

PROPUESTA DE MANEJO DE LOS LODOS RESIDUALES DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE LA CIUDAD INDUSTRIAL DEL VALLE DE CUERNAVACA, ESTADO DE MORELOS, MÉXICO

Ma. Laura ORTIZ-HERNÁNDEZ¹, Margarita E. GUTIÉRREZ-RUIZ² y Enrique SÁNCHEZ-SALINAS¹

¹Laboratorio de Investigaciones Ambientales, Universidad Autónoma de Morelos. Av. Universidad 1001, Col. Chamilpa, Cuernavaca, Morelos, México

²Laboratorio de Análisis Físicos y Químicos del Ambiente, Instituto de Geografía, UNAM, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510 México, D.F.

(Recibido septiembre 1992, aceptado noviembre 1995)

Palabras clave: lodos residuales, Eccaciv, tratamiento de lodos, metales pesados

RESUMEN

Las aguas industriales y domésticas de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, Morelos, México son tratadas en una planta de lodos activados y una vez depuradas, se utilizan para el riego agrícola. Los lodos producidos diariamente, que se calculan en aproximadamente 20 toneladas, durante 15 años se dispusieron en los alrededores de la planta y actualmente se envían a un relleno sanitario ubicado en el occidente del estado de Morelos, que no cumple con los requisitos de la legislación mexicana. Este estudio se realizó para caracterizar los lodos y proponer su uso como mejorador de suelos, utilizando las siguientes técnicas de análisis: fluorescencia de rayos X, microscopía electrónica y espectroscopías de emisión, absorción atómica y UV visible. También se llevaron a cabo análisis microbiológicos. Los lodos son ricos en materia orgánica (MO), macro y micro nutrientes y únicamente del 1 al 10% de la concentración total de elementos tóxicos se encuentran en formas solubles. Los resultados microbiológicos muestran la presencia de *Salmonella sp* y coliformes totales. Por su composición, los lodos se consideran adecuados para mejorar la calidad de los suelos y se plantea una ecuación para calcular las dosis de aplicación máximas y evitar la acumulación de metales potencialmente tóxicos.

ABSTRACT

The industrial and municipal wastewaters of the industrial park at Cuernavaca's Valley in the State of Morelos, Mexico, are treated by an activated-sludge plant. The treated effluent is used to irrigate cultivated lands. The plant produces 20 tons of sewage sludges (20% wt) daily. During the last decade they have been dumped in the surroundings. Nowadays, and due to the neighbor's complaints, the sludges are disposed in a landfill located in the western portion of the state. The site does not comply with the Mexican regulations and there is a risk of groundwater pollution. The aim of this paper is to characterize the sludges and propose their use as soil amendment. The analysis were done by X-ray fluorescence, emission spectroscopy, electronic microscopy, flame atomic absorption and UV-visible fluorescence. Microbiological analysis were also carried out. The results showed that the sludges contained a high concentration of organic matter and macro and micro nutrients. Only 1 to 10% of the total concentration of toxic elements were are present as soluble species. Pathogens were also found. Toxic metal accumulation and pathogens dispersion can be avoided by composting the sludges and controlling their application rates. A formula to estimate the optimum sludge doses is presented.

INTRODUCCIÓN

Se les llaman «lodos residuales» a los residuos sólidos remanentes del proceso de tratamiento de aguas de desecho, que están compuestos por materia orgánica residual no descompuesta, microorganismos, compuestos no biodegradables y/o potencialmente tóxicos y sales inocuas y/o potencialmente tóxicas que se han removido durante el tratamiento. Pueden estar presentes en sus formas originales o haber sufrido transformaciones durante el proceso.

En México existen 403 plantas de tratamiento de aguas residuales, con una capacidad total instalada de 30 m³/seg, de los cuales se envían 18 m³/seg a 226 plantas que tratan aguas residuales municipales y 12 m³/seg a 177 plantas que depuran aguas residuales industriales. No obstante, sólo se tiene capacidad para tratar el 5.54% del total de las aguas residuales generadas (Arroyo y Molina 1990). Aunque no existe información actualizada sobre la cantidad de lodos producidos en todo el territorio nacional, DGACSH-SARH (1985) menciona que las principales plantas de tratamiento (cuatro municipales y tres industriales) generaron en ese año 222,176 ton de lodos. Un cálculo aproximado realizado con base en la cantidad de agua tratada diariamente, en el promedio nacional de la concentración de los sólidos disueltos y suspendidos totales y en el intervalo de la eficiencia de remoción de las plantas de tratamiento, permite suponer que se generan entre 28 y 84 millones de ton de lodos/año.

Las técnicas que han sido utilizadas para el tratamiento y la disposición final de residuos sólidos en otros países y que pueden aplicarse al manejo de lodos residuales en México son las siguientes: tratamientos anaerobio y aerobio, disposición en suelos, tratamientos térmicos (pirólisis y/o incineración) y confinamiento controlado. Por su bajo costo, simplicidad y beneficios para la agricultura, la mayor parte de los lodos se utilizan como mejoradores de suelo y solamente algunos se confinan o se incineran (Lester 1987a), ya que estos últimos métodos presentan riesgos difícilmente aceptables por la comunidad, en el caso de los confinamientos, la contaminación de acuíferos y en el de la incineración, emisiones a la atmósfera y la generación cenizas peligrosas.

El uso de lodos residuales como mejoradores de suelos con o sin tratamiento previo, dependiendo de las condiciones particulares de cada caso, presenta las siguientes bondades (Jaakko 1970, Eger 1978, Pattero 1979, Coker y Matthews 1983):

- se aportan al suelo los nutrimentos que el lodo contiene y que son elementos esenciales para el crecimiento de las plantas
- la materia orgánica mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, tales como estructura, permeabilidad

y poder de amortiguamiento.

