

**UNIDAD DE APOYO TÉCNICO
PARA EL SANEAMIENTO BÁSICO DEL ÁREA RURAL**

**MANUAL DE
DISEÑO DE GALERÍAS FILTRANTES**



Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
División de Salud y Ambiente
Organización Panamericana de la Salud
Oficina Sanitaria Panamericana – Oficina Regional de la
Organización Mundial de la Salud

Auspiciado por:



Agencia Suiza para el
Desarrollo y la Cooperación

**UNIDAD DE APOYO TÉCNICO PARA
EL SANEAMIENTO BÁSICO DEL ÁREA RURAL**

**Manual de
Diseño de Galerías Filtrantes**



Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente
División de Salud y Ambiente
Organización Panamericana de la Salud
Oficina Sanitaria Panamericana – Oficina Regional de la
Organización Mundial de la Salud

Auspiciado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación

Lima, 2002

Tabla de contenido

	Página
1. Introducción	4
2. Hidrología y ciclo hidrológico	4
2.1 Hidrología	4
2.2 Ciclo hidrológico	5
3. Agua subterránea	6
3.1 Generalidades	6
3.2 Distribución vertical de las aguas subterráneas	7
3.2.1 Zona de aeración	8
3.2.2 Zona de saturación	8
4. Acuífero	9
4.1 Tipo	9
4.2 Propiedades del acuífero	
4.2.1 Porosidad	10
4.2.2 Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad	11
4.2.3 Coeficiente de transmisividad	11
4.2.4 Coeficiente de almacenamiento	12
4.2.5 Caudal o gasto específico	12
4.2.6 Gradiente hidráulica	12
4.2.7 Radio de influencia	12
5. Captación de aguas subterráneas	12
6. Galerías	13
6.1 Utilización de las galerías	13
6.2 Ventajas de las galerías construidas en materiales no consolidados	14
6.3 Clasificación de las galerías	14
6.3.1 Según características constructivas	14
6.3.2 Según características del acuífero	15
6.4 Cálculo hidráulico	20
6.4.1 Galerías que comprometen todo el espesor del acuífero	21
6.4.2 Galerías que comprometen la parte superior del acuífero	25
6.4.3 Galerías en acuíferos con recarga superficial	28
7. Conductividad hidráulica	30
7.1 Consideraciones básicas	30
7.2 Pruebas de bombeo	31
7.3 Determinaciones de las conductividad hidráulica	33
7.3.1 Acuífero libre con pozos de observación	33
7.3.2 Acuífero libre recarga con agua superficial	34
7.3.3 Pozo con carga de agua	35

8.	Selección del sitio para la construcción de la galería	38
8.1	Consideraciones previas	38
8.2	Trabajos preliminares	39
8.2.1	Información básica	40
8.2.2	Reconocimiento de campo	40
8.2.3	Trabajos complementarios	40
8.3	Ubicación de la galería	40
9.	Diseño de los componentes de la galería de filtración	41
9.1	Conducto colector	41
9.1.1	Tamaño	41
9.1.2	Tipo de material	42
9.1.3	Pendiente	43
9.1.4	Área abierta	43
9.1.5	Forma, tamaño y distribución de las coberturas	43
9.2	Forro filtrante	46
9.3	Sello impermeable	49
9.4	Pozo colector	49
9.5	Cámaras de inspección	51
9.6	Válvulas de control	51
10.	Consideraciones para la construcción y mantenimiento de la galería de filtración y para la conservación de la calidad del agua	52
10.1	Construcción	52
10.1.1	Excavación	52
10.1.2	Extracción de escombros	52
10.1.3	Extracción del agua	52
10.1.4	Entibado	53
10.1.5	Sistema de drenaje	54
10.2	Mantenimiento	54
10.3	Calidad del agua	56
	Bibliografía	57
Anexos		
Anexo I	Tablas de valores	58
Anexo II	Diseño de galería	61
Anexo III	Determinación de la conductividad hidráulica	71
Anexo IV	Ábaco para determinar el factor geométrico “A”	82

Manual de diseño de galerías filtrantes

1. Introducción

Para el hombre la necesidad de utilizar el agua es tan antigua como su propia existencia y por consiguiente, desde sus inicios tuvo la preocupación por conocer sus características, sus orígenes, su dinámica y sus diferentes aplicaciones.

En la antigüedad, tanto los chinos como los sirios, egipcios y romanos fueron muy hábiles en el manejo de las aguas para destinarlas al riego de campos agrícolas y al abastecimiento de agua a las ciudades. Durante la máxima expansión del imperio romano, en donde abarcó territorios de cerca de 25 países actuales, se hicieron construcciones que hoy en día deslumbran por su belleza arquitectónica, pero fueron igualmente importantes sus sistemas de acueductos que suministraban agua potable a sus diferentes poblaciones, así como sus termas y baños públicos.

En América, al igual que en las antiguas culturas europeas y asiáticas, las poblaciones también se desarrollaron a orillas de ríos y lagos. Sin embargo, gran parte de las labores agrícolas se realizaron durante los períodos de lluvia, lo que llevó al desarrollo de diferentes tipos de obras hidráulicas con la finalidad de ampliar sus fronteras agrícolas. Así por ejemplo, los incas desarrollaron el cultivo en terrazas en las laderas de montañas, que eran irrigadas por complejos sistemas de canales y embalses artificiales de agua. De otra parte, hace más de 1.500 años, la cultura Nazca construyó galerías de filtración para irrigar sus campos agrícolas, las que hasta el día de hoy son empleadas con los mismos propósitos.

Las galerías de filtración son obras sencillas que captan agua filtrada en forma natural, funcionando como pozos horizontales. Estas estructuras recolectan el agua subálvea o subsuperficial a todo lo largo de su recorrido y resultan ventajosas cuando es posible su construcción, constituyéndose la mayor parte de las veces, en una importante alternativa de suministro de agua, tanto en cantidad como en calidad.

Muchos pueblos y ciudades en países poco desarrollados están situados a lo largo de ríos o lagos, cuyas orillas están constituidas por capas de arenas y gravas por donde circula el agua subálvea alimentada por aguas superficiales. Estas capas suelen ser fáciles de excavar por lo que constituyen excelentes emplazamientos para drenes o galerías. Para esto, se excava la zanja en cuyo fondo se coloca el dren o se horada un socavón al cual se le reviste interiormente, el agua se recolecta en una cámara o pozo central desde donde es conducida para su posterior uso. La longitud del dren o galería depende de la cantidad de agua deseada y de las dimensiones del acuífero.

2. Hidrología y ciclo hidrológico

2.1 Hidrología

La hidrología estudia las aguas que se encuentran en las capas superiores de la corteza terrestre. De la totalidad del agua estimada que existe en el planeta (1,384 E6 km³),

1,348 E6 km³ se encuentran en los océanos (97,4%); 27,8 E6 km³ están en los casquetes polares y nevados (2,0%), mientras que los ríos, los lagos y el agua subterránea están compuestos por solamente 8,3 E6 km³ (0,6%).

La mayor parte del agua evaporada hacia la atmósfera proviene de los océanos, y otra parte, no menos importante, de los lagos, ríos y de la capa superficial del suelo. La evapotranspiración de las plantas también constituye una importante fuente de contribución. Los científicos calculan que cada año se evaporan de los océanos y de las áreas continentales unos 300 km³ de agua.

La precipitación total que cae sobre la tierra es igual a la evaporación, de tal modo que anualmente retornan a la tierra unos 300 km³, de los cuales 7,5 km³ caen en la parte continental.

2.2 *Ciclo hidrológico*

El ciclo hidrológico consiste en la continua circulación de la humedad y del agua en el planeta. El ciclo no tiene principio ni fin, pero el concepto de ciclo hidrológico se origina en el agua de los océanos, los que cubren las tres cuartas partes del globo terrestre.

La radiación solar calienta la superficie de agua de los océanos, llevando por evaporación el agua hasta la atmósfera, donde se reúne dando origen a las nubes. Bajo ciertas condiciones, la humedad contenida en las nubes se condensa y precipita a tierra bajo la forma de lluvia, granizo o nieve, elementos que constituyen las variadas formas de precipitación del agua, la cual es denominada científicamente como agua meteórica.

La verdadera fuente de casi todas las reservas de agua dulce en el planeta, la constituye la precipitación que cae sobre la parte continental y que, de una manera u otra, renueva el agua extraída de lagos, ríos y pozos y es empleada en innumerables usos domésticos e industriales.

Parte de la precipitación que ha humedecido la capa superficial del terreno escurre sobre la superficie hasta llegar a algún curso o cuerpo de agua. Otra parte se infiltra en el suelo, de la que una fracción importante es retenida por las raíces de las plantas y devuelta a la superficie por acción de capilaridad. Sin embargo, otra parte, no menos importante, percola por debajo de la zona radicular y mediante la influencia de la gravedad se desplaza hasta llegar a la zona de saturación donde pasa a constituir el depósito subterráneo de agua.

Una vez que el agua llega a la zona de saturación, se inicia su desplazamiento por los poros de los materiales presentes en la referida zona y puede reaparecer en la superficie de lugares situados a elevaciones inferiores al nivel que permitiera su incorporación al depósito subterráneo de agua. De esta manera, el agua subterránea puede aflorar por manantiales o filtrarse a través del material permeable hacia los cursos de agua, viniendo a representar el caudal de los ríos en tiempo de estiaje.

Los cursos de agua que colectan tanto la escorrentía superficial como los afloramientos naturales, eventualmente llegan hasta los océanos, iniciándose nuevamente el

ciclo hidrológico y constituyéndose, de esta manera, en el proceso por el cual la naturaleza hace circular el agua desde los océanos a la atmósfera y de ésta a la corteza terrestre en forma consecutiva.

Las fuerzas que hacen posible el ciclo hidrológico son la radiación solar, la aceleración gravitacional, la atracción molecular y la capilaridad. En la figura 2.1 se presenta un esquema que representa el ciclo hidrológico.

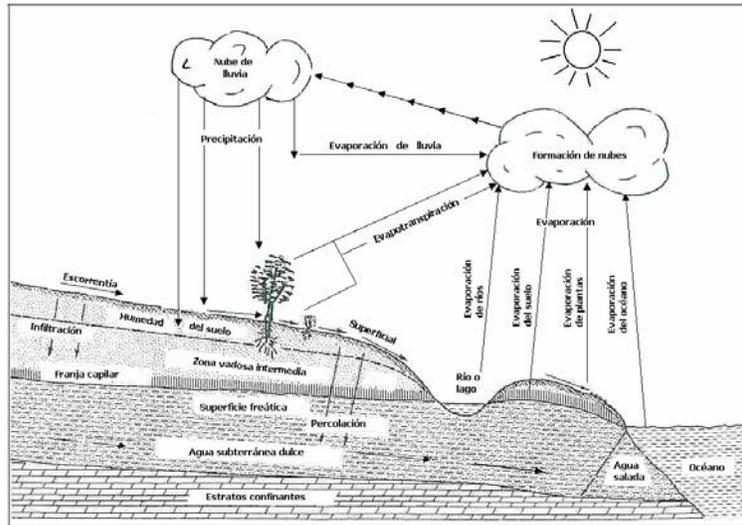


Figura 2.1 Ciclo Hidrológico

Sin embargo, el hombre con su accionar afecta algunos de los componentes del ciclo hidrológico a través de la regulación de los ríos o la construcción de presas, canales y otros tipos de obras hidráulicas, así como por la construcción de carreteras, autopistas y ciudades, que alteran el escurrimiento natural, al obstruir el proceso de infiltración del agua en el suelo. Otros factores que afectan el ciclo hidrológico son la tala de bosques, la eliminación de vegetación, la construcción de pozos y la explotación indiscriminada de las aguas subterráneas.

3. Agua subterránea

3.1 Generalidades

La hidrología trata del movimiento del agua dulce en los acuíferos que son estratos porosos por donde el agua circula. La base o el fondo del acuífero es un estrato impermeable, por lo que es posible que existan acuíferos de varios “pisos”. Según sus características hidráulicas, existen dos tipos de acuíferos: acuíferos libres, donde de algún modo la napa freática está en contacto con el aire, y acuíferos confinados donde el espacio poroso está confinado por estratos impermeables.

Desde tiempos antiguos se han utilizado pozos excavados, pozos perforados y galerías filtrantes en el aprovechamiento del agua subterránea. La excavación de pozos es una labor lenta y pesada, son de bajo caudal de explotación a causa de su limitada

penetración en el acuífero y normalmente, está compuesto por un hoyo de aproximadamente un metro de diámetro.

La habilitación de pozos perforados se caracteriza por su construcción desde la superficie, y el uso de herramientas pesadas permite alcanzar grandes profundidades y, por lo tanto, la penetración completa de los acuíferos. La instalación de bombas sumergibles facilita la extracción de caudales importantes para el abastecimiento de agua.

Las galerías filtrantes son sistemas de drenaje, que captan el agua de la napa freática superficial de los acuíferos situados en los lechos sedimentarios de los cauces de los ríos. La calidad del agua subálvea está fuertemente vinculada a la calidad del agua superficial; sin embargo, el proceso de filtración a través del material poroso conduce a la remoción de sólidos suspendidos y de microorganismos, por lo que su concentración es mucho menor a la del agua superficial que alimenta al acuífero. Según la topografía, el agua puede ser extraída por gravedad o mediante bombas.

