de un filtro prensa de bandas, (Metcalf & Eddy, 2003) 380
Tabla 12.11 Parámetros monitoreados en los experimentos de secado solar, (Valencia, 2008) 384
Tabla 12.12 Resultados obtenidos durante los experimentos de secado solar, (Valencia, 2008) 385
Tabla 12.13 Capacidad sugerida y número de centrífugas. (Von sperling & Augusto de Lemos Chernicharo, 2005) 389
Tabla 12.14 Características del polímero 392
Tabla 12.15 Equipo requerido para el sistema de deshidratación con centrífuga 397
Tabla 12.16 Equipo requerido para el sistema de filtro prensa de bandas 397

Tabla 13.1 Proporción de componentes en el suelo 403
Tabla 13.2 Clases de permeabilidad para suelo saturado 404
Tabla 13.3 Número aproximado de organismos encontrados comúnmente en la superficie del suelo 410
Tabla 13.4 Supervivencia de patógenos en diferentes sustratos 414
Tabla 13.5 Factores que influyen en la supervivencia de bacterias y virus en el suelo 415
Tabla 13.6 Factores que influyen en el movimiento de los virus hacia el acuífero 415
Tabla 13.7 Concentraciones máximas (kg/ha) de metales, permitidas en la aplicación al suelo de acuerdo a su capacidad de intercambio catiónica 420
Tabla 13.8 Sensibilidad de cultivos a metales pesados 422
Tabla 13.9 Porcentajes de pendientes para la aplicación de lodo residual 423
Tabla 13.10 Condiciones requeridas para la zona amortiguadora 423
Tabla 13.11 Factores de mineralización 426
Tabla 13.12 Características del lodo residual para el ejemplo 1 427
Tabla 13.13 Tratamiento y disposición de lodos de las PTARS de Querétaro, Conagua, 2012 435
Tabla 13.14 Consideraciones generales para la selección del sitio 443
Tabla 13.15 Características de diseño más importantes de las trincheras Fuente: EPA(1995) 444
Tabla 13.16 Características más importantes de las áreas de relleno, Fuente: EPA (1995) 444
Tabla 13.17 Permeabilidad de los suelos saturados 444
Tabla 13.18 Recubrimientos para rellenos de lodos 446
Tabla 13.19 Composición de gases encontrados en rellenos de lodos (por ciento). Fuente: EPA (1987) 447
Tabla 13.20 Localización de los puntos de muestreo en el relleno de lodos 450
Tabla 13.21 Parámetros más importantes en el control de contaminantes de un relleno de lodos 450
Tabla 14.1 Comparación del biogas generado en reactores y rellenos sanitarios con el gas natural puro 454
Tabla 14.2 Componentes típicos e impurezas en el biogas 455
Tabla 14.3 Tiempo de retención de sólidos (SRT) recomendados para reactores anaerobios de mezcla completa (Metcalf & Eddy,2003) 456
Tabla 14.4 Usos del biogás dentro y fuera de la planta de tratamiento 457
Tabla 14.5 Calidades del biogás requerido para diferentes aplicaciones en Europa (Deublein and Steinhauser,2011) 460
Tabla 14.6 Tecnologías para la descontaminación del biogás (Deublein and Steinhauser,2011) 461
Tabla 14.7 Equipo utilizado para el tratamiento del biogás 462
Tabla 14.8 Datos del lodo primario y secundario para estimar la producción de biogas en terminos a la reducción de SSV 466
Tabla 14.9 Equipos utilizados para producir energía en sistemas de uso de biogás 467
Tabla 14.10 TRS sugeridos para su uso en el diseño de reactores anaerobios de mezcla completa, (Metcalf & Eddy, 2003) 469
Tabla 15.1 Caracterización del agua residual de una PTAR (IMTA, 2013) 472
Tabla 15.2 Trenes de tratamiento para un caudal de 20 L·s-1 473
Tabla 15.3 Características del lodo generado en la PTAR con un caudal promedio de 20 L s-1, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 474