De acuerdo con Gerba (1983), Matthews (1984), Page *et al.* (1987) y Lester (1987b) para poder aplicar los lodos en suelos, es necesario que:

- los elementos potencialmente tóxicos se presenten en formas insolubles y bajo las condiciones del suelo, no tengan posibilidad de solubilizarse
- los microorganismos patógenos contenidos en los lodos residuales se eliminen por exposición a los agentes ambientales que abaten su población, como las altas temperaturas
- los compuestos orgánicos se degraden y no contaminen cuerpos de agua superficiales y subsuperficiales.

Ortiz (1994) considera que antes de aplicar lodos a un suelo, es necesario llevar a cabo:

- la caracterización de los lodos, especialmente en lo referente a elementos inorgánicos acumulables, ya que en el caso de los compuestos orgánicos se debe cuidar su degradación pues no es posible una caracterización exhaustiva (ya que se considera que existen aproximadamente 400,000 sustancias peligrosas en este tipo de sistemas y una vez mezclado con un suelo está cantidad aumenta)
- la determinación óptima de las dosis y los lapsos de aplicación mediante experimentos en invernadero y en campo
- el composteo de los lodos, ya que la descomposición termofílica de los constituyentes orgánicos, producida por microorganismos aerobios, permite obtener un material relativamente estable, tal como el humus (Ehret y Walker 1977).

Con respecto al composteo, cabe considerar que el proceso termina hasta que el producto es almacenado sin que cause molestias, tales como malos olores, y cuando el calor que se origina durante la descomposición de la materia orgánica, pueda alcanzar temperaturas letales para que los microorganismos patógenos sean abatidos y la composta final sea manejada en forma segura (Kubota 1984). Burge *et al.* (citado por EPA 1985), recomienda diez días de composteo para lograr la destrucción de *Salmonella* y coliformes. La EPA (1985) establece en la norma 40CFR-257, una temperatura mínima de 40°C por cinco días consecutivos y si se quiere un mayor nivel de seguridad es necesario mantener 55°C durante 15 días.

La materia orgánica de la composta, es benéfica como mejoradora del suelo, ya que ha sido estabilizada, descompuesta lentamente y permanece en esas condiciones por más tiempo, comparándola con la materia orgánica de los desechos que no han sido sometidos a este proceso (EPA 1985). La composta de lodos es adecuada para cualquier tipo de suelos, pero principalmente para aquellos con proporciones altas de arenas o arcillas (Epstein y Parr 1977).

Considerando la magnitud actual del problema de

manejo de lodos residuales y su incremento en el futuro próximo, se realizó una investigación en una área representativa de la problemática nacional, con el objeto de plantear una alternativa viable, acorde con la composición de los lodos. Se seleccionó la planta de tratamiento de las aguas residuales de la zona industrial del Valle de Cuernavaca, ya que existían antecedentes documentados sobre problemas de manejo de los lodos residuales.

ÁREA DE ESTUDIO

En las inmediaciones de Cuernavaca, capital del estado de Morelos, México, se encuentra la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca (Civac), la cual fue fundada en 1963. La Civac cuenta con una área habitacional, otra comercial y de servicios y una zona propiamente industrial en donde se han establecido empresas fabricantes de productos químicos, farmacéuticos y de tocador, artículos de plástico, maquinaria y herramientas metálicas, aparatos eléctricos y electrónicos, textiles, instrumental médico, placas presensibilizadas para la industria gráfica, muebles, zapatos deportivos e industria de la rama automotriz (terminal y auxiliar), entre otras. Con el objeto de controlar la contaminación causada por las aguas residuales procedentes de las plantas industriales, se organizó una empresa mixta (gobierno e industria) que es la encargada del manejo y tratamiento de las mismas. Esta empresa, llamada Eccaciv (Empresa para el Control de la Contaminación de las Aguas de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca), construyó a principios de la década de 1970, una planta de tratamiento de aguas residuales en el municipio de Jiutepec, que opera con los recursos económicos generados por el cobro del tratamiento del agua de la industria (Salazar 1991). Esta planta utiliza un proceso denominado «lodos activados», que básicamente se lleva a cabo en dos fases: en la primera, el agua recibe un tratamiento biológico (microorganismos aerobios), durante el cual se oxidan los compuestos orgánicos disueltos o suspendidos del agua residual y se convierten a CO_2 , H_2O y material celular, con lo que se producen partículas sólidas. En la segunda, se realiza la separación de la fase acuosa (agua parcialmente tratada) de las partículas sólidas. Se generan 20 ton de lodos residuales/día, con un contenido de sólidos de aproximadamente 20% (4 ton/día, base seca). Originalmente se había pensado disponer los lodos ya secos en terrenos aledaños, para lo cual se construyeron lechos de secado con un fondo de grava y arena. No obstante, nunca se logró que los lodos se secaran por evaporación solar, pues durante la operación de la planta de tratamiento se adicionaban sales de aluminio para formar el hidróxido hidratado que favorece la floculación de los lodos, pero retiene fuertemente a las moléculas de agua evitando su evaporación.

Cuando la cantidad de lodos húmedos acumulada en los

patios fue muy grande, la empresa los envió a depositar (a cielo abierto) sin ningún tratamiento previo, a terrenos cercanos. Durante las épocas de lluvias, los escurrimientos de los depósitos se encausaban hacia las parcelas, causando problemas a los cultivos. Además, los lodos provocaban malos olores y la presencia de grandes cantidades de organismos nocivos, especialmente moscas, que afectaban la calidad de vida de los vecinos. Después de un tiempo se presentaron diversas quejas ante las autoridades responsables para que se resolviera el problema, por lo que la entonces Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (Sedue) exigió a la empresa Eccaciv disponer en forma segura sus lodos residuales. La empresa Eccaciv recolectó sus lodos de los tiraderos y los transportó a un basurero a cielo abierto que está ubicado en el ejido Tetlama al oeste del estado de Morelos, en las faldas del cerro Colotepec. Los lodos formaron acumulaciones pantanosas, que dificultaban las labores de recolección de los objetos con valor presentes en la basura y en más de una ocasión provocaron la muerte de animales, ya que cuando buscaban alimentos se hundían en ellas. Con las lluvias, en forma análoga a lo que sucedía en los anteriores sitios de disposición, se originaron escurrimientos que afectaban a los terrenos aledaños y a un arroyo cercano.