El empleo de agua subterránea con fines de abastecimiento tiene ventajas y desventajas. En cuanto a la calidad, se puede generalizar que la filtración lenta coadyuva a la remoción de los sólidos suspendidos y de los microorganismos, confiriendo al agua subterránea una mayor pureza en comparación con el agua superficial. Sin embargo, por haber estado en el subsuelo, puede tener mayor contenido de sales minerales como consecuencia que los estratos geológicos pueden poseer alto contenido de sales solubles. Debido a que las formaciones no consolidadas son las que tienen la mayor probabilidad de contener agua y de ser explotadas con fines de abastecimiento de agua, resulta que muchas veces son de origen marítimo, por lo que estas aguas suelen ser salobres y no aptas para el consumo humano.

En lo referente a la cantidad, ésta depende de las características de los acuíferos, es decir si son libres o confinados, de su espesor y porosidad. Acuíferos libres y profundos pueden tener una importante capacidad de almacenamiento que permite la extracción de caudales sin recarga inmediata, lo que resulta importante en zonas climáticas con marcada diferencia. Normalmente, los acuíferos confinados tienen poca capacidad de almacenamiento; sin embargo, algunas veces están conectados con áreas de recarga que restituyen los caudales extraídos.

3.2 Distribución vertical de las aguas subterráneas

A mayor o menor profundidad, todos los materiales de la corteza terrestre son porosos. Se acostumbra denominar a esta parte zona porosa o de fracturación, y los poros o fracturas pueden encontrarse parcial o totalmente saturados de agua.

El estrato superior, en donde los poros y las fracturas están parcialmente ocupadas de agua, se denomina “zona de aeración” y el que se encuentra por debajo están completamente llenas de agua y se la conoce como “zona de saturación” (ver figura 4.1).

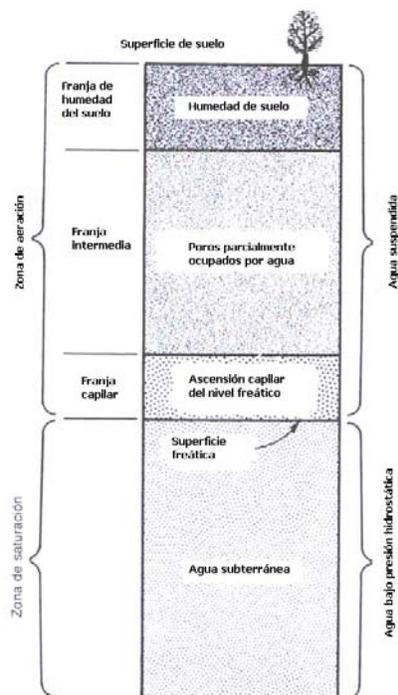


Figura 4.1 Distribución vertical del agua

3.2.1 Zona de aeración

Esta zona presenta intersticios en donde los macroporos contienen aire y los microporos agua adherida por capilaridad. Luego de una lluvia intensa, esta zona puede saturarse o en su defecto, luego de una prolongada sequía, puede llegar a secarse por completo. Cuando llueve con posterioridad a un período de sequía, las primeras aguas que caen en la superficie del terreno son retenidas por capilaridad para remplazar a la extraída por las plantas y a la evaporada durante el período de sequía anterior a la lluvia. Después de llenados los poros, el resto del agua de lluvia percolará por gravedad hacia la zona de saturación.

La zona de aeración se divide en tres franjas: a) húmeda; b) intermedia; y c) capilar. Estas franjas varían en profundidad y sus límites no pueden ser definidos a partir de las diferencias físicas de los materiales geológicos, sino del contenido de agua referida.

3.2.2 Zona de saturación

Esta zona está representada por el espacio que ocupa permanentemente el agua. El nivel de agua en la zona de saturación tiende a permanecer plana, aunque puntualmente puede presentar inflexiones debidas a la extracción del agua por bombeo, a la recarga artificial, o al drenaje desde o hacia los ríos, etc., llegando en algunos lugares a estar el nivel de agua por encima de la superficie terrestre, tal como sucede en ocasiones con lagos y ríos conectados directamente al acuífero (ver figuras 4.2 y 4.3). Cuando el nivel del agua tiene una posición bastante bien definida en un punto determinado se le define como nivel estático.

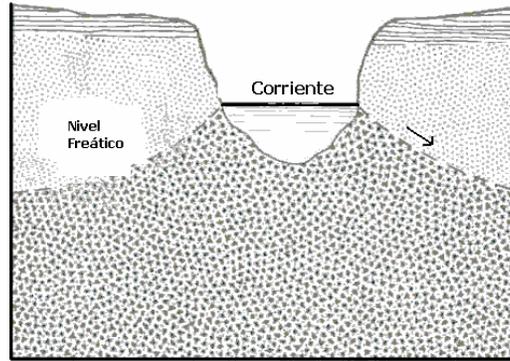


Figura 4.2 Condiciones de la superficie freática. Recarga de acuífero

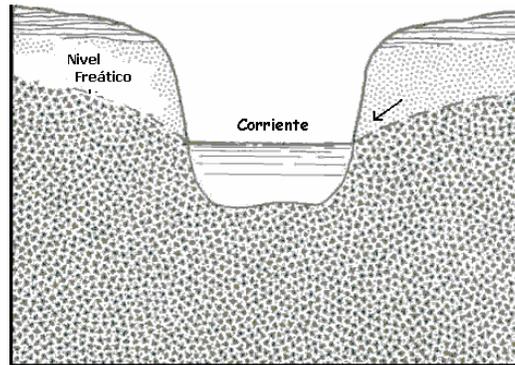


Figura 4.3 Condiciones de la superficie freática. Recarga de curso o cuerpo de agua.

El agua contenida en la zona de saturación es la única que puede ser denominada con propiedad como agua subterránea. La zona de saturación podría asimilarse a un gran embalse natural cuya capacidad total es equivalente al volumen de los poros y aberturas que se encuentran llenos de agua. El espesor de la zona de saturación es muy variable y está definido por la geología local, el tamaño de los poros o intersticios, la recarga y la velocidad de desplazamiento del agua desde la zona de recarga hasta la zona de descarga.

4. Acuíferos

4.1 Tipos

La palabra acuífero proviene del latín y significa *que lleva agua*. El acuífero está representado por formaciones geológicas de estructura permeable que se encuentran saturadas de agua, y con propiedades físicas que permiten el almacenamiento y el desplazamiento del agua a través de ella, y que es capaz de suministrar agua a pozos, galerías y manantiales, los que a su vez pueden ser empleados con algún fin beneficioso.

En ciertos acuíferos, el agua subterránea se manifiesta bajo condiciones *freáticas*, es decir, la zona saturada está expuesta a la presión atmosférica, como si estuviera contenida en un recipiente abierto. Otro término aplicado a estos tipos de acuíferos es *acuífero no confinado* o *agua subterránea libre* y cuando el agua se encuentra confinada por dos estratos impermeables, se le denomina *artésiano*. En el caso de los acuíferos freático, la

presión hidrostática equivale a la profundidad que media desde la superficie libre del acuífero hasta un punto determinado dentro de él. De esta manera, cuando se perfora un pozo dentro de un acuífero freático, el nivel estático de agua dentro del pozo se halla a la misma elevación que el nivel freático, por lo que resulta ser de mayor interés para la construcción de galerías de filtración.

Un acuífero puede estar constituido por una a varias capas de grava, arena, piedras calizas cavernosas o un gran estrato de roca no porosa pero fracturada. Los mantos acuíferos pueden tener unos pocos metros de espesor o varios cientos de metros; estar situados superficialmente o a gran profundidad, ser de extensión pequeña o hasta de gran tamaño que abarca cientos de kilómetros cuadrados, pero en todo caso los acuíferos son de extensión limitada.

4.2 *Propiedades del acuífero*

Las dos propiedades más importantes de los mantos acuíferos son la porosidad y la permeabilidad. Sin embargo, se tiene que una formación puede ser porosa, pero no necesariamente permeable, por lo que el acuífero no puede ser catalogado como tal.

4.2.1 *Porosidad*

Una de las principales propiedades del suelo es la porosidad y está vinculada con la cantidad de agua que puede ser almacenada en el material de la zona de saturación. La porosidad está representada por el volumen de las aberturas o poros de un determinado volumen unitario de material, es decir es la proporción del volumen unitario de material no ocupado por el material sólido. La porosidad, normalmente se la expresa como porcentaje del volumen bruto del material. Así por ejemplo, si a un recipiente de 500cm^3 , provisto de una llave de drenaje en la parte inferior, se le enrasa con arena y se encuentra que se necesitan 160cm^3 de agua para cubrir toda la arena, se tiene que la porosidad es igual a $160/500$, es decir, 0,32 ó 32%.

Aunque la porosidad representa la cantidad de agua que un acuífero puede almacenar, no indica cuánta de esa agua puede ceder. Cuando el material saturado drena agua por acción de la gravedad, solamente puede ceder una parte del volumen total almacenado en él. La cantidad de agua que un volumen unitario de material deja escapar cuando se le drena por gravedad, se denomina *rendimiento específico*, denominado también *porosidad efectiva*. Generalmente, este valor varía entre el 10 y el 30 por ciento.

La parte de agua que no puede ser removida por acción de la gravedad es retenida por capilaridad y atracción molecular. La cantidad de agua que un volumen unitario de material retiene cuando se somete a la acción de la gravedad, se denomina *retención específica*. Tanto el rendimiento específico como la retención específica se expresan como fracciones decimales o porcentajes. El rendimiento específico sumado a la retención específica es igual a la porosidad del material. De esta manera, para el caso del ejemplo anterior, si se encuentra que el volumen de agua drenada es de 100cm^3 , entonces se tiene que 60cm^3 son retenidos en los poros de la arena, por lo tanto la retención específica es de 0,12 o el 12 por ciento, mientras que el rendimiento específico es de 0,20 o el 20 por ciento.

En resumen, el rendimiento específico indica la cantidad de agua disponible; y la retención específica, la cantidad de agua retenida entre las partículas por atracción molecular y que no es posible ser extraída. En la determinación de los conceptos de rendimiento específico y retención específica, es necesario considerar el tiempo.

4.2.2 Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad

Los experimentos han demostrado que la velocidad del agua a través de una columna saturada de arena, es directamente proporcional a la diferencia de las cargas hidrostáticas en los extremos de la columna, e inversamente proporcional a la longitud de la misma, la expresión matemática conocida como la Ley de Darcy se expresa como sigue

$$V = k_f \times (h_1 - h_2) / l$$

Siendo:

- V = velocidad de flujo (m/d).
- ($h_1 - h_2$) = diferencia de cargas hidrostáticas (m).
- l = distancia a lo largo de la trayectoria del flujo (m).
- k_f = constante que depende de las características del material poroso a través del cual tiene lugar el movimiento del agua y denominado conductividad hidráulica (m/d).

Por lo tanto, la conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad, es la facilidad con la que un material permite el paso del agua a través de él, y se define como el volumen de agua que escurre a través de un área unitaria de un acuífero bajo una gradiente unitaria y por unidad de tiempo.

Generalmente se considera la conductividad hidráulica horizontal, pero a veces se hace referencia a su componente vertical, la cual es varias veces menor, pues está afectada por la compactación de las diferentes capas. La conductividad hidráulica se expresa usualmente en m/d (m^3/m^2-d) o en Darcy, en honor al investigador que definió su expresión matemática.

4.2.3 Coeficiente de transmisividad

Es la capacidad de un medio poroso para transmitir el agua según el espesor del horizonte acuífero y su permeabilidad, y se define como la razón del caudal en metros cúbicos por día que fluye a través de una sección vertical del acuífero, cuya altura es igual a su espesor y cuyo ancho es de un metro y se expresa en m^2/d .

$$T = k_f \times h_a$$

Donde:

- T = transmisividad (m^2/d)
- k_f = permeabilidad (m/d)
- h_a = espesor acuífero (m)

4.2.4 *Coefficiente de almacenamiento*

Es el volumen de agua liberado por la columna de un acuífero de altura igual a todo su espesor y de un metro de ancho, cuando la presión disminuye una unidad. Su valor varía de 10^{-5} a 10^{-3} . Así por ejemplo, el valor de coeficiente de almacenamiento $S = 0,01$ indica que quedarían libres $0,01 \text{ m}^3$ de agua bajo un área de acuífero de 1 m^2 cuando la presión hidrostática desciende 1 m.

4.2.5 *Caudal o gasto específico*

Es la relación que existe entre el caudal de bombeo de un pozo y el descenso en el nivel de las aguas subterráneas que esta extracción provoca. Usualmente se expresa en $\text{m}^3/\text{d-m}$ o en l/s-m .

$$q = Q / s$$

Donde:

$$\begin{aligned} q &= \text{Caudal específico (m}^3/\text{d-m)} \\ Q &= \text{Caudal de bombeo (m}^3/\text{d)} \\ s &= \text{Descenso del nivel de las aguas (m)} \end{aligned}$$

4.2.6 *Gradiente hidráulica*

Es la pendiente de la superficie piezométrica en el acuífero y se determina por la relación de la diferencia de niveles entre dos puntos y la distancia entre ellos.

$$i = \frac{(h_1 - h_2)}{l}$$

Por lo tanto, la velocidad del flujo también puede ser expresada como $V = k_f \times i$.

4.2.7 *Radio de influencia*

Es la distancia alrededor de la obra de captación hasta donde llegan a ocurrir descensos en el nivel de agua cuando se realiza el bombeo.