Tabla 15.4 Resultados del diseño del sistema de bombeo del lodo primario y secundario al tren de tratamiento del lodo de la PTAR que trata un caudal de 20 L s-1 de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 474
Tabla 15.5 Resultados del diseño del sistema de estabilización aerobia del primer tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 20 L·s-1 de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 475
Tabla 15.6 Resultados del diseño del sistema de espesamiento por gravedad del primer tren de tratamiento para una PTAR que trata un caudal de 20 L s-1 de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 476
Tabla 15.7 Resultados del diseño del sistema de lechos de secado del primer tren de tratamiento de lodo de la PTAR con un caudal de 20 L s-1, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 476
Tabla 15.8 Resultados de la estimación de los costos del sistema de bombeo del lodo primario y secundario al sistema de espesamiento para una PTAR con un caudal de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 477
Tabla 15.9 Resultados de la estimación de los costos del primer tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 20 L s-1 de agua residual cruda, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 477
Tabla 15.10 Resultados del diseño del sistema de estabilización aerobia correspondiente al segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 20 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 479
Tabla 15.11 Resultados del diseño del sistema de espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico correspondiente al segundo tren de tratamiento de lodo de la PTAR que trata un caudal de 20 L s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 479
Tabla 15.12 Resultados del diseño del filtro prensa de bandas para la deshidratación del lodo generado por una PTAR que trata un caudal de 20 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 480
Tabla 15.13 Costos de construcción y equipamiento del sistema de espesamiento y deshidratación del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 480
Tabla 15.14 Resultados de la estimación de los costos del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 480
Tabla 15.15 Resultados del diseño del sistema de espesamiento por gravedad del lodo de la PTAR que trata un caudal de 20 L·s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 482
Tabla 15.16 Diseño del equipo de estabilización anaerobia de lodos del tercer tren de tratamiento para el lodo generado por una PTAR que trata un caudal de 20 L s-1 de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 483

Tabla 15.17 Diseño del equipo de lechos de secado para la deshidratación de lodos generados por una PTAR que trata un caudal de 20 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 484
Tabla 15.18 Resultados de la estimación de los costos del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 20 L·s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 484
Tabla 15.19 Resultados del diseño del sistema de deshidratación del lodo de la PTAR que trata un caudal de 20 L s^{-1} de agua residual correspondiente al cuarto tren de tratamiento de lodos propuesto, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 486
Tabla 15.20 Costos de construcción y equipamiento del sistema de deshidratación del cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 486
Tabla 15.21 Costos del cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 486
Tabla 15.22 Resumen de los costos de las cuatro diferentes configuraciones propuestas para el tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 20 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 487
Tabla 15.23 Trenes de tratamiento para un caudal de 200 L s^{-1} 488
Tabla 15.24 Características del lodo primario y secundario generado en la PTAR con un caudal promedio de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 489
Tabla 15.25 Datos del diseño del sistema de bombeo del lodo primario y secundario al tren de tratamiento del lodo de la PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 489
Tabla 15.26 Resultados del diseño del sistema de estabilización aerobia de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 490
Tabla 15.27 Diseño del sistema de espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 491
Tabla 15.28 Resultados del diseño del sistema de lechos de secado para la deshidratación de lodo de la PTAR con un caudal de 200 L s-1, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 491
Tabla 15.29 Costos del sistema de bombeo del lodo primario y secundario al sistema de espesamiento para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 492
Tabla 15.30 Resultados de la estimación de los costos del primer tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 492
Tabla 15.31 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo del segundo tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 493

Tabla 15.32 Diseño del sistema de espesamiento por flotación con aire disuelto del segundo tren de tratamiento de lodo propuesto para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 494
Tabla 15.33 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo para deshidratación del segundo tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 494
Tabla 15.34 Diseño de la centrífuga del segundo tren de tratamiento propuesto para la deshidratación del lodo generado por una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 495
Tabla 15.35 Costos del acondicionamiento químico de lodos del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 495
Tabla 15.36 Resultados de la estimación de los costos del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 495
Tabla 15.37 Diseño del sistema de espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico del tercer tren de tratamiento para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 497
Tabla 15.38 Resultados del diseño del sistema de estabilización aerobia de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 497
Tabla 15.39 Diseño del filtro banda con acondicionamiento de lodos del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 498
Tabla 15.40 Costos de construcción y equipamiento del sistema de espesamiento y deshidratación del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 498
Tabla 15.41 Resultados de la estimación de los costos del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 200 L·s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 500
Tabla 15.42 Diseño del sistema de estabilización anaerobia del cuarto tren propuesto para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 501
Tabla 15.43 Diseño del sistema de deshidratación del lodo de la cuarta configuración del tratamiento de lodos generados por una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 502
Tabla 15.44 Costos de construcción y equipamiento del sistema de espesamiento y deshidratación del cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 502
Tabla 15.45 Resultados de la estimación de los costos del cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 200 L s-1, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 502