Como la problemática continuaba, así como la presión de las autoridades, desde hace aproximadamente tres años, los lodos se empezaron a cubrir con tierra que se obtiene del mismo sitio de disposición. Esta operación no cumple con los requerimientos de la legislación vigente. Se puede observar a simple vista que no se cubren adecuadamente los lodos, no han desaparecido los malos olores ni las moscas y siguen fluyendo los lixiviados hacia los cuerpos de agua superficiales cercanos. Durante la excavación, que permite obtener el material para cubrir el relleno, se destruye la vegetación original del sitio (selva baja caducifolia), especialmente en la parte superior del cerro Colotepec. Además, como el relleno se encuentra ubicado sobre una estructura geológica permeable, sigue presente el riesgo potencial de contaminación de las aguas subsuperficiales. Tampoco el transporte cumple con las normas vigentes, por lo que se diseminan lodos durante su traslado, especialmente se afecta a las orillas de la carretera y a los poblados localizados en la ruta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo y pretratamiento

Para los análisis físicos y químicos se colectaron 84 muestras de lodos, con una frecuencia diaria durante 6 semanas distribuidas en año, por dos años. Con las siete muestras diarias se preparó una composta, obteniéndose un total de 12 muestras. Para cada una se colectó ≈ 1 kg de lodos del

filtro-prensa en un recipiente de polietileno, conservándose en refrigeración para su traslado al laboratorio, donde se secaron a 100°C hasta peso constante. Se molieron en un mortero de ágata y se tamizaron a través de una malla de 0.5 mm. Los lodos secos se guardaron en frascos de vidrio con boca ancha y con tapa de plástico (EPA 1988).

Para los análisis microbiológicos se esterilizaron cajas de Petri, se tomaron directamente muestras del filtro-prensa del tanque aireador y de lodos que se habían acumulado treinta días. Se colocaron en las cajas de Petri conservándolas en hielo y de inmediato se trasladaron al laboratorio.

Análisis

a. cualitativos y de rutina

Se realizaron análisis cualitativos con equipo de fluorescencia de rayos X (Philips-1410) y de microscopía electrónica (Jeol-35C). A partir de los resultados se definieron los elementos a cuantificar. Los análisis de rutina se realizaron por duplicado y con un blanco. Se utilizaron estándares NIST-Standard Reference Materials (SRM) 2709, de composición similar a las muestras (materia orgánica con sales inorgánicas). Se determinaron los siguientes parámetros de rutina de acuerdo con la metodología informada por Ortiz *et al.* (1993):

- pH en suspensión 1:5 lodo-agua y empleando un potenciómetro Conductronic pH 20, con electrodo Sargent Welch modelo S 30072-15
- densidad aparente (g/cm^3)
- % de humedad, por pérdida de peso
- % de sólidos, por diferencia entre 100 y el porcentaje de humedad
- conductividad eléctrica, usando un conductímetro Cole Parmer 1481-00
- aniones solubles (carbonatos, bicarbonatos y cloruros)
- capacidad de intercambio catiónico, utilizando al sodio como catión reemplazante y cuantificándolo después con un espectrofotómetro de flama Corning 400
- cationes intercambiables (calcio, magnesio, sodio y potasio), desplazándolos mediante el catión amonio de sus posiciones de intercambio y cuantificando los dos primeros en un espectrofotómetro de absorción atómica Varian modelo SpectrAA-400 y al sodio y al potasio en un espectrofotómetro de flama
- materia orgánica, a partir de su pérdida por ignición y por el método Walkley-Black
- nitrógeno orgánico, mediante el método Kjeldahl
- fósforo total, determinado por colorimetría, con un espectrofotómetro Bausch and Lomb UV-visible sistema con graficador X-Y, modelo Spectronic 2000
- fósforo disponible, con el método Bray I

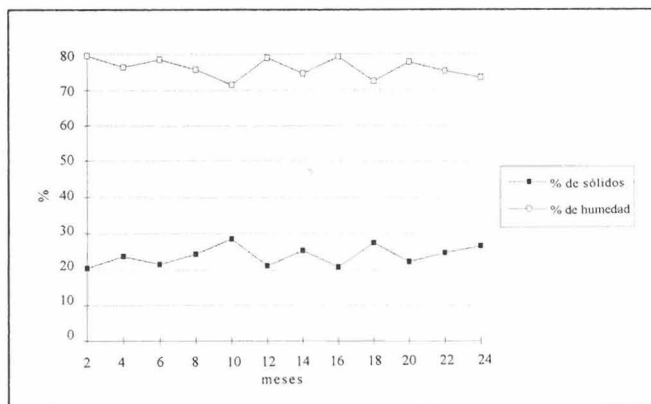


Fig. 1. Porcentaje de humedad y sólidos de 12 muestras compuestas de lodos residuales

b. elementos potencialmente tóxicos (metales pesados)

Se realizó una digestión en medio ácido ($\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$) para lograr el *contenido total* (Ortiz 1994) y una extracción con una solución de EDTA 0.05 M, para obtener las *cantidades disponibles* (Bloomfield y McGareth 1982). El EDTA extrae metales unidos a carbonatos y a materia orgánica, metales intercambiables, solubles y algunos precipitados a sulfitos u ocluidos en óxidos (Beckett *et al.* 1983). Los elementos detectados cualitativamente se cuantificaron por flama y horno de grafito en un espectrofotómetro de absorción atómica Varian modelo SpectrAA-400, equipado con corrector de fondo (lámpara de deuterio). Se utilizaron reactivos marca Baker y Merck, grado analítico y estándares Merck tritol de 1000 mg/L. Los análisis se hicieron por duplicado y con un blanco. Los análisis microbiológicos se realizaron de acuerdo con APHA (1992) *et al.* y fueron los siguientes: coliformes totales, coliformes fecales, *Salmonella sp.*, estreptococos fecales, hongos y huevecillos de *Ascaris lumbricoides*.