5. **Captación de aguas subterráneas**

Una captación de agua subterránea es una obra hacia la cual fluye el agua de los pequeños poros, cuando es extraída por medio de alguna obra artificial o implemento mecánico, creando un cono de depresión que se extiende hacia los lados de la zona de extracción. La depresión resulta ser menos acentuada cuanto más distante se encuentre del punto de extracción.

En general, cuando se habla de captación de agua subterránea, se piensa en pozos perforados, hincados o excavados por ser los más difundidos y por la amplia difusión y desarrollo que han alcanzado los equipos de perforación. Sin embargo, desde la antigüedad

existen otras formas de captación que tuvieron y siguen teniendo cabida en la explotación de las aguas subterráneas.

El hecho que una excavación o perforación se llene de agua, no implica necesariamente que sea una buena captación. Para ser calificada como tal, después de vaciada debe estar en capacidad de volver a llenarse rápidamente, e idealmente, que el agua no pueda ser agotada para un determinado caudal de extracción, es decir, que su poder de recuperación sea superior a la capacidad de extracción.

Las captaciones pueden agruparse en: a) verticales; b) horizontales; y c) mixtas. Dentro del grupo de las captaciones verticales se tiene a los pozos excavados, pozos hincados y pozos perforados. En el caso de las captaciones horizontales se cuenta con las galerías, zanjas o trincheras y drenes; y entre las captaciones mixtas se tiene a los pozos radiales y otras combinaciones entre los pozos de tipo vertical y horizontal.

6. Galerías

En general, las galerías son obras destinadas a la captación y conducción del agua subterránea hasta un punto determinado, bien sea para su distribución o para consumo. Para efectos del presente documento, se consideran como galerías a los sistemas de captación de aguas subálveas o subsuperficiales ubicadas en los lechos de los ríos o sus márgenes por medio de drenes o bóvedas.

La construcción de las galerías requieren de una cuidadosa planificación de los trabajos para asegurar el buen funcionamiento del mismo y a la vez evitar accidentes. La organización de los trabajos y la concepción de su ejecución dependerá en todo caso del tipo de material a excavar, consolidación o dureza del suelo, profundidad a que se encuentran las aguas subterráneas, entre otras.

6.1 Utilización de las galerías

Las captaciones más antiguas fueron pozos excavados, galerías o kanats realizados por lo general en materiales no consolidados por permitirlo los medios constructivos disponibles por entonces, como eran picos y palas. En muchas regiones del mundo, donde la mano de obra es barata, aun se siguen excavando pozos y galerías de la misma forma que hace 3.000 ó 4.000 años.

Las galerías filtrantes pueden construirse en rocas plutónicas, metamórficas, volcánicas y, en menor grado, en sedimentarias consolidadas o carsificadas, siendo la mayor aplicación en rocas no consolidadas, y particularmente en aquellas ubicadas en los lechos arenosos de ríos, alimentados directamente por una corriente superficial de agua de buena calidad.

En general, la captación con galerías está fundamentalmente indicada cuando se desea obtener caudales importantes de agua en zonas próximas a ríos o lagos, y/o en acuíferos en los que no sea posible o conveniente, producir un importante descenso del nivel piezométrico.

6.2 Ventajas de las galerías construidas en materiales no consolidados

El material no consolidado en donde comúnmente se construyen las galerías tiene una composición litológica muy variable, conformada por capas de arena, grava, guijarros y arcilla, siendo las principales ventajas de su construcción las siguientes:

- a) Fáciles de excavar o perforar.
- b) Posición favorable para recibir la recarga de los ríos y lagos al estar ubicados normalmente en el fondo de los valles que frecuentemente corresponden a zonas planas con niveles piezométricos muy próximos a la superficie.
- c) Suelos con alta porosidad efectiva, permiten disponer de mayor cantidad de agua subterránea.
- d) Permeabilidad más elevada con respecto a otras formaciones, lo que facilita el desplazamiento del agua.
- e) Disponibilidad de agua en períodos de escasas lluvias, cuando el caudal de los ríos es mínimo o nulo, al permitir que las aguas subterráneas circulen por el material aluvial que conforma el valle del río, mientras que en período lluvioso, el caudal superficial del río recarga el acuífero incrementando la disponibilidad de los recursos hídricos.

6.3 Clasificación de las galerías

6.3.1 Según características constructivas

Las galerías pueden ser clasificadas como: a) galerías propiamente dichas, b) zanjas o trincheras, c) drenes y d) captaciones mixtas.

- a) *Galerías propiamente dichas*: son excavaciones horizontales que se inician con un emboquillado o boca de entrada, desde donde se procede a excavar la galería propiamente dicha. La parte inferior de la galería se encuentra ubicada por debajo del nivel de agua en la zona de saturación, y la parte superior en la zona húmeda. La sección transversal tiene dimensiones suficientes como para permitir el desplazamiento de los equipos y de las personas encargadas de su construcción. Usualmente las secciones son de 1,80 x 0,80 m, con pendientes del piso comprendidas entre uno y diez por mil. Para facilitar los trabajos, deben excavar pozos de ventilación cada 40 o 100 m a fin de ventilar la galería y para retirar los materiales provenientes de la excavación.
- b) *Zanjas o trincheras*: están compuestas por excavaciones a cielo abierto, utilizadas fundamentalmente cuando el agua subterránea está muy próxima a la superficie del suelo y no se requieren provocar grandes descensos del nivel freático. Normalmente, las profundidades no exceden los seis metros. Este tipo de obra está

expuesta a problemas de crecimiento de algas, erosión, obstrucción por vegetación o contaminación superficial.

- c) *Drenes*: están compuestos por perforaciones horizontales o excavaciones de zanja en cuyo interior o fondo se instalan tuberías perforadas o ranuradas conocidas como drenes. Estos drenes se instalan en la zona húmeda del acuífero y se encuentran cubiertos con material seleccionado para garantizar un adecuado rendimiento. En el caso del tipo zanja, el relleno se efectúa con el material proveniente de la excavación y se concluye con el sellado de la superficie para minimizar la contaminación del agua por infiltración de las aguas superficiales. Normalmente, los diámetros de los drenes son mayores a 200 mm, con pendientes que fluctúan entre uno y cinco por mil. Dependiendo de la longitud de los drenes y del número de ellos, se instalan buzones de reunión.
- d) *Captaciones mixtas*: las galerías propiamente dichas y los drenes pueden combinarse con las captaciones verticales, dando como resultado captaciones del tipo mixto representadas por los pozos radiales, que se ejecutan cuando el nivel de las aguas subterráneas se encuentra a mucha profundidad y hace económicamente inviable la construcción de cualquier otro tipo de galería. La obra consiste en la construcción de un pozo vertical que se prolonga hasta llegar al nivel freático, desde donde se inicia la construcción de uno o más emboquillados o bocas de entrada, mayormente en sentido perpendicular a la dirección del flujo de las aguas subterráneas. En el caso de las galerías propiamente dichas, las secciones y pendientes son similares a las señaladas anteriormente y si la longitud de cada ramal es mayor a 50 m, es conveniente la construcción de pozos para ventilación y para la extracción del material de excavación cada 50m.

6.3.2 Según características del acuífero

A su vez, las galerías de filtración se clasifican de acuerdo a las principales características del acuífero: a) patrón de flujo; y b) régimen de escurrimiento.

Los patrones de flujo pueden ser de dos tipos: a) líneas de flujo horizontales con equipotenciales verticales, y b) líneas de flujo radiales con equipotenciales cilíndricos o semicilíndricos.

El primer tipo de líneas de flujo es característico de las galerías que comprometen todo el espesor del acuífero y está representado por las galerías tipo trinchera, zanja o socavón en donde las líneas de flujo del escurrimiento se asemejan a líneas rectas inclinadas con respecto a la horizontal, y las equipotenciales quedan constituidas por superficies planas que casi coinciden con la vertical, excepto en las inmediaciones de la captación misma (ver figura 6.1).

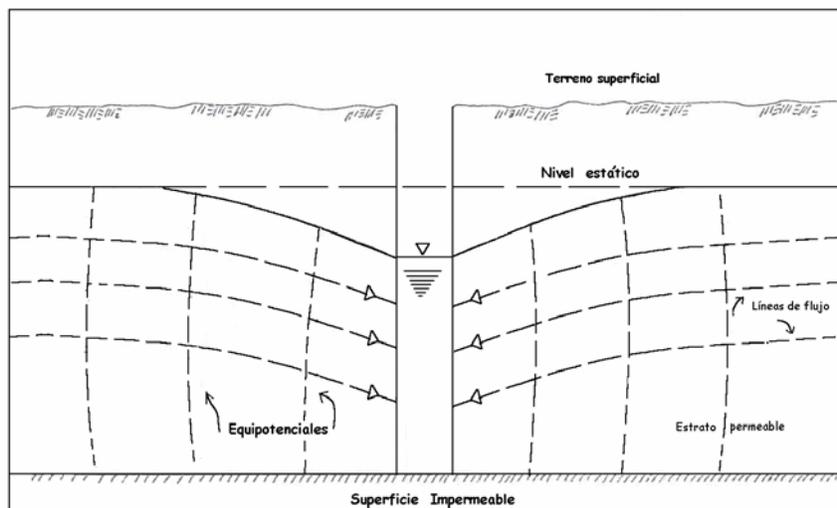


Figura 6.1 Captación con líneas de flujo paralelas y equipotenciales casi verticales

El segundo tipo de líneas de flujo se presenta en acuíferos profundos con galerías superficiales del tipo dren y se caracteriza por que las líneas de flujo del escurrimiento representan curvas radiales dirigidas hacia la captación, y las equipotenciales quedan constituidas por superficies cilíndricas, con el centro en el punto de captación (ver figura 6.2).

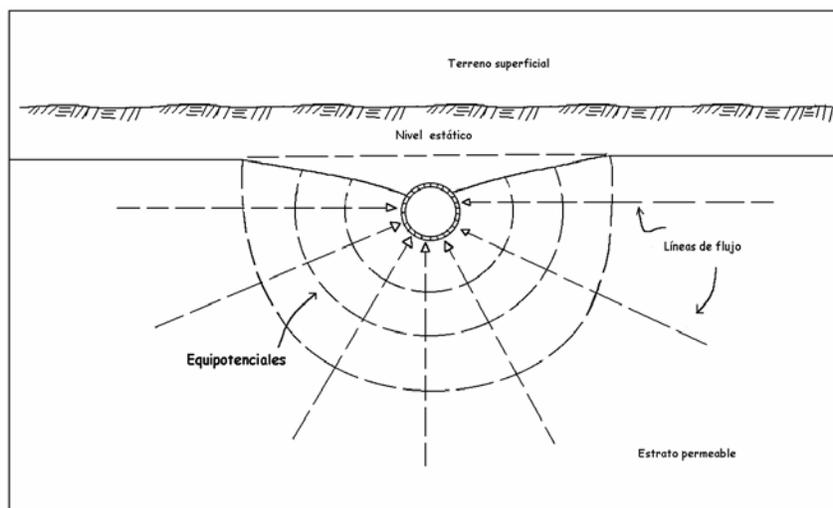


Figura 6.2 Captación con líneas de flujo radiales y equipotenciales cilíndricas

En cuanto al tipo de régimen de escurrimiento hacia la captación pueden existir condiciones de equilibrio y desequilibrio.

Las condiciones de equilibrio se presentan cuando, después de un cierto tiempo, se produce la estabilización de la velocidad de escurrimiento y del nivel de depresión de la napa de agua. Para que exista un estado de equilibrio, es indispensable que el caudal extraído por unidad de longitud de galería sea menor o igual al caudal suministrado por el propio acuífero o que, en su defecto, exista una fuente superficial de alimentación de agua. Todo esto conduce a que el nivel de agua en el acuífero se deprima hasta un punto fijo que permite el escurrimiento del caudal que se extrae.

Las condiciones de desequilibrio no permiten la estabilización del escurrimiento, conduciendo a que la depresión en el nivel de agua aumente con el tiempo y las velocidades de escurrimiento disminuyan también en este tiempo. Esto es normal cuando la fuente de suministro de agua proviene de terrenos saturados con baja capacidad de recarga.

De la combinación de los factores a) patrón de flujo; y b) régimen de escurrimiento, se pueden definir las siguientes condiciones:

- Galerías que comprometen todo el espesor del acuífero bajo condiciones de:
Equilibrio, o
Desequilibrio
- Galerías superficiales bajo condiciones de:
Equilibrio, o
Desequilibrio

Teniendo en cuenta que las galerías para abastecimiento de agua deben ser diseñadas para trabajar bajo condición de equilibrio, las formulaciones que más adelante se presentan están referidos a este tipo de condición.

a) Galerías que comprometen todo el espesor del acuífero

Esta situación se da en acuíferos de poco espesor, en los que la galería de filtración se ubica en la parte inferior del acuífero, es decir en el estrato impermeable. Las galerías pueden ser de dos tipos:

- Galerías en acuífero con escurrimiento propio: Considera que la masa de agua se desplaza en un solo sentido a través del estrato permeable y es interceptada por la galería (ver figura 6.3).

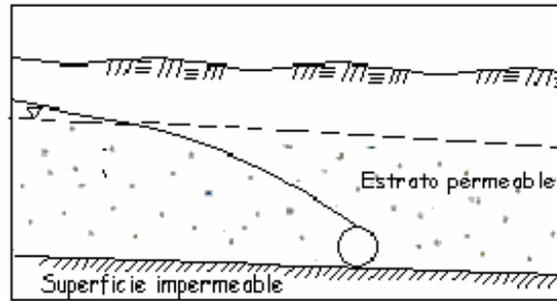


Figura 6.3 Galería que comprometen todo el espesor del acuífero y ubicada en acuífero con escurrimiento propio.