Tabla 15.46 Diseño del sistema de espesamiento por gravedad del quinto tren de tratamiento de lodos propuesto para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 503
Tabla 15.47 Diseño del sistema de estabilización anaerobia de lodos correspondiente al quinto tren propuesto para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 504
Tabla 15.48 Diseño del sistema de lechos de secado del quinto tren propuesto para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 504
Tabla 15.49 Resultados de la estimación de los costos del quinto tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 506
Tabla 15.50 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo del sexto tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1} (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 506
Tabla 15.51 Diseño del sistema de espesamiento por flotación con aire disuelto del sexto tren de tratamiento de lodo propuesto para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 507
Tabla 15.52 Diseño del sistema de estabilización anaerobia de lodo para l sexta configuración del tratamiento de lodos generados por una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 507
Tabla 15.53 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo para deshidratación del sexto tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 508
Tabla 15.54 Diseño de la centrífuga del sexto tren de tratamiento propuesto para la deshidratación del lodo generado por una PTAR que trata un caudal de 200 L·s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 508
Tabla 15.55 Costos del acondicionamiento químico de lodos del sexto tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 509
Tabla 15.56 Resultados de la estimación de los costos del sexto tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 200 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 509
Tabla 15.57 Resumen de los costos de los seis trenes de tratamiento de lodos propuestos para una PTAR con un caudal de 200 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 510
Tabla 15.58 Trenes de tratamiento para un caudal de 800 L·s^{-1} 510
Tabla 15.59 Características del lodo primario y secundario generado en la PTAR con un caudal promedio de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 512
Tabla 15.60 Datos del diseño del sistema de bombeo del lodo primario y secundario al tren de tratamiento del lodo de la PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013). 512

Tabla 15.61 Resultados del diseño del sistema de espesamiento por gravedad en bandas y acondicionamiento químico de la primera configuración propuesta del sistema de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal promedio de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 513
Tabla 15.62 Diseño del sistema de estabilización aerobia del primer tren de tratamiento de lodo para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 513
Tabla 15.63 Resultados del diseño del sistema de deshidratación del primer tren de tratamiento de lodos de la PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 514
Tabla 15.64 Costos del sistema de bombeo del lodo primario y secundario al sistema de espesamiento para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 514
Tabla 15.65 Costos de construcción y equipamiento del sistema de espesamiento y deshidratación del primer tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 514
Tabla 15.66 Resultados de la estimación de los costos del sexto tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 514
Tabla 15.67 Diseño del sistema de estabilización aerobia de lodos del segundo tren de tratamiento del lodo de la PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 516
Tabla 15.68 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo del segundo tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 516
Tabla 15.69 Diseño del sistema de espesamiento por flotación con aire disuelto del segundo tren de tratamiento de lodo propuesto para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 517
Tabla 15.70 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo para deshidratación del segundo tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 517
Tabla 15.71 Diseño de la centrífuga del segundo tren de tratamiento propuesto para la deshidratación del lodo generado por una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 518
Tabla 15.72 Costos del acondicionamiento químico de lodos del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 518
Tabla 15.73 Resultados de la estimación de los costos del segundo tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 518

Tabla 15.74 Diseño del sistema de estabilización anaerobia de lodos correspondiente al tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L·s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 520
Tabla 15.75 Diseño del sistema de deshidratación del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 520
Tabla 15.76 Costos de construcción y equipamiento del sistema de espesamiento y deshidratación del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 521
Tabla 15.77 Resultados de la estimación de los costos del tercer tren de tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 521
Tabla 15.78 Diseño del sistema de espesamiento por gravedad sin acondicionamiento químico correspondiente al cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 521
Tabla 15.79 Diseño del sistema de estabilización anaerobia de lodo para la cuarta configuración del tratamiento de lodos generados por una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 522
Tabla 15.80 Resultados del diseño del sistema de acondicionamiento químico de lodo para deshidratación del cuarto tren de tratamiento propuesto para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 522
Tabla 15.81 Diseño de la centrífuga del cuarto tren de tratamiento propuesto para la deshidratación del lodo generado por una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 523
Tabla 15.82 Costos del acondicionamiento químico de lodos del cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 524
Tabla 15.83 Resultados de la estimación de los costos del cuarto tren de tratamiento de lodos para una PTAR que trata un caudal de 800 L s^{-1} de agua residual, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 525
Tabla 15.84 Resumen de los costos de las cuatro diferentes configuraciones propuestas para el tratamiento de lodos para una PTAR con un caudal de 800 L s^{-1}, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 525
Tabla 15.85 Costos de algunos equipos de los diferentes trenes de tratamiento, (Hydromantis-Software CapdetWorks, 2013) 526