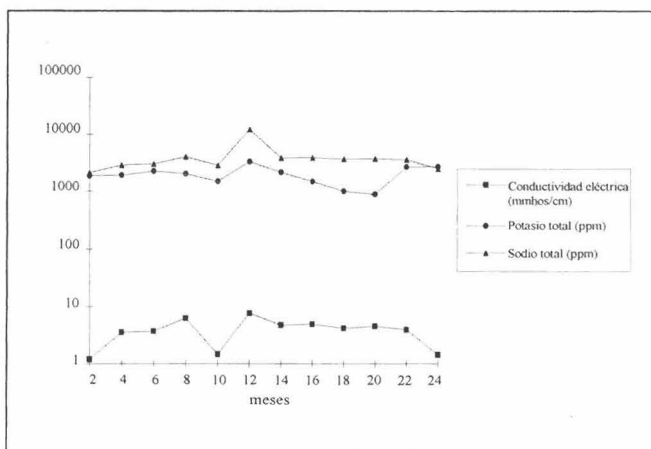


Fig. 2. Relación entre las concentraciones totales de sodio y de potasio con la conductividad eléctrica

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los análisis cualitativos, los lodos contienen los siguientes metales: aluminio, hierro y calcio; en menores cantidades cobre, titanio, níquel, zinc, plomo, cromo, sodio y manganeso (Tabla I). Los valores de humedad y porcentaje de sólidos son relativamente constantes. Los primeros oscilan entre 71.55 y 79.50 % y los segundos entre 20.50 y 28.45% con cambios pequeños a través del tiempo (Tabla II, Fig. 1). Los valores de densidad varían de 0.71 a 1.02 g/cm³ y comparados con los de suelos, resultan de medios a bajos. La conductividad eléctrica de los lodos residuales presenta un valor medio de 3.94 y una desviación estándar (s) de 1.94, generada por dos valores extremos. En general, la conductividad se relaciona con el contenido de sodio ($r = 0.77$); sin embargo la muestra seis presenta un valor extremo como se puede observar en la figura 2, lo que posiblemente se debe a que contiene una concentración más alta que el resto de las muestras de cationes de alta carga como Mn^{+2}_{ac} , Ca^{+2}_{ac} ,

Al^{+3}_{ac} , Mg^{+2}_{ac} y Fe^{+3}_{ac} . El pH se midió en una suspensión lodo-agua en proporción 1:5 y 1:2.5. El intervalo de pH fue de 5.35 a 7.07, con una mediana de 5.83, que corresponden a un lodo ligeramente ácido (Tabla II).

El contenido de materia orgánica en el lodo residual es muy alto (Tabla III) y varía de 44.16 a 83.00 %, con una media de 55.45% y una mediana de 51.31 %. Los porcentajes de pérdida por ignición son de 60.94 a 84 %, más altos que los obtenidos por el método de combustión húmeda, debido a que también se pierden otros compuestos, por ejemplo agua intersticial. La capacidad de intercambio catiónico varía de 49 a 89 meq/100 g, con una media de 65, una mediana de 63 y una s de 12, valores muy elevados que corresponden a las altas concentraciones de materia orgánica que contiene gran cantidad de hidrógenos ionizables (Tabla III).

En la tabla III aparecen los resultados del contenido de nitrógeno total y del nitrógeno orgánico. El nitrógeno orgánico constituye el 96.64 % del nitrógeno total. En promedio, el lodo está compuesto por 4.46 % de N_{total} .

TABLA I. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS CUALITATIVOS APLICADOS A LOS LODOS RESIDUALES DE LA ECCACIV

Microscopía electrónica	Al, Si, P, K, Cl, Ca, Fe, S
Fluorescencia de rayos x	Al, Si, Ca, Fe, Ni, Cu, Ti, Zn, Pb, As, Cr
Espectroscopía de emisión	Al, Si, P, Ca, Fe, Na, Cu, Ti, B, Mn

TABLA II. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICOS Y QUÍMICOS DE RUTINA DE LODOS RESIDUALES

Parámetro	Intervalo	Media	Mediana	S
Densidad aparente (g/cm ³)	0.71 - 1.02	0.87	0.89	0.009
CE (mmhos/cm)	1.19 - 7.70	3.94	4.03	1.94
% de humedad	71.55 - 79.50	76.14	76.02	2.70
% de sólidos	20.50 - 28.45	23.86	23.98	2.70
pH (1:2.5)	5.35 - 6.69	5.77	5.66	0.40
pH (1:5)	5.35 - 7.07	6.01	5.83	0.57
Carbonatos*	ND	ND	ND	0.00
Bicarbonatos*	3.0 - 8.0	4.59	4.20	1.50
Cloruros*	3.2 - 20.0	6.35	4.25	5.07

Nota: * meq/L, CE = conductividad eléctrica, ND = no detectado, S = desviación estándar

TABLA III. MATERIA ORGÁNICA, NITRÓGENO Y FÓSFORO CONTENIDOS EN LOS LODOS RESIDUALES (VALORES PROMEDIO DE 12 MUESTRAS)

Parámetro	Intervalo	Media	Mediana	S
% materia orgánica (W-B)	44.16 - 83.00	55.45	51.31	12.34
% pérdida de peso	60.94 - 84.00	74.98	76.31	6.72
% nitrógeno total	2.47 - 5.65	4.46	4.39	0.88
% nitrógeno orgánico	2.44 - 5.64	4.31	4.31	0.92
relación C/N	10.79 - 17.88	12.43	11.69	14.02
% fósforo total	1.00 - 3.60	1.59	1.26	0.89
% fósforo disponible	0.07 - 0.29	0.11	0.09	0.06

Nota: S = desviación estándar, W-B = Walkley-Black, C/N = carbono/nitrógeno

TABLA IV. CALCIO, MAGNESIO, SODIO, POTASIO Y CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO DE LOS LODOS RESIDUALES DE LA ECCACIV