- Galerías en acuífero con recarga superficial: El concepto es similar al anterior, a excepción que el agua de recarga o de reposición es suministrada por un curso o cuerpo de agua superficial (ver figura 6.4).

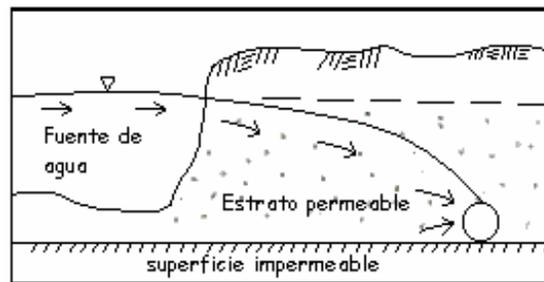


Figura 6.4 Galería que comprometen todo el espesor del acuífero y ubicada en acuífero con recarga superficial

b) Galerías que comprometen la parte superior del acuífero

Está representado por acuíferos profundos y de gran potencia, en donde la obra de captación se ubica en la parte superior del acuífero y es abastecida por ambos lados. También se presentan dos posibilidades:

- Galerías en acuífero con escurrimiento propio: La galería recolecta los escurrimientos propios del acuífero por ambas caras del dren (ver figura 6.5).

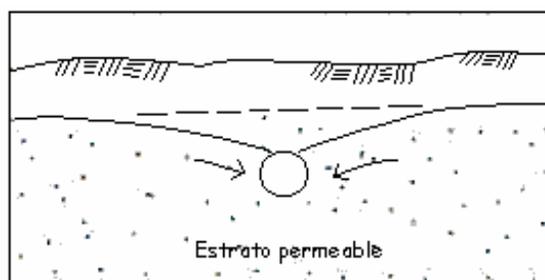


Figura 6.5 Galería que comprometen parte la superior del acuífero y ubicada en acuífero con escurrimiento propio

- Galerías en acuífero con recarga superficial: La galería recolecta los escurrimientos tanto del acuífero propiamente dicho como del agua proveniente de un curso o cuerpo superficial (ver figura 6.6).

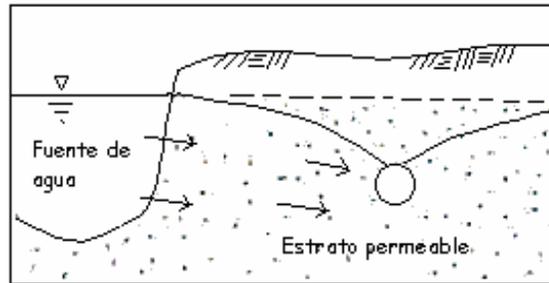


Figura 6.6 Galería que comprometen la parte superior del acuífero y ubicada en acuífero con recarga superficial

c) Galerías en acuíferos con recarga superficial

La característica de estas obras es que la galería se encuentra en un acuífero ubicado por debajo de una fuente de agua, la misma que la recarga no produciéndose el abatimiento de la napa de agua. Estos tipos de captaciones se construyen en fondos de lagos, lagunas y ríos.

- Galerías en acuífero de gran espesor: El estrato impermeable se encuentra ubicado a gran profundidad con respecto al lugar donde se encuentra ubicada la galería (ver figura 6.7).

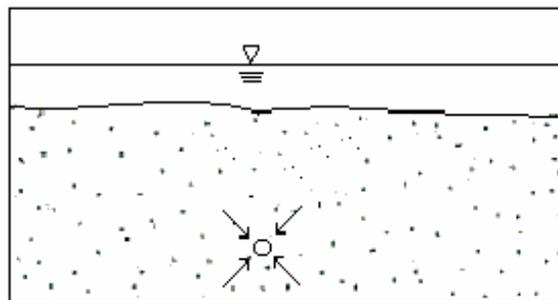


Figura 6.7 Galería en acuíferos con recarga superficial y ubicada en acuífero de gran espesor

- Galerías en acuífero de poco espesor: El estrato impermeable se encuentra ubicado por debajo del dren (ver figura 6.8).

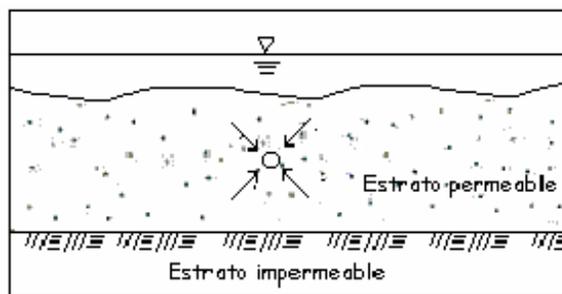


Figura 6.8 Galería en acuíferos con recarga superficial y ubicado en acuífero de poco espesor

6.4 Cálculo hidráulico

Para el diseño de galerías de filtración se disponen de varios métodos de cálculo: unos deducidos a partir de la ecuación de Dupuit y otros identificados con el apellido del científico que lo desarrolló.

Considerando que el proyectista de pequeñas obras de abastecimiento tiene que diseñar una galería de filtración en base a su experiencia y, por lo general, sin un detallado estudio hidrogeológico, resulta una buena práctica calcular por medio de diferentes métodos, variando los parámetros dentro de un rango razonable de magnitud, para luego seleccionar los resultados más probables. Aunque el procedimiento no parece muy confiable, en muchos casos proporciona buenos resultados para el diseño. El procedimiento de emplear diferentes modelos en el diseño de la galería filtrante, permite al proyectista identificar los parámetros o factores de mayor influencia. Al efecto, en las formulaciones es necesario tener en cuenta las características del acuífero y las características del dren.

Las características del acuífero se identifican por los siguientes parámetros con sus respectivos símbolos y dimensiones:

- | | |
|---|-----------------------|
| - Conductividad hidráulica o permeabilidad: | k_f [m/s] |
| - Profundidad del acuífero: | H [m] |
| - Transmisividad [$k_f \cdot H$] | T [m ² /s] |
| - Espesor dinámico del acuífero en el punto de observación: | H _b [m] |
| - Espesor dinámico del acuífero en la galería: | H _d [m] |
| - Pendiente dinámica del acuífero: | i [m/m] |
| - Porosidad efectiva: | S [adimensional] |
| - Radio de influencia del abatimiento: | R [m] |
| - Distancia entre la galería y el pozo de observación: | L [m] |
| - Distancia entre la galería y el punto de recarga: | D [m] |

En lo que respecta a la galería de filtración, sus principales características físicas con sus respectivos símbolos y dimensiones son:

- Radio del dren: r [m]
- Tiempo de extracción del agua de la galería: t [s]
- Abatimiento de la napa de agua a la altura de la galería s [m]
- Mínimo tirante de agua encima del lecho del curso o cuerpo de agua superficial: a [m]
- Profundidad del estrato impermeable con respecto a la ubicación del dren: b [m]
- Profundidad de ubicación del dren con respecto al fondo del curso o cuerpo de agua superficial: z [m]
- Carga de la columna de agua sobre el dren pd [m]

Adicionalmente, se tiene el caudal de explotación de la galería de filtración y que puede ser:

- Caudal unitario por longitud de dren: q [m³/s-m]
- Caudal unitario por área superficial: q' [m³/s-m²]

6.4.1 Galerías que comprometen todo el espesor del acuífero

La fórmula presentada por Darcy en 1856 sobre el movimiento del agua subterránea, hizo posible el tratamiento matemático de la hidráulica de los pozos. Aparentemente, Dupuit fue el primero en aplicar este tipo de análisis, para lo cual asume la existencia de una isla circular asentada en una formación de características homogéneas y en cuyo centro se ubica el pozo.

La fórmula de Dupuit representa el cálculo clásico de una galería de filtración. El supuesto básico es un flujo simétrico hacia una zanja que corta el acuífero hasta el fondo del mismo, es decir, hasta llegar a la capa impermeable; y que las líneas de flujo son horizontales con equipotenciales verticales, y la pendiente de la superficie impermeable que define la parte inferior del acuífero es pequeña en el área cercana a la galería (ver figura 6.9).

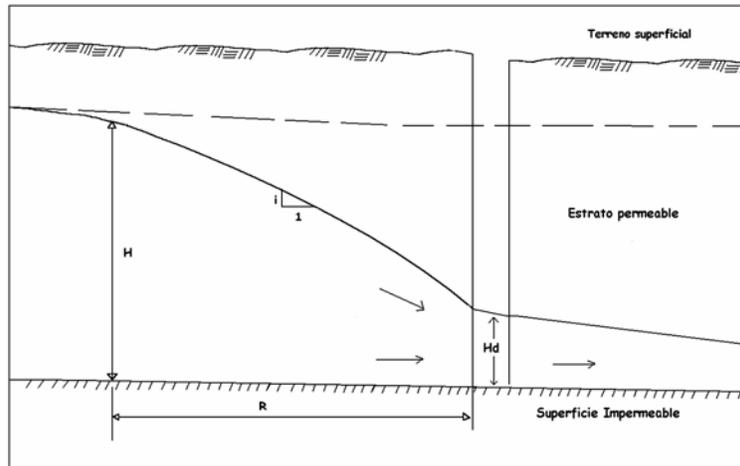


Figura 6.9 Galería que compromete todo el espesor del acuífero con escurrimiento propio.

El caudal específico “q” depende del abatimiento “s” ($H - H_d$) y de la permeabilidad (k_f) del acuífero. El radio de influencia del abatimiento (R) depende de varios factores. La ecuación general que define el caudal unitario, y conocida como la ecuación de Dupuit, es:

$$q = (H^2 - H_d^2) * k_f / R$$

La ecuación es aplicable en los casos que el caudal de extracción de la galería tipo zanja por unidad de longitud, sea menor al caudal unitario suministrado por el acuífero y al efecto, se presentan dos casos: a) acuífero con escurrimiento propio y b) acuífero con recarga superficial.

- Acuífero con escurrimiento propio: La ecuación que permite calcular el máximo caudal que puede ser extraído del acuífero por una galería tipo zanja abastecida por ambas caras y con el máximo abatimiento del tirante de agua es:

$$q = H * k_f * i$$

La ecuación normalmente aplicada cuando el acuífero alimenta a la galería tipo zanja por una sola cara (ver figura 6.9) es:

$$q = (H^2 - H_d^2) * k_f / (2 * R)$$

En el caso que el acuífero permitiese la captación de agua por ambos lados de la galería de filtración, la ecuación aplicable (ver figura 6.10) es:

$$q = (H^2 - H_d^2) * k_f / R$$

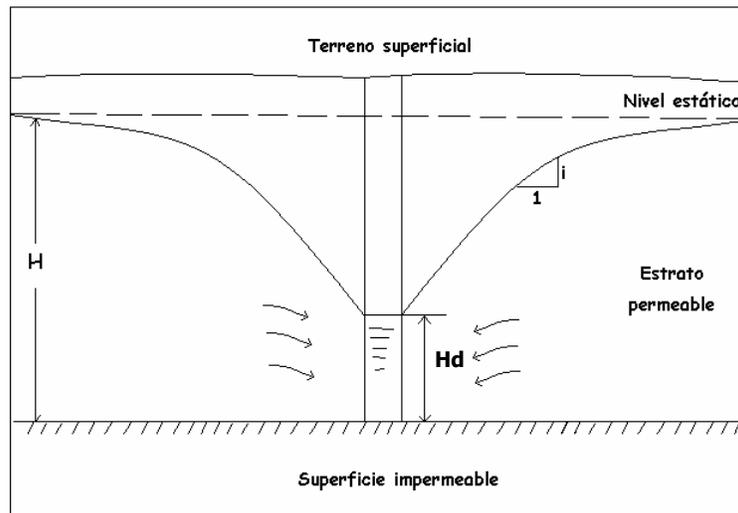


Figura 6.10 Galería que compromete todo el espesor del acuífero con escurrimiento propio y alimentado por ambos lados.

A su vez, el nivel dinámico del acuífero aguas arriba de la galería a una distancia determinada (L) de la galería y cuando el dren es alimentado por un lado, está dado por la ecuación (ver figura 6.11):

$$H_a = [H_d^2 + (2 * q * L) / k_f]^{0.5}$$

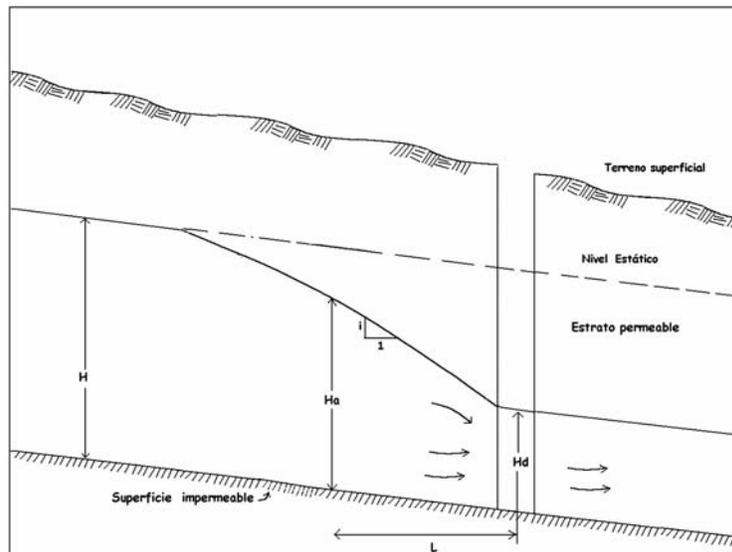


Figura 6.11 Nivel dinámico del acuífero en galería que compromete todo el espesor del acuífero y alimentado por un lado.