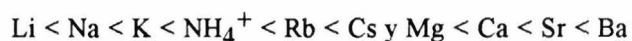
Elemento	Intervalo	Media	Mediana	S
Ca:				
T (mg/kg)	3036 - 28122	11788.7	8156	8286
T (meq/100 g)	15.18 - 1406.10	58.94	40.78	41.43
I (meq/100 g)	9.80 - 20.36	13.83	14.07	3.24
Sol (meq/L)	0.33 - 0.60	0.46	0.43	0.08
Sol (meq/100 g)	1.65 - 3.00	2.30	2.15	0.40
Mg:				
T (mg/kg)	1573 - 4045	2383	2228	673
T (meq/100 g)	13.11 - 337	19.86	18.57	5.60
I (meq/100 g)	2.66 - 7.87	5.82	6.28	1.70
Sol (meq/L)	0.00 - 0.53	0.21	0.19	0.13
Sol (meq/100 g)	0.00 - 2.65	1.05	0.95	0.65
Na:				
T (mg/kg)	2111 - 12374	4013.5	3132.6	458.3
T (meq/100 g)	9.18 - 53.80	17.45	13.62	1.99
I (meq/100 g)	2.48 - 6.81	4.67	4.55	1.40
Sol (meq/L)	1.13 - 9.39	2.55	1.82	2.26
Sol (meq/100 g)	6.65 - 46.95	12.75	9.01	11.30
K:				
T (mg/kg)	896 - 3283	1931	1954	668
T (meq/100 g)	2.30 - 84.18	9.95	9.98	1.71
I (meq/100 g)	1.85 - 13.50	7.15	7.62	3.04
Sol (meq/L)	0.00 - 0.60	0.22	0.21	0.17
Sol (meq/100 g)	0.00 - 3.00	1.10	1.05	0.85
CIC (meq/100 g)	49 - 89	65	63	12

Nota: CIC = capacidad de intercambio catiónico, T = concentración total, I = intercambiable, Sol = solubles, S = desviación estándar

cuyo 4.31 % de N es orgánico y 0.15 % se refiere a especies inorgánicas. Los valores son altos comparados con nitrógeno en suelo, presentan baja variación y corresponden a lo esperado dados los valores porcentuales de carbono orgánico. El fósforo en los lodos fue determinado en su contenido total y disponible. Este último da una referencia de la cantidad que puede ser tomado por las plantas e incluye todas las formas de fosfatos inorgánicos, tales como los iones PO_4^{-3} , H_2PO_4^- y HPO_4^{-2} . Como se observa en la **tabla III**, el fósforo disponible representa el 6.92 % del fósforo total (1.59 % de P total y 0.11 % de P disponible, valores promedio), lo que hace suponer que el 93.08 % está en formas poco solubles.

La concentración total de calcio es de 1.18 %, de magnesio 0.24 %, de sodio 0.40 % y de potasio 0.19 % (**Tabla VIII**). La concentración de calcio y magnesio se encuentran dentro del intervalo normal de los suelos de la región (Ortiz 1994), mientras que la de los otros elementos son más bajas. En la **tabla IV** se listan los valores de los cationes intercambiables. El intervalo para calcio es de 9.8 a 20.36 meq/100 g, notablemente más alto que un suelo, al igual que magnesio (2.66 a 7.87 meq/100 g), sodio (2.48 a 6.81 meq/100 g) y potasio (1.85 a 13.5 meq/100 g). Las cantidades de cationes intercambiables son más altas que en suelos, debido a la gran cantidad de materia orgánica de los lodos. El calcio ocupa la mayor parte de

las posiciones de intercambio, seguido del potasio, magnesio y sodio. Normalmente, la secuencia de sustitución en suelos coincide con la serie «liotrópica» (Carroll 1959), basada en la relación carga/radio hidratado y también con la concentración de iones totales (**Tabla IV**); pero en el caso de los lodos, el K y el Mg intercambian posiciones. El orden de sustitución según Carroll (1959), es el siguiente:



El cation soluble más abundante es el sodio, los otros elementos se encuentran en cantidades mucho menores (**Tabla IV**). En la **tabla V** se presentan los valores de aluminio de las doce muestras compuestas. En la **figura 3** se puede observar que en las últimas cuatro muestras el contenido del elemento es menor. Esta disminución se debe a que, cuando se inició este estudio, la planta de tratamiento utilizaba sulfato de aluminio para flocular los lodos, pero al alertar a los responsables de la operación de la planta sobre la toxicidad del metal y su efecto negativo en la operación de secado, empezaron a emplear un polímero no tóxico (poliacrilamida NALCO). Los resultados de las concentraciones totales de 10 metales aparecen en la **tabla V**. En todos los casos los valores de S son altos, indicando gran variabilidad en la concentración

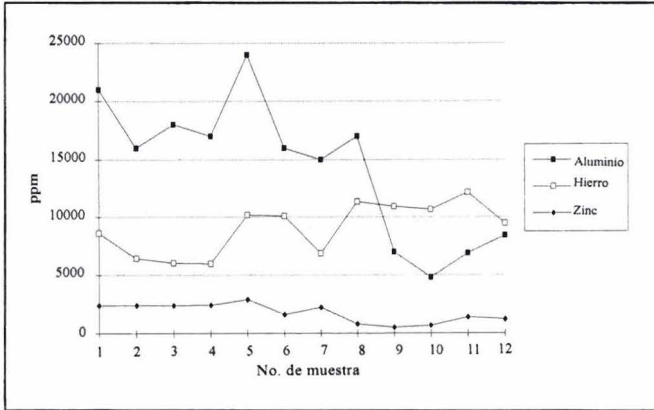


Fig. 3. Concentraciones de aluminio, hierro y zinc

de estos elementos (Figs. 3 y 4), lo que se debe a los aportes de aguas pluviales e industriales (composición heterogénea). Cuatro de estos elementos son micronutrientes esenciales para las plantas (Fe, Zn, Cu y Mn). Los niveles de Cd y Co estuvieron abajo del límite de detección (≤ 0.1 mg/kg).

En la tabla VI se presentan los valores de metales pesados disponibles (EDTA) y se establece el porcentaje con respecto a la concentración total (porcentaje de recuperación) que es ≤ 10 %. La secuencia de concentraciones es la siguiente:

$$Fe > Zn > Cu > Pb > Ni > Mn > Cr = Co = Cd$$

El porcentaje de recuperación se puede considerar como un valor indicativo de la concentración *activa del metal*, esto es, de la porción que va a ser más reactiva al mezclarse el lodo con el suelo, pues el resto corresponde a la fase mineral que únicamente se puede solubilizar en condiciones ácidas o por cambios drásticos en el pE del suelo. El elemento de porcentaje de recuperación más alto fue el níquel, seguido por cobre, hierro, manganeso, zinc y plomo. Si bien el porcentaje de recuperación relativo del níquel es el más elevado, su concentración total y

disponible es de las más bajas (Tabla VI). El plomo, se comporta de manera similar, aunque la cantidad extraída fue menor. No se detectaron Cd, Co y Cr en formas disponibles. Los dos primeros metales se encuentran en cantidades totales muy pequeñas mientras que el valor promedio de cromo total es de 312 mg/kg. El hecho de que este elemento no se haya extraído con EDTA indica que se encuentra en formas minerales de cromo trivalente insolubles, ya que las hexavalentes son solubles a cualquier pH (Gutiérrez 1991).

Los resultados de los análisis microbiológicos se muestran en la tabla VII. Los coliformes totales y fecales se

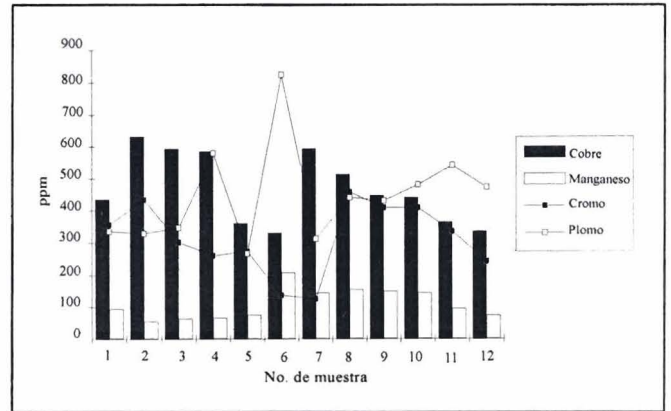


Fig. 4. Concentraciones totales de cobre, manganeso, cromo y plomo

presentan casi en la misma proporción, lo que significa que la mayoría de las bacterias son de origen humano. *Streptococos* fecales, hongos y *Salmonella sp.* se detectaron en todas las muestras, mientras que huevos de *Ascaris lumbricoides* sólo se encontraron en el lodo del filtro-prensa.

La composición general de los lodos indica que éstos conforman un material adecuado para usarse como mejoradores de suelos, ya que:

- la densidad es similar a la de los suelos

TABLA V. CONTENIDO TOTAL DE METALES PESADOS EN LODOS (mg/kg)

Elemento	Intervalo	Media	Mediana	S
hierro	5982 - 12136	9059	9764	2207
aluminio	4800 - 24000	14300	16000	6100
zinc	504 - 2904	1749	1926	815
cobre	330 - 631	470	453	110
níquel	87 - 105	96	98	7
manganeso	55 - 208	110	95	49
cromo	126 - 457	312	319	109
plomo	267 - 823	479	456	164
cadmio	ND	ND	ND	ND
cobalto	ND	ND	ND	ND

Nota: ND = no detectado, S = desviación estándar

TABLA VI. RESULTADOS DE LA CONCENTRACIÓN DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS EXTRAIDOS CON EDTA 0.05 M, EN LOS LODOS RESIDUALES DE LA ECCACIV (VALORES PROMEDIO DE 12 MUESTRAS COMPUESTAS, mg/kg)

Elemento	Intervalo	Media	Mediana	S	% con respecto a la concentración total
hierro	424 - 860	642	692	156	7
zinc	16.8 - 97.0	58.4	64.3	27.2	3.3
cobre	27.4 - 52.4	39.0	37.6	9.3	8.3
manganeso	5.6 - 21.1	11.2	9.6	4.9	10.2
chromo	ND	ND	ND	0.00	0.00
níquel	10.0 - 14.2	13.0	13.3	0.7	13.5
plomo	3.4 - 25.7	15.0	14.3	4.8	3.1
cadmio	ND	ND	ND	0.00	ND
cobalto	ND	ND	ND	0.00	ND

Nota: ND = no detectado, S = desviación estándar

- contienen altas concentraciones de materia orgánica, nitrógeno y fósforo. La primera se encuentra en cantidades mayores a las de los abonos comunes y nitrógeno y fósforo sólo los supera la gallinaza (**Tabla VIII**)
 - la capacidad de intercambio es alta y está relacionada principalmente, con la materia orgánica, ya que el contenido de arcillas es despreciable
 - contiene calcio, magnesio y potasio en formas biodisponibles (macronutrientes metálicos)
 - son ricos en Fe, Mn, Zn y Cu todos ellos microelementos esenciales para las plantas. Estos metales son los que se presentan en mayor concentración total y disponibles.
- Sin embargo, se identificaron algunas características que limitan su uso en forma indiscriminada:
- altos valores de conductividad y sodio soluble. Se debe cuidar el drenaje de los suelos tratados con lodos pues en casos extremos, se pueden presentar problemas de salinidad y aumento de la presión osmótica e incluso disminuir drásticamente el agua disponible para las plantas. Cuando el sodio esté en forma de sales básicas es posible provocar la sodificación de los suelos y la