El radio de influencia de la galería se determina a partir de las pruebas de bombeo y en el caso de diseño de galerías, se debe tener en cuenta que la explotación del acuífero se realiza hasta alcanzar el punto de equilibrio, por lo que el radio de influencia coincide con el límite de infiltración o recarga que alimenta al acuífero, es decir, el radio de influencia es un valor constante para cada valor de caudal.

De esta manera, el radio de influencia se determina mediante la expresión:

$$R = (H^2 - H_d^2) * k_f / (2 * q)$$

Una aproximación en la determinación del radio de influencia está dada por el teorema de Weber que tiene en cuenta el tiempo de extracción del agua. Al efecto, se aplicación es válida solamente cuando se conoce el tiempo en que se logra el punto de equilibrio. La ecuación es:

$$R = 3 * [k_f * t * s / S]^{0.5}$$

En caso que el caudal extraído en la galería sea menor que el suministrado por el acuífero, la altura del escurrimiento aguas abajo de la galería [Y_o] está dado por la fórmula (ver figura 6.12):

$$Y_o = (q_a - q_b) / (k_f * i)$$

Siendo:

- q_a = caudal unitario suministrado por el acuífero [m³/s-m]
- q_b = caudal unitario extraído de la galería [m³/s-m]

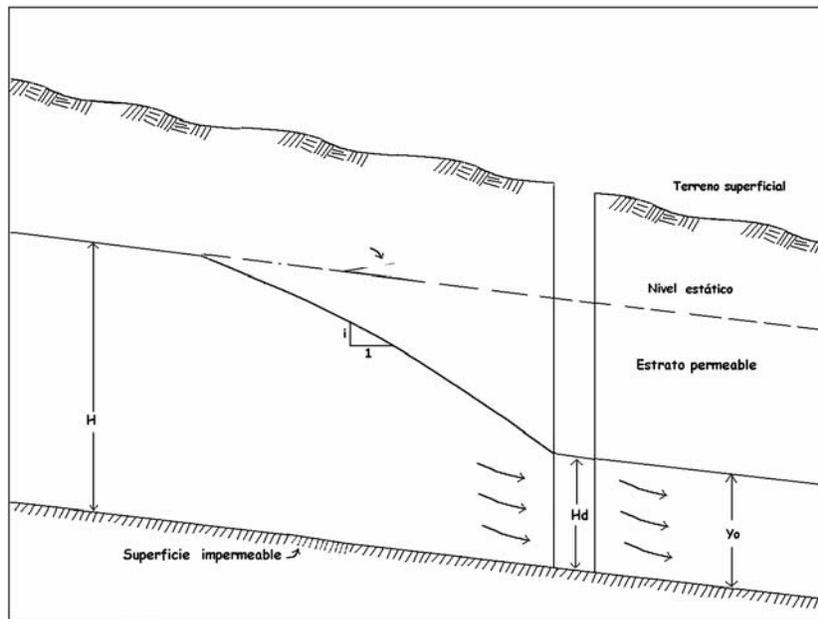


Figura 6.12 Altura de escurrimiento en galería que compromete todo el espesor del acuífero.

- Acuífero con recarga superficial: (ver figura 6.13) La ecuación que gobierna esta situación es:

$$q = (H^2 - H_d^2) * k_f / (2 * D)$$

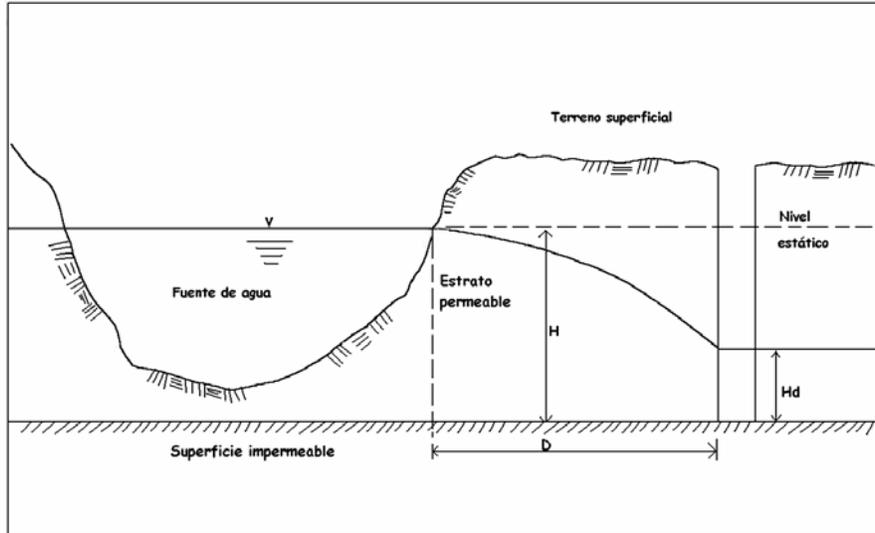


Figura 6.13 Galería adyacente a una fuente superficial.

6.4.2 Galerías que comprometen la parte superior del acuífero

Considera que la ubicación del dren por debajo del nivel natural de la napa de agua es pequeña en relación con el espesor del acuífero. Al efecto, la relación profundidad al estrato impermeable versus profundidad al dren es mayor a 10. La ecuación aplicada en el presente caso es:

- Acuífero con escurrimiento propio: (ver figura 8.14) La ecuación general que gobierna este tipo de galería es:

$$q = \pi * k_f * s / [\text{Ln} (R/r)]$$

Donde:

$$R = [q * s / (\pi * k_f)]^{0.5} / i$$

Remplazando “R” en la ecuación anterior se tiene:

$$q = \pi * k_f * s / \{ \text{Ln} [(q * s / (\pi * k_f))^{0.5} / (r * i)] \}$$

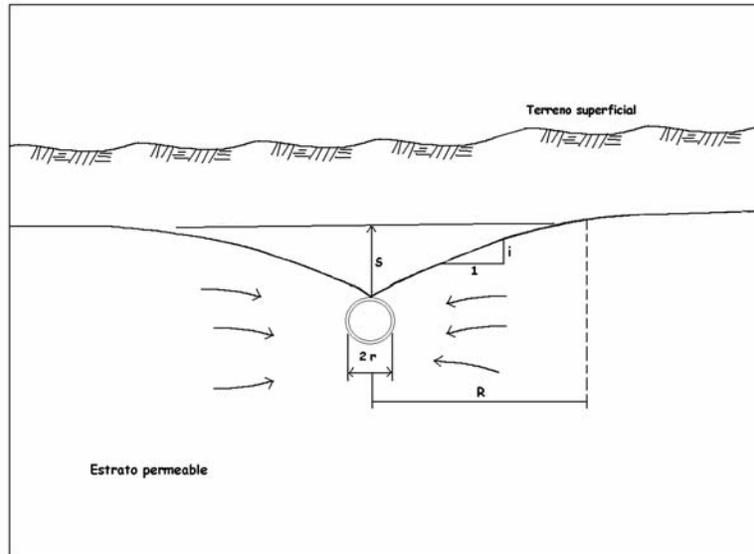


Figura 6.14 Galería que compromete la parte superior del acuífero con escurrimiento propio.

Esta última ecuación se resuelve por aproximaciones sucesivas. El caudal máximo que puede ser extraído se obtiene cuando el abatimiento de la napa de agua “s” alcanza la parte superior del dren.

La ecuación de Hooghoudt fue desarrollada para el cálculo de drenes paralelos y permite determinar el caudal específico por área superficial y expresa el caudal unitario por área superficial (ver figura 6.15).

$$q' = (8 * k_f * d * s + 4 * k_f * s^2) / D_d^2$$

A su vez:

$$d = D_d / [8 * (F_h + F_r)]$$

$$F_h = (D_d - Hd * \sqrt{2})^2 / (8 * Hd * D_d)$$

$$F_r = \text{Ln} [Hd / (\sqrt{2} * r)] / \pi$$

Siendo:

$$d = \text{Profundidad equivalente}$$

$$D_d = \text{Separación entre drenes (m)}$$

Para relaciones de “ D_d/Hd ” menores a 3,18, la deducción de los valores de F_h y F_r se debe calcular para una profundidad (Hd) igual a $D_d/3,18$. En la tabla 1 del Anexo 1 se presentan valores de “ d ” para un diámetro de 0,1m. El caudal total de drenaje es igual al área definida por el espaciamiento entre drenes y la longitud del mismo.

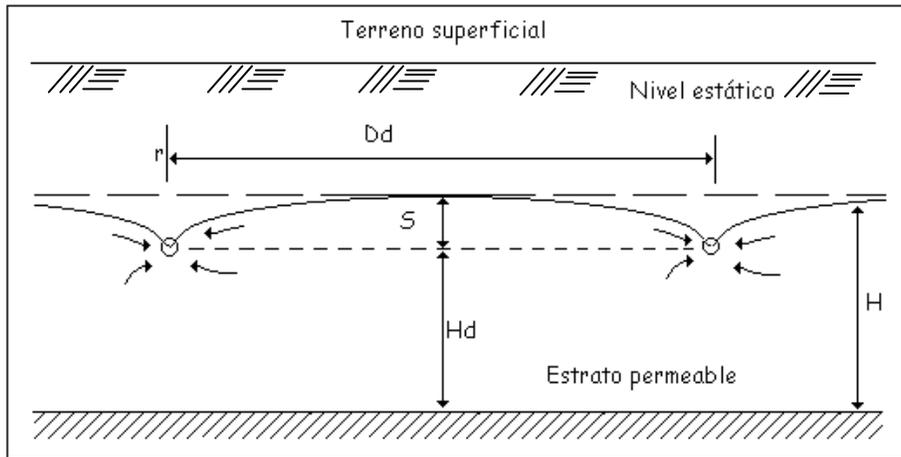


Figura 6.15 Galería con drenes paralelos que comprometen la parte superior del acuífero.

- Acuífero con recarga superficial: La ecuación que gobierna esta situación es similar a la anterior, con la única diferencia que el radio de influencia de la galería $[R]$ es conocido y está representado por la distancia a la fuente de recarga $[D]$ (ver figura 6.16):

$$q = \pi * k_f * s / [\text{Ln} (D/r)]$$

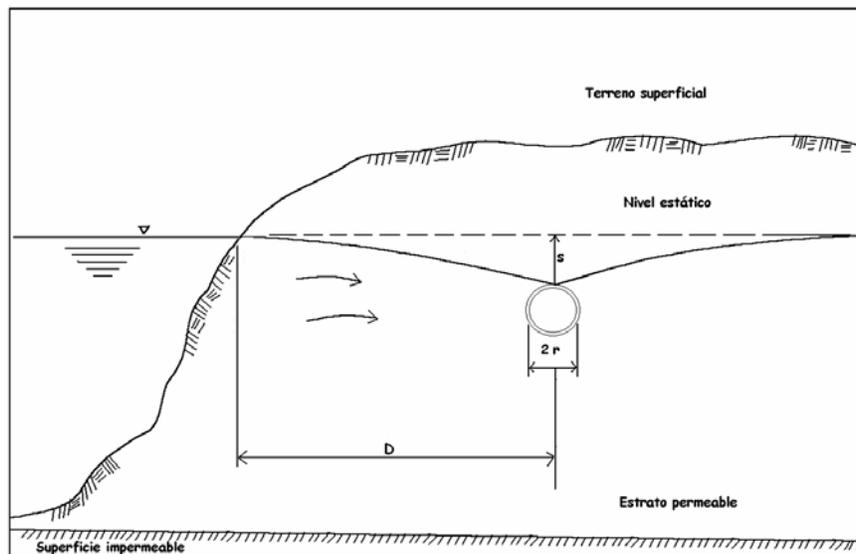


Figura 6.16 Galería que compromete la parte superior del acuífero adyacente a una fuente de recarga superficial.

6.4.3 Galerías en acuíferos con recarga superficial

- Galería en acuífero de gran espesor: Se puede considerar a un acuífero de gran espesor, cuando la relación profundidad del dren al estrato impermeable versus profundidad de ubicación al dren es mayor o igual a 10. La ecuación aplicada en el presente caso es (ver figura 6.17):

$$q = 2 * \pi * k_f * (z + a) / [\text{Ln} (2 * z / r)]$$

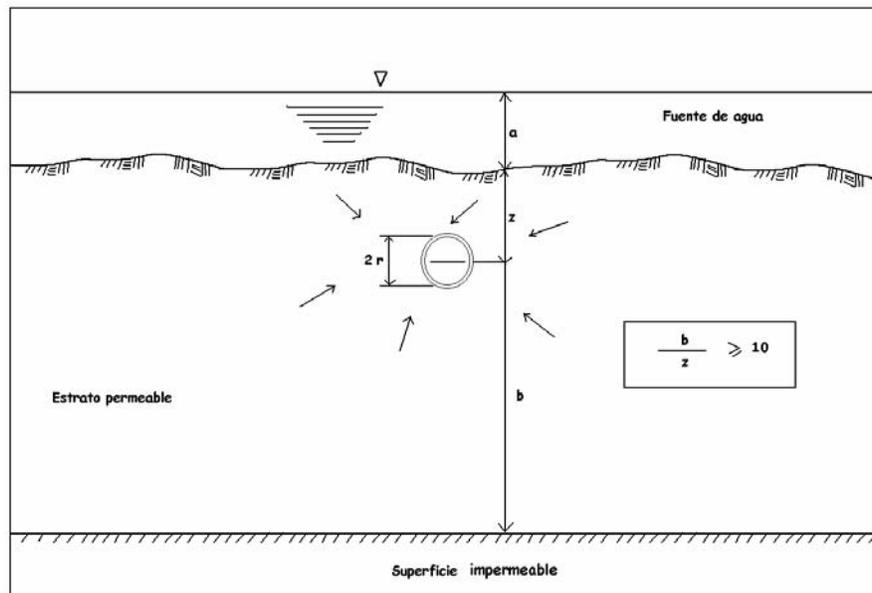


Figura 6.17 Galería en acuífero de gran espesor con recarga superficial.

La experiencia ha demostrado que galerías ubicadas en acuíferos con recarga superficial, inicialmente producen el doble de agua que las galerías situadas adyacentes al cuerpo de agua, pero después de un tiempo son afectadas por el régimen de sedimentación la cual altera el valor de la conductividad hidráulica, por lo que se recomienda aplicar la ecuación deducida a partir de la ecuación teórica anterior:

$$q = 2 * \pi * k_f * (z + a) / [4 * \text{Ln} (1.1 * z / r)]$$

- Galería en acuífero de poco espesor: figura 6.18 Se considera a un acuífero de poco espesor, cuando la relación profundidad del dren al estrato impermeable versus profundidad al dren es menor a 10. La ecuación aplicada en el presente caso y obtenida por el método de las imágenes es:

$$q = 2 * \pi * k_f * (z + a) / [\text{Ln} \{(2 * z * (z + b)) / (r * b)\}]$$

Al igual que para el caso anterior, se propone el empleo de la siguiente ecuación

$$q = 2 * \pi * k_f * (z + a) / [4 * \text{Ln} \{(1.1 * z * (z + b)) / (r * b)\}]$$

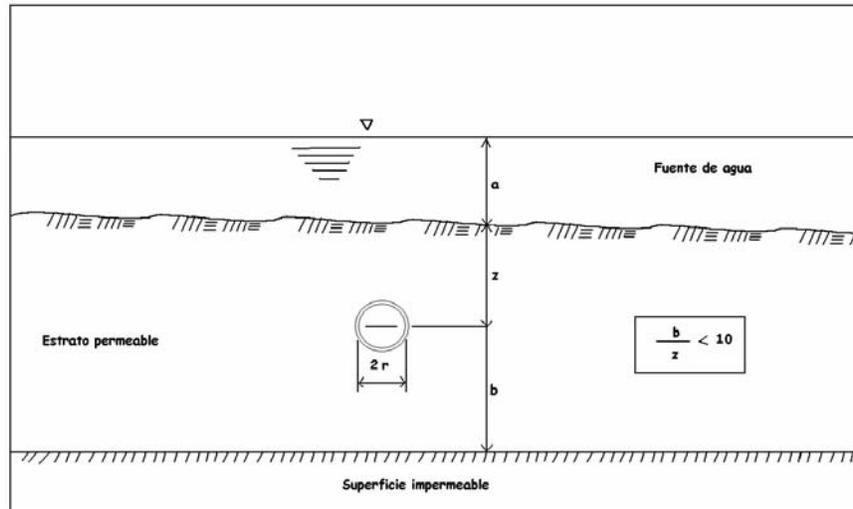


Figura 6.18 Galería en acuífero de poco espesor con recarga superficial.

Otra fórmula de amplio uso para acuíferos con esporádica recarga superficial está dada por la ecuación de Moody-Ribbens (ver figura 6.19). Esta ecuación se aplica para una relación espesor dinámico sobre el dren (p_d) y profundidad del acuífero (H), menor al 110%. Valores mayores proporcionarían valores de caudal más pequeños que los reales.

$$q = 2 * k_f * p_d / \{ [4 * k_f * t / (\pi * H * S)]^{0.5} * \exp(-r^2 * S / (4 * T * t)) + r / H * \dots \\ \dots \operatorname{erf}[r^2 * s / (4 * T * t)]^{0.5} - 2 / \pi * \ln[\exp(\pi * r / (2 * H)) - \exp(-\pi * r / (2 * H))] \}$$

ó

$$q = 2 * k_f * p_d / \{ A^{0.5} * \exp(-B) + r / H * \operatorname{erf}[B]^{0.5} - 2 / \pi * \ln[\exp(C) - \exp(-C)] \}$$

Donde:

$$A = 4 * k_f * t / (\pi * H * S)$$

$$B = r^2 * S / (4 * T * t)$$

$$C = \pi * r / (2 * H)$$

$$\operatorname{erf}(x) = 2 * \pi^{0.5} \int_0^x e^{-x^2} dx$$

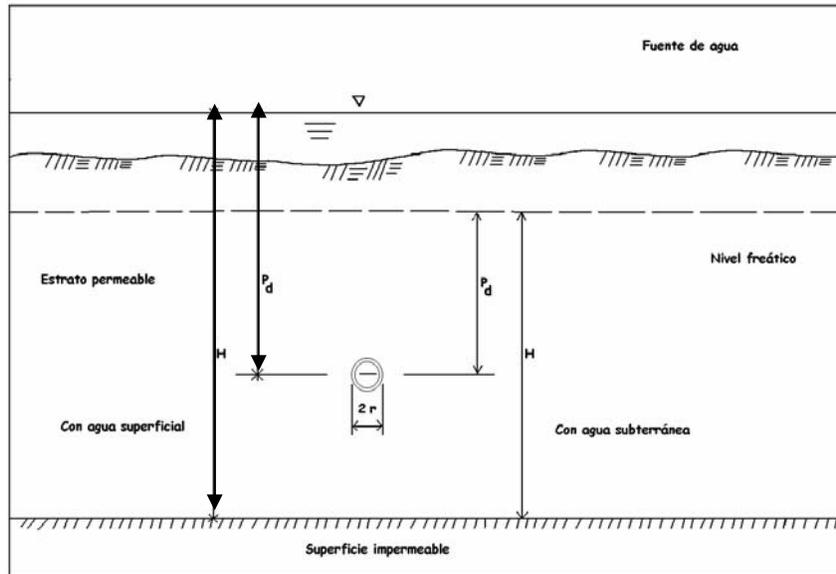


Fig. 6.19 Galería en acuífero con abatimiento del nivel de agua.

Teniendo en cuenta que el producto $r/H \cdot \text{erf}[B]^{0.5}$ es pequeño, la ecuación puede simplificarse de la manera siguiente:

$$q = 2 \cdot k_f \cdot p_d / \{A^{0.5} \cdot \exp(-B) - 2/\pi \cdot \ln[\exp(C) - \exp(-C)]\}$$

En el anexo 2 se presentan ejemplos de cálculo de galerías de filtración.

7. Conductividad hidráulica

7.1 Consideraciones básicas

Los parámetros que influyen en el rendimiento de las galerías de filtración son la conductividad hidráulica, el espesor del acuífero y la gradiente hidráulica, siendo esta última importante para los acuíferos con escurrimiento propio. De estos tres parámetros, el que influye directamente en todos los tipos de galerías es la conductividad hidráulica y depende de numerosos factores como: a) forma, disposición y tamaño de los granos del material filtrante del acuífero, y b) viscosidad y densidad del fluido.

Los ensayos de conductividad hidráulica en los laboratorios pueden alcanzar un alto grado de precisión en lo que respecta a la muestra ensayada, pero, como consecuencia de la gran dificultad que demanda la toma de muestras verdaderamente representativas del acuífero, pocas veces se llega a obtener valores concordantes entre los ensayos de campo y los de laboratorio.

Si bien los métodos actuales para medir la conductividad hidráulica en el campo son un poco groseros, tienden a definir la conductividad hidráulica promedio de los materiales

de un área determinada y resultan ser más confiables que los ensayos aislados de laboratorio.

Como las galerías de infiltración, en la mayoría de los casos, son captaciones de acuíferos poco profundos, la prueba de bombeo del acuífero libre con pozos de observación y flujo estable, es la prueba más común y confiable.

Si se trata del aprovechamiento de un acuífero con escurrimiento propio, el procedimiento recomendado es el de bombeo de un *acuífero libre con pozos de observación*. Cuando la galería se proyecta construir en las márgenes de una corriente o masa de agua superficial, es conveniente utilizar el método de *acuífero libre con recarga superficial*.

En los casos en que la galería tenga que construirse debajo de un curso o cuerpo de agua superficial y en donde resulta imposible hacer pruebas de bombeo, se impone la necesidad de realizar pruebas de laboratorio en muestras tomadas en distintos puntos y a diferentes profundidades, adoptándose como valor de conductividad hidráulica, el promedio de los resultados obtenidos en las pruebas individuales.

El costo de una prueba de bombeo es alto, pues se necesita un pozo de bombeo y por lo menos dos pozos de observación, así como bombas, medidores y personal con cierta experiencia. Por esto, para comunidades pequeñas, muchas veces no se justifica realizar una prueba de bombeo, sino solamente pruebas de laboratorio que muestren el rango en el que se encuentra la conductividad hidráulica y que permita realizar un diseño preliminar. En el cuadro 7.1, se muestran los valores promedio de conductividad hidráulica para diferentes tipos de materiales.

Cuadro 7.1 Tabla de conductividad hidráulica de algunos materiales

Permeabilidad (m/día)	10^{-6} a 10^{-4}	10^{-4} a 10^{-2}	10^{-2} a 1	1 a $10^{2.5}$	$10^{2.5}$ a 10^5
Calificación	Impermeable	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Calificación del acuífero	Acuícludo	Acuitardo	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de material	Arcilla compacta Pizarra Granito	Limo arenosa Limo Arcilla limosa	Arena fina Arena limosa Caliza fracturada	Arena limpia Grava y arena Arena fina	Grava limpia

7.2 Pruebas de bombeo

El pozo de bombeo debe penetrar todo el estrato permeable del acuífero donde se tiene prevista la construcción de la galería, mientras que los pozos de observación solamente tienen que alcanzar los niveles de agua en su punto más bajo. El pozo de bombeo y los pozos de observación deben ser desarrollados hasta obtener agua libre de turbiedad. De otra parte, los pozos de observación, en comparación con los de bombeo, son mucho más económicos por tener menores diámetros y por llegar a profundidades menores.

Cuando el terreno no está consolidado, situación que se presenta en la mayoría de los casos, es necesario instalar forros en los pozos. Los forros consisten en tubos perforados o ranurados que evitan la entrada de material fino.

Si el pozo de bombeo no atraviesa completamente el acuífero, en las cercanías del pozo de bombeo se presentará una depresión considerable de la napa de agua, adoptando la superficie de agua una forma semiesférica. En estos casos, es aconsejable situar los pozos de observación, con respecto al pozo de bombeo, a una distancia igual o mayor a dos veces la penetración del pozo en el acuífero. En los casos en donde el pozo de bombeo no alcance el estrato impermeable, la perforación debe prolongarse hasta uno o dos metros por debajo del nivel previsto para la instalación de la galería.

En las pruebas de bombeo para determinar la conductividad hidráulica, generalmente se usa un pozo de extracción de agua y no menos de dos pozos de observación. Normalmente, el diámetro de los pozos varía entre 50 y 100mm y, de llevar forros, éstos deben tener empaques de grava para minimizar el ingreso de material fino. Para medir la depresión dentro de los pozos de observación se debe utilizar un sistema que proporcione buenos resultados, siendo el más común el empleo de dos polos eléctricos conectados a un galvanómetro que ayuda a determinar el nivel de agua en el momento en que los dos polos entran en contacto con ella.

Para tener la seguridad de que el caudal extraído es constante, conviene utilizar un medidor con registrador, debiendo estar el caudal de bombeo en el rango normal de operación del medidor. Antes de instalar el medidor, es necesario bombear el pozo con el fin de eliminar cualquier tipo de material sólido que pudiera dañarlo. Para la limpieza del pozo es recomendable usar bombas centrífugas de impulsor semiabierto y resistente a la abrasión. De otra parte, la capacidad de la bomba debe ser tal, que logre bajar el nivel del agua en el pozo de bombeo en, por lo menos, unos 15 cm.

La verificación de haber alcanzado las condiciones de equilibrio en el acuífero para un caudal constante, se realiza mediante medidas periódicas del nivel de agua en los pozos de observación hasta obtener valores constantes. Se recomienda ejecutar las pruebas a dos tasas de caudal para comprobar la confiabilidad de los resultados. La prueba de bombeo puede demandar hasta 30 horas de extracción continua del agua.

Un procedimiento más sofisticado consiste en la construcción de un pequeño tramo de galería, que puede estar compuesto por un pozo vertical o una zanja, que se prolonga hasta por debajo del nivel freático y sirve de punto de partida para la perforación del pozo horizontal. En lo posible, el pozo horizontal debe construirse en el nivel donde se tiene prevista la instalación de los drenes, y debe tener por lo menos dos metros de largo y 100 mm de diámetro. En el interior de este agujero se coloca una tubería ranurada de 50mm de diámetro con su correspondiente empaque de grava. A unos dos metros de distancia del punto medio del dren y perpendicular a él, se perfora un pozo vertical de observación donde se coloca el tubo piezométrico con su respectivo empaque de grava. El extremo del tubo del dren del pozo horizontal debe conectarse a un tubo de 100 mm de diámetro con el extremo inferior cerrado. Este tubo funciona como pozo colector y se emplea para extraer el agua drenada por el dren. Antes de iniciar las pruebas de bombeo, la excavación realizada para la

construcción del pozo horizontal debe ser rellenado cuidadosamente con el material de la excavación, tratando de conservar las propiedades originales del suelo.