- toxicidad por sodio en especies vegetales no tolerantes
- valores medios a bajos de C/N. Es esencial dosificar la cantidad de los lodos adicionados al suelo para permitir un proceso de humificación de la materia orgánica
- presencia de organismos patógenos. Como los valores en las muestras, que se acumularon durante un mes, son menores que los detectados en lodos frescos y Ortiz (1994), mostró que al aplicar los lodos, las poblaciones microbianas originales disminuyen drásticamente debido a las condiciones ambientales que prevalecen en los suelos de la región, especialmente a la intensa radiación solar, se propone un pretratamiento que disminuye el riesgo de toxicidad biológica de los lodos
- contenido de metales pesados. Como ya se comentó, se encuentran en bajas concentraciones y en formas minerales de baja solubilidad en el intervalo normal de pH-pE de los suelos. De acuerdo con Lester (1987b), la concentración de metales es menor que el límite máximo permitido para suelos en los países de la Unión Europea (UE) y de los Estados Unidos de

TABLA VII. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS MICROBIOLÓGICOS DE LOS LODOS RESIDUALES DE LA ECCACIV

Parámetro	Lodo filtro-prensa	Lodo tanque aireador (líquido superficial)	Lodo tanque aireador fondo	Lodo acumulado una semana	Lodo acumulado un mes
Coliformes totales (NMP/g X 10 ⁶)	18.2	24.0	19.2	21.0	7.4
Coliformes fecales (NMP/g X 10 ⁶)	18.1	19.2	18.6	8.9	0.2
<i>Salmonella</i>	positivo	positivo	positivo	positivo	positivo
Estreptococos fecales (NMP/g)	3266	2100	2566	15433	4200
Hongos (UFC/g)	655	355	483	1410	775
Huevos de <i>Ascaris lumbricoides</i>	positivo	negativo	negativo	negativo	negativo

TABLA VIII. COMPARACIÓN DEL CONTENIDO NUTRIMENTAL DE ABONOS COMUNES CON EL LODO RESIDUAL DE LA ECCACIV (RAMÍREZ *et al.* 1991)

Parámetro de comparación	Vacuno	Gallinaza	Porcino	Ovino	lodo
pH	8.7	7.6	7.20	9.0	5.9
% MO	48.2	29.4	46.90	48.2	55.5
% N	2.1	5.1	3.10	2.3	4.5
% P	0.58	2.06	0.64	0.72	1.59
% K	3.10	2.20	1.83	4.36	0.19
% Ca	3.39	20.13	1.68	2.91	1.18
% Mg	0.97	0.88	0.93	0.57	0.24

Nota: MO = Materia orgánica

América (EUA) (Tabla IX). Si se compara la composición de estos lodos con los valores promedio de Inglaterra y EUA (Page *et al.* 1983), se observa que las concentraciones son menores (Tabla X). Esta diferencia se debe a que la relación población/industria es mucho mayor en el Valle de Cuernavaca que en países con mayor industrialización, además de que la planta no solamente recibe efluentes domésticos e industriales, sino también aguas pluviales, las que diluyen las concentraciones de los elementos tóxicos. Además, para no superar los niveles de concentración considerados internacionalmente como seguros, se propone utilizar la siguiente fórmula modificada de Lester (1987a):

$$\text{Toneladas de lodo residual / ha} = \frac{[N - n][P]}{[F][T][A]}$$

en donde:

N = concentración máxima permisible del elemento en suelos (mg/kg)

n = concentración del elemento en el suelo (mg/kg)

P = peso de una hectárea de suelo, considerando una densidad aparente de 1 g/mL y una profundidad de 20 cm (ton).

F = frecuencia anual de aplicación del lodo

T = concentración del elemento en el lodo (mg/kg)

A = número de años de aplicación del lodo

Al aplicar esta fórmula en la zona de estudio, se consideró una usar por año durante 50 años, utilizando como concentración del elemento en el suelo, los valores de la región informados por Sánchez y Ortiz (1989): Zn=79 mg/kg, Cu=53 mg/kg, Ni=80 mg/kg, Cr=65 mg/kg, Mn=760 mg/kg y Pb=20 mg/kg.

Como el zinc es el metal pesado más abundante en los lodos resultó el factor limitante. La dosis máxima que no rebasa los niveles considerados normales en la región es de 4.4 toneladas por hectárea, una vez por año durante 50 años o si se aumenta la frecuencia, se debe reducir en forma proporcional el número de años de aplicación ($F \times A=50$).

CONCLUSIONES

Los lodos constituyen una fuente de macro y micronutrientes en una zona eminentemente agrícola y su aplicación en suelos resulta segura, siempre y cuando se dosifiquen y dispongan adecuadamente. Esta conclusión es válida para todas aquellas plantas en que la composición de los lodos sea similar (baja concentración de metales pesados y alta de nutrientes) y que se encuentren en zonas agrícolas.

TABLA IX. COMPARACIÓN DE LAS CONCENTRACIONES MÁXIMAS PERMITIDAS DE METALES PESADOS EN LODOS PARA USO EN AGRICULTURA, PROPUESTO POR LA UNIÓN EUROPEA, ANTES CEE (LESTER 1987b), LOS ESTADOS UNIDOS DE AMÉRICA (PAGE *et al.* 1983) Y RESULTADOS DE LA ECCACIV

Metal	Límite CEE (mg/kg)	Límite EUA (mg/kg)	Eccaciv (mg/kg)
cadmio	20	50	ND
cromo	750	1,000	318
cobre	1,000	800 - 1,000	470
níquel	300	100 - 200	96
plomo	750	1,000	479
zinc	2,500	2,000 - 2,500	1,749

Nota: ND = no detectado

TABLA X. COMPARACIÓN DE CONCENTRACIONES DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS DE LA ECCACIV, CON LA DE OTROS PAÍSES (VALORES PROMEDIO, mg/kg)

Metal	Inglaterra (2,400 lodos)	Estados Unidos de América (250 lodos)	Eccaciv (12 muestras compuestas)
cadmio	< 200	104	ND
cobalto	24	10	ND
chromo	980	2,226	312
cobre	970	1,346	470
hierro	24,000	31,000	9059
manganeso	500	194	95
níquel	510	236	98
plomo	820	1,894	479
zinc	4,100	2,132	1749