El modelo zanja consiste en excavar una zanja de dos o más metros de largo, hasta el nivel donde se tiene previsto el tendido del dren horizontal. Una vez llegado al nivel deseado se instala el tubo de drenaje, de características similares a lo indicado anteriormente, y se rellena la zanja colocando por capas el material extraído durante la excavación. El tubo para la extracción de agua y el tubo piezométrico son de características similares a lo descrito anteriormente.

7.3 *Determinación de la conductividad hidráulica*

7.3.1 *Acuífero libre con pozos de observación*

Es la prueba de campo más usada en la determinación de la conductividad hidráulica, y consiste en bombear el agua de un pozo mientras se realizan lecturas en el nivel de agua, en por lo menos dos pozos de observación (ver figura 7.1). La prueba se prolonga hasta alcanzar las condiciones de equilibrio, es decir hasta lograr un nivel constante en los pozos de observación. Esta prueba debe realizarse con una tasa de bombeo constante y la conductividad hidráulica se determina mediante la aplicación de la ecuación:

$$k_f = Q * \ln(R/r) / [\pi * (H_a^2 - H_b^2)]$$

Siendo:

k_f	=	Conductividad hidráulica (m/s)
Q	=	Caudal de extracción (m ³ /s)
R	=	Distancia al pozo de observación más lejano (m)
r	=	Distancia al pozo de observación más cercano (m)
H_a	=	Carga de agua en el punto de observación más lejano (m)
H_b	=	Carga de agua en el punto de observación más cercano (m)

La fórmula de pozo se basa en las siguientes consideraciones:

- Penetración del pozo de bombeo en todo el espesor del acuífero.
- Existencia de condición de equilibrio, es decir, la tasa de bombeo es constante y el nivel en los pozos permanece estable.
- Material del acuífero homogéneo, isotrópico y extendido a distancias infinitas en todas las direcciones.
- Pequeñas inclinaciones en las líneas de corriente superiores, por lo que las líneas de flujo pueden considerarse horizontales.
- Gradiente hidráulica igual a la pendiente de la línea de corriente superior y constante en cualquier punto de la vertical.
- Presencia de flujo laminar en toda el área del cono de depresión.

En el caso de emplearse galería en vez de pozo, el procedimiento consiste en determinar el caudal de extracción correspondiente a una altura prefijada de la columna de agua sobre la galería y la variación en el tiempo de la columna en el pozo de observación.

Con la información del caudal, columna de agua en el pozo de observación y tiempo de bombeo, se procede a determinar gráficamente el máximo caudal de extracción y la mínima columna de agua en el pozo de observación. El procedimiento de cálculo se presenta en el anexo 3.

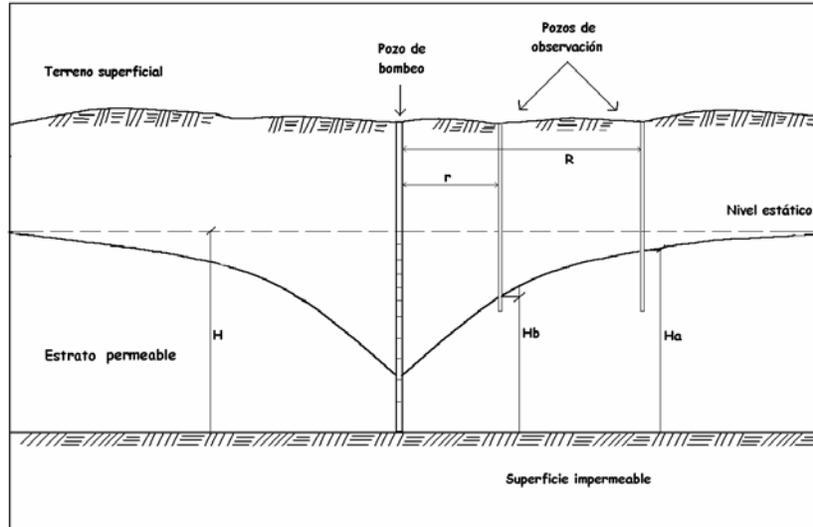


Figura 7.1 Determinación de la conductividad hidráulica en acuífero libre con pozos de observación

7.3.2 Acuífero libre con recarga superficial

La gran mayoría de las galerías de infiltración se construyen en las márgenes de ríos o lagos, por lo que es importante el efecto de la masa de agua sobre las pruebas de bombeo.

Las fórmulas para determinar la permeabilidad en pozos se obtienen considerando que el acuífero tiene extensión horizontal ilimitada, pero en el presente caso, el acuífero es truncado por una masa de agua superficial que recarga el acuífero (ver figura 7.2).

Para cumplir con la condición de borde impuesta por la intersección del acuífero con la masa de agua, o sea, que la depresión es nula para cualquier tiempo, se aplica el método de las imágenes, en donde se supone la existencia de una recarga de igual características que las del pozo, pero con valores opuestos y situada simétricamente con respecto al pozo de prueba. La ecuación que gobierna este tipo de prueba está dada por:

$$k_f = Q * \ln(r' / r) / (2 * \pi * H * (H - H_a))$$

Siendo

- k_f = Conductividad hidráulica m/s
- Q = Caudal (m^3/s)
- r' = Distancia del pozo de bombeo espejo al pozo de observación (m)
- r = Distancia del pozo de bombeo al pozo de observación (m)

H = Espesor medio del acuífero (m)
 H_a = Carga de agua en punto de observación (m)

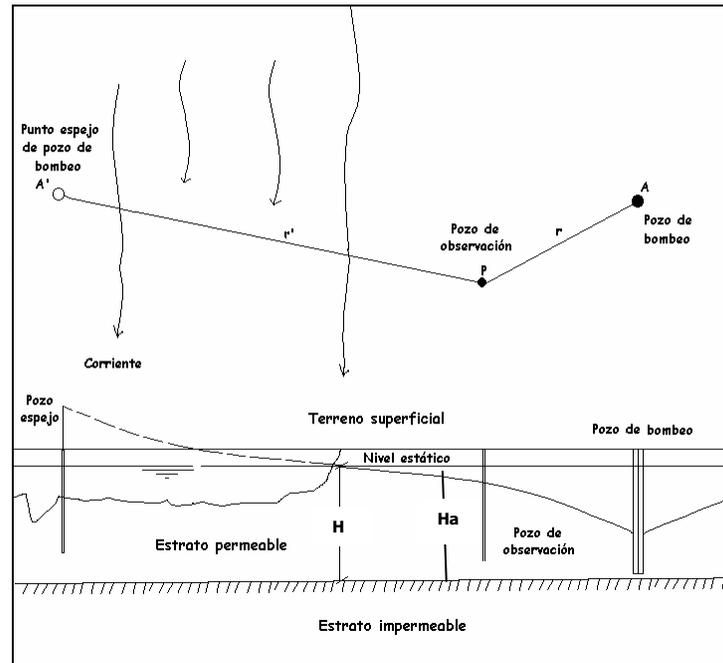


Figura 7.2 Determinación de la conductividad hidráulica en acuífero libre con recarga superficial.

7.3.3 Pozo con carga de agua

Se presentan dos métodos de determinación: a) velocidad de infiltración de la columna de agua en el pozo, y b) velocidad de recuperación de la columna de agua en el tubo piezométrico.

- Velocidad de infiltración de la columna de agua en el pozo: este procedimiento determina la conductividad hidráulica de la zona de aeración y se aplica cuando el suelo, donde se proyecta construir la galería de filtración, tiene características hidráulicas uniformes tanto en la zona de aeración como la de saturación (acuífero). De esta manera, la determinación de la conductividad hidráulica del suelo situado por encima del nivel freático se le considera como igual o similar a la del acuífero. La velocidad de infiltración se determina en un pozo de 50 a 100mm de diámetro que, luego de saturado se mide la velocidad de descenso del nivel de agua.

La diferencia entre los niveles “h” de agua en el pozo es objeto de observación y registro, determinándose sus variaciones en un pequeño intervalo de tiempo “t”, por ejemplo, un minuto (ver figura 7.3).

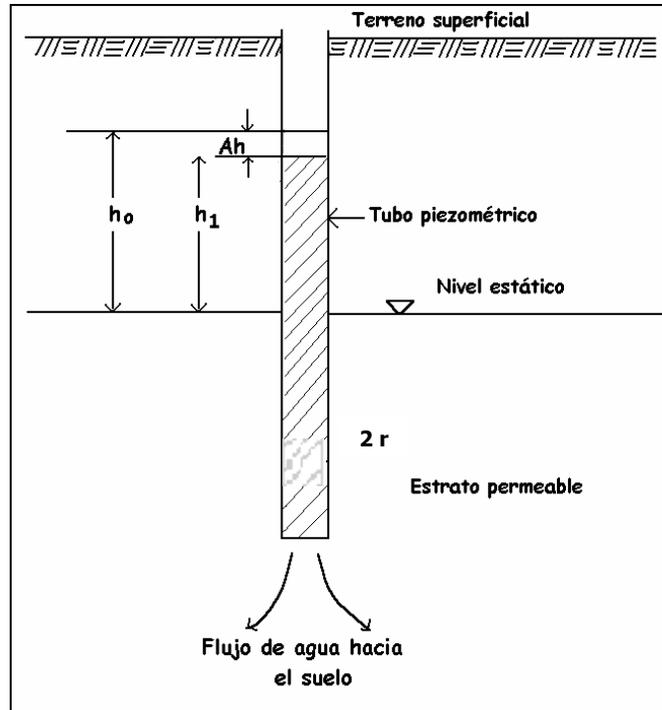


Figura 7.3 Medida de la conductividad hidráulica mediante pozo de agua y descenso de la columna de agua.

La ecuación racional es:

$$k_f = r * \text{Ln} [(h_0 + r/2) / (h_1 + r/2)] / (2 * \Delta t)$$

Una otra ecuación que puede ser aplicada es:

$$k_f = 2 * r * \Delta h / (2 * h_0 * \Delta t)$$

Siendo:

k_f = Conductividad hidráulica (m/s)

r = Radio del pozo (m)

Δh = Abatimiento de la columna de agua durante el tiempo de observación (m)

h_0 = Altura, la columna de agua sobre el nivel estático desde donde se inicia la prueba de infiltración (m)

h_1 = Altura, la columna de agua sobre el nivel estático desde donde termina la prueba de infiltración (m)

Δt = Tiempo de descenso de la columna de agua (segundos) de h_0 a h_1

Este método de determinación de la conductividad hidráulica se conoce con el nombre de ensayo de "Tubo Abierto" y está sujeto a errores significativos, a menos que " Δh " y " Δt " sean muy pequeños.

Las observaciones, tanto en este ensayo como en los similares, solamente deben iniciarse cuando el suelo alrededor del agujero o perforación esté totalmente saturado. Así mismo, en acuíferos con alta conductividad hidráulica, las lecturas nunca deben hacerse en los niveles próximos a la conclusión de la prueba; es decir, en las proximidades del nivel estático de la napa de agua.

- b) Recuperación de la columna de agua en un tubo piezométrico: la velocidad se determina mediante la medición de la velocidad de recuperación del nivel de agua dentro en un tubo piezométrico y para condiciones definidas de napa de agua.

La perforación del pozo piezométrico se realiza con la ayuda de una barrena o mediante el hincado de un tubo de 2,5 a 5cm de diámetro hasta uno o dos metros por debajo de la probable ubicación de la galería. El hincado o la perforación debe hacerse sin alterar la calidad del suelo. Una vez llegada a la profundidad se retira la barrena, en el caso que hubiera sido perforado con ayuda de esta herramienta, y se coloca el tubo piezométrico. A continuación se levanta el tubo piezométrico entre 5 y 20cm para formar una cavidad que facilite el ingreso del agua al interior del tubo piezométrico. En terrenos poco consolidados donde exista la probabilidad que la caverna colapse, se coloca una rejilla o un empaque de grava, para que funcione como filtro y elemento conservador de la geometría de la caverna (ver figura 7.4).

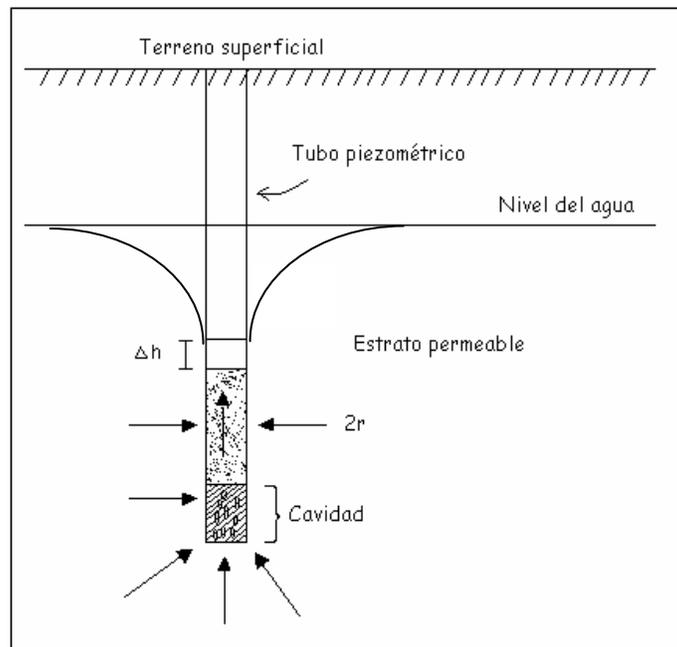


Figura 7.4 Medida de la conductividad hidráulica mediante tubo piezométrico y ascenso de la columna de agua.