Nota: ND = no detectado

- Antes de establecer un sistema de disposición en suelos es recomendable realizar experimentos de campo y complementar los datos de laboratorio con información sobre el entorno natural, analizando la necesidad de someter a los lodos a un composteo aeróbico previo.
- Las propuestas para la aplicación de los lodos deben hacerse para cada planta de tratamiento en particular, su uso debe llevarse a cabo bajo estrictas condiciones de control y manejo.
- Dado que las sustancias orgánicas presentes en los lodos experimentan múltiples transformaciones o en ocasiones se inmovilizan a través de procesos de adsorción, para medir su toxicidad se recomienda utilizar bioensayos.
- Las afectaciones al ambiente asociadas al manejo inadecuado de los lodos tienden a agravarse y generalizarse, por lo que se recomienda que toda planta de tratamiento de agua que se instale cuente con un sistema eficiente para el manejo de sus lodos.
- No se considera adecuado establecer sistemas de incineración o de relleno sanitario, pues aparte de desperdiciar el valor nutricional de los suelos, se convierten en una fuente potencial de contaminación.
- La legislación ambiental debería clasificar los lodos como desechos especiales y no como peligrosos. Se deben recomendar tecnologías limpias para su reuso y desestimular su incineración o confinamiento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Rufino Lozano, Instituto de Geología, UNAM por su colaboración en la determinación de los análisis con rayos X y a Irene Sommer, Instituto de Geografía, UNAM, por la asesoría brindada para la revisión del contenido y forma de este artículo.

REFERENCIAS

- APHA, AWWA, WPCF (1992). *Standard methods for the examination of water and waste water*. 17a. edición, Washington, D.C.
- Arroyo J. y Molina M. (1990). Programa nacional de reutilización del agua. Memorias del 11o. Congreso Nacional de Hidráulica. Tomo I. Asociación Mexicana de Hidráulica. Querétaro, Querétaro.
- Beckett T., Warr E. y Davis R.D. (1983). Cu and Zn in soils treated with sewage sludges: their «extractability» to reagents compared with their «availability» to plants. *Plant Soil* 70, 345-350.
- Bloomfield C. y McGareth P. (1982). A comparison of the extractabilities of Zn, Cu, Ni and Cu from sewage sludges prepared by treating raw sewage with the metal salts before and after anaerobic digestion. *Environ. Pollut.* 24, 193-197.
- Carroll D. (1959). Ion exchange in clays and other minerals. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 70 p.
- Coker G. y Matthews J. (1983). Metals in sewage sludge and their potential effects in agriculture. *Water Sci. Technol.* 15, 209-225.
- DGACSH-SARH (1985). *Inventario Nacional de descargas de aguas residuales municipales e industriales*. México, D.F.
- Eger J. (1978). Effects of land disposal of sewage wastes. Comunicación personal.
- Ehret J. y Walker M. (1977). The role of composting and other beneficial use options in municipal sludge management. Proc. National Conference on Composting of Municipal Residues and Sludges. Information Transfer, Rockville, MD.
- EPA (1985). Composting of municipal wastewater sludges. EPA/625/4-85/014. Cincinnati, Ohio.
- EPA (1988). Samples procedures and protocols for the national sewage sludge survey. Office of Water Regulations and Standards, WH-522, Washington D.C.

- Epstein E. y Parr F. (1977). Utilization of composted municipal wastes. Proc. National Conference on Composting of Municipal Residues and Sludges. Information Transfer, Rockville, MD.
- Gerba P. (1983). Pathogens. En: *Utilization of municipal wastewater and sludge on land* (L. Page, G. Thomas, E. Smith, K. Iskandar y L. Sommers, Eds.). University of California. Riverside, CA.
- Gutiérrez M. E. (1991) Estabilización y fabricación de ladrillos una alternativa de solución para residuos peligrosos ricos en cromo hexavalente. En: *Premio nacional Serfin al medio ambiente*. Ed. Banca Serfin. México, D.F.
- Jaakko P. (1970). Fertilizer from sewage sludge. Environ. Pollut. Manag. 3, 169-172.
- Kubota H. (1984). Composting has promising future in Japan. *BioCycle* 3, 28-31.
- Lester N. (1987a). *Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes*. Vol. I. Sources, analysis and legislation. CRC Press, Florida.
- Lester N. (1987b). *Heavy metals in wastewater and sludge treatment processes*. Vol. II. Treatment and disposal. CRC Press, Florida.
- Matthews J. (1984). Control of metal application rates from sewage sludge utilization in agriculture. Crit. Rev. Environ. Control 14, 199-202.
- Ortiz L., Sánchez E., y Gutiérrez M. (1993). *Análisis de suelos. Fundamentos y técnicas*. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Morelos, México.
- Ortiz L. (1994). Caracterización y propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de Civac, estado de Morelos. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Page L., Logand T. y Ryan J. (1987). *Land application of sludge*. Lewis Publishers, Michigan, pp. 101-133.
- Page L., Thomas G., Smith E., Iskandar K. y Sommers L. (1983). *Utilization of municipal wastewater and sludge on land*. University of California, Riverside, CA.
- Pattero J. (1979). Fertilizer from sewage sludge. Environ. Pollut. Management 2, 169-172.
- Ramírez E., Cardoso L. y López S. (1991). Composteo en pila estática: desarrollo experimental. Informe interno. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Cuernavaca, Morelos, México.
- Salazar C. (1991). Tratamiento de los desechos líquidos industriales en el distrito de control de la contaminación del agua de la zona de Civac. En: *El recurso agua en el Estado de Morelos y problemas de su contaminación*. CRIM, UNAM, Cuernavaca, Morelos, México.
- Sánchez E. y Ortiz L. (1989). Efecto de las aguas industriales tratadas sobre suelos agrícolas en el Estado de Morelos. Informe Interno, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Morelos, México.