Concluida la colocación del tubo piezométrico, se realiza el desarrollo del pozo mediante la extracción del agua con ayuda de una bomba hasta obtener agua libre de turbiedad y sedimentos. Este procedimiento debe efectuarse con mucho cuidado a fin de no alterar la forma de la cavidad.

La velocidad de ascenso del nivel de agua, se determina inmediatamente después del bombeo para eliminar el efecto de la napa freática, y puede ser ejecutado en cualquier punto entre el nivel estático de la napa freática y la base del tubo piezométrico, siendo recomendable la medición en el punto medio de la columna de agua.

La ecuación que se aplica es la de Kirkham

$$k_f = \pi * r^2 * \text{Ln} (h_1 / h_2) / [A * (t_2 - t_1)]$$

Siendo:

- k_f = conductividad hidráulica (cm/s)
 r = radio del pozo (cm)
 h_1 = Nivel de la napa de agua en el tiempo t_1 (cm)
 h_2 = Nivel de la napa de agua en el tiempo t_2 (cm)
 $t_2 - t_1$ = Intervalo de tiempo para que la columna de agua se eleve de h_2 a h_1 (segundos)
 A = Factor geométrico

El factor geométrico “A” se determina con ayuda de la figura mostrada en el anexo IV. Una aproximación para radios del pozo (r) entre 1,25 y 5,0cm y profundidad de cavidad (H) entre 2.5 y 10cm se puede obtener por medio de la ecuación:

$$A = \pi * (2 * \sqrt{2} * r + H / \sqrt{2} - 1)$$

Una segunda fórmula válida para radios del pozo (r) entre 1,5 y 6,0cm y profundidad de cavidad (H) entre 5 y 100cm se puede obtener por medio de la ecuación:

$$A = - (0,0005 * r + 0,003) * H^2 + (0,15 * r + 1,6) * H + 6,5 * r + 5,4$$

8. Selección del sitio para la construcción de la galería

8.1 Consideraciones previas

Al proyectarse la construcción de una galería de filtración como parte de un sistema de abastecimiento de agua, es necesario considerar la prueba de conductividad hidráulica del acuífero mediante pruebas de bombeo para definir si el acuífero es capaz de proporcionar un caudal predeterminado de agua durante toda la vida del proyecto. Al efecto, es indispensable encontrar un acuífero que, en el momento más crítico, tenga una recarga tal, ya sea subterránea o superficial, que satisfaga los requerimientos de agua. La localización de un acuífero con escurrimiento propio, cercano a la superficie y que no se agote durante los períodos más secos, es bastante difícil, por ello es que la mayoría de las galerías de filtración se construyen en las márgenes de ríos y lagos, o debajo del lecho de los mismos.

Si se contara con dos alternativas para ubicar la galería, siendo una de ellas la ubicada en un acuífero con escurrimiento propio, y la otra, en las proximidades de la orilla de una masa de agua superficial, se tiene que, en cuanto a la calidad del agua, es preferible seleccionar la primera por tener menor probabilidad de estar contaminada bacteriológicamente; sin embargo, en cuanto a confiabilidad en el rendimiento, es más atractiva la segunda alternativa.

Los lugares más convenientes para la construcción de galerías de filtración son las márgenes planas de los cursos y cuerpos de agua, con poca diferencia de elevación entre el nivel del agua y el nivel superior del terreno y próximos a la orilla del curso de agua, con el fin de evitar grandes excavaciones. De otra parte, el material que forma el lecho del río en la zona de captación debe tener una granulometría que le permita trabajar a la galería de filtración como filtro lento.

Para minimizar la contaminación de las aguas captadas por la galería, es recomendable ubicarla lo más alejada posible de las fuentes de contaminación tales como: lagunas de estabilización, filtros percoladores, letrinas, descargas industriales, etc. Así mismo, por cuestiones de seguridad, el lugar seleccionado para la construcción de la galería de filtración no debe encontrarse expuesto a la acción de erosión por parte de la corriente del curso de agua, que pudiera poner en peligro el dren al adelgazarse el espesor de la capa del suelo que trabaja como filtro, así como la calidad del agua extraída. Esto último es muy importante, por que casi siempre la ribera de los ríos está formada por gravas, arenas y limos no consolidados que ofrecen muy poca resistencia a la erosión.

En cuanto a la distancia que debe existir entre la galería y la fuente de recarga superficial, puede considerarse como distancia mínima la que pueda recorrer la contaminación bacteriana presente en el río o lago. Normalmente, se utiliza la recomendación de la Organización Mundial de la Salud (OMS) con respecto a la distancia que debe existir entre una letrina y una fuente de agua subterránea y que es no menor a 15 metros.

La selección entre una galería que comprometa todo el espesor de un acuífero o que sólo aproveche la parte superior del mismo, depende del espesor del acuífero, de la permeabilidad del suelo, del equipo disponible para hacer la excavación, de las condiciones naturales del área disponible y, sobre todo, de la demanda de agua.

En el caso de un acuífero muy delgado, lo más acertado sería colocar el dren en el fondo, de manera tal que se pueda extraer todo el caudal que escurre por él. En el caso de acuíferos de mediano espesor, vale la pena analizar si es más económico efectuar una excavación que comprometa todo el espesor del acuífero o solamente la parte superior, lo que conducirá a obtener un menor rendimiento por unidad de longitud de galería.

8.2 Trabajos preliminares

Teniendo en cuenta que las galerías se construyen por debajo del nivel del suelo, será indispensable realizar estudios geotécnicos destinado a determinar las características geomorfológicas del lugar donde se tiene prevista la construcción de la galería. Una parte

importante es el estudio de la geología de la zona para conocer la disposición del material no consolidado en profundidad, así como sus características hidrogeológicas, variaciones en el nivel de las aguas subterráneas a lo largo del año, entre otros.

8.2.1 Información básica

La información necesaria para elaborar el diseño de una galería filtrante es:

- Plano cartográfico de la zona.
- Plano geológico y perfiles transversales.
- Perfil estratigráfico.
- Mapa de niveles de las aguas subterráneas y su variación en el año hidrológico.
- Parámetros hidrogeológicos determinados por ensayos de bombeo.
- Análisis físico-químico y bacteriológico del agua.

8.2.2 Reconocimiento de campo

El reconocimiento de campo es un factor imprescindible que permite apreciar el relieve, el afloramiento de rocas, la proximidad de posibles focos de contaminación, etc.

8.2.3 Trabajos complementarios

De no ser suficiente la información disponible, será necesaria la ejecución de trabajos complementarios como perforaciones exploratorias, trabajos de topografía, ensayos de bombeo de pozos y análisis físico-químico y bacteriológico de muestras de agua, entre otros.

8.3 Ubicación de la galería

Con la información disponible, se podrá contar con los siguientes elementos de análisis:

- Características de los horizontes del acuífero.
- Dirección y velocidad del movimiento de las aguas subterráneas.
- Profundidad del acuífero a captar.
- Propiedades del acuífero.
- Composición físico-química y bacteriológica de las aguas subterráneas.

Con toda esta información será posible decidir la ubicación más conveniente de la galería, así como su dirección, profundidad, diámetro y pendiente. Frecuentemente, la dirección es perpendicular al flujo de las aguas subterráneas, pero si existe una recarga constante de un río, podrá ser paralela a éste. La profundidad será definida en función de la variación del nivel de las aguas subterráneas, de manera que garantice su funcionamiento durante todo el año y bajo las condiciones de sequía más severas.

9. Diseño de los componentes de la galería de filtración

Considerando que el proyectista de pequeñas obras de abastecimiento de agua tiene que diseñar una galería de filtración en base a su experiencia y, por lo general, sin un detallado estudio hidrogeológico, resulta una buena práctica efectuar cálculos por medio de diferentes métodos, variando los parámetros dentro de un rango razonable de magnitud, para luego seleccionar los resultados más probables. Aunque el procedimiento no parece muy confiable, en muchos casos proporciona buenos resultados en el diseño de pequeños sistemas de abastecimiento de agua. El procedimiento de emplear diferentes modelos en el diseño de la galería filtrante, permite al proyectista identificar los parámetros o factores de mayor influencia y por lo tanto, ayuda a definir las pruebas de campo a ser realizadas.

De esta manera, una vez determinada la longitud mínima de la galería se procede al diseño de los elementos que la componen.

9.1 Conducto colector

En el diseño del conducto colector de la galería se deben considerar los aspectos siguientes:

- Sección con capacidad suficiente para que fluya el caudal de diseño.
- Mínimas pérdidas por fricción.
- Área de las aberturas del dren que faciliten el flujo de agua del acuífero hacia el conducto.

9.1.1 Diámetro

El diámetro mínimo a utilizar es el que garantice el escurrimiento del caudal de diseño con un tirante no mayor al 50%, pero en ningún caso la tubería deberá tener menos de 200mm. Este diámetro facilita la limpieza y mantenimiento de los drenes.

En casos de galerías muy largas, es posible usar distintos diámetros, teniendo en cuenta que en los tramos iniciales no es necesaria una alta capacidad de conducción, (ver figura 9.1).

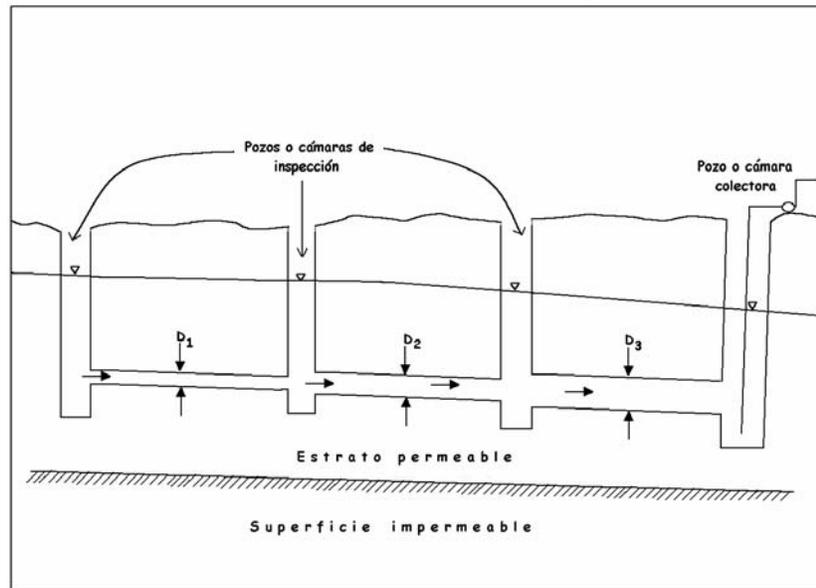


Figura 9.1 Galería de infiltración con distintos diámetros.

9.1.2 Tipo de material

Por lo general, se utilizan las tuberías comerciales disponibles, entre las que se pueden mencionar las de cloruro de polivinilo (PVC), asbesto cemento, hierro fundido y hormigón simple o armado.

La selección del tipo de material está condicionado por la resistencia estructural del ducto y su capacidad para reaccionar con la calidad de agua. Adicionalmente, los conductos empleados debe ser fáciles de perforar.

Si se evalúan los diferentes tipos de materiales, se encuentra que la tubería plástica de PVC presenta grandes ventajas: es barata, liviana, induce pocas pérdidas por fricción, fácil de transportar, instalar y perforar, no se corroe y tiene una larga vida útil.

Los conductos de asbesto cemento tienen la desventaja de ser frágiles y pesados, y además, de difícil perforación. Su manejo e instalación es delicado, por lo que exige mano de obra especializada.

El hierro fundido tiene a su favor la alta resistencia a las cargas, su gran durabilidad y el hecho de que permite un alto porcentaje de área abierta. Sin embargo, tiene el inconveniente que es muy costoso y propenso a la formación de incrustaciones las que disminuyen su capacidad hidráulica.

Las tuberías de hormigón son muy pesadas y frágiles, lo que complica su manejo, perforación e instalación. No obstante, pueden ser instaladas en pequeños tramos con las juntas abiertas.

9.1.3 *Velocidad*

Para evitar la acumulación del material fino que pueda entrar al conducto, la tubería del dren debe tener una pendiente adecuada que facilite su autolimpieza. Normalmente, la velocidad de escurrimiento del agua en el dren debe ser menor a 0.90 m/s pero con un valor mínimo de 0,60 m/s. De esta manera, el material fino podrá ser arrastrado hasta la cámara colectora donde se depositará para su eliminación.

La velocidad de autolimpieza se logra con pendientes que varían de 0,001 m/m a 0,005 m/m. No se recomienda pendiente muy altas para evitar profundizaciones excesiva en casos de galerías de gran longitud.

9.1.4 *Área abierta*

En el diseño del área perimetral abierta de los conductos, se debe tomar en consideración dos aspectos fundamentalmente:

- Pérdida de la resistencia estructural de la tubería;
- Velocidad de ingreso.

Existen diversas opiniones acerca del valor de la máxima velocidad de entrada permisible para evitar el arrastre de partículas finas. Estos valores varían desde 2,5cm/s hasta 10cm/s con un valor recomendado de 3cm/s y calculado para un coeficiente de contracción de entrada por orificio de 0,55. En todo caso, es recomendable disponer de la mayor cantidad de área abierta para tener bajas velocidades de entrada.

El área abierta por unidad de longitud del conducto estará dada por la siguiente expresión:

$$A = \frac{Q_u}{V_e \times C_c}$$

Donde:

- A = Área abierta por unidad de longitud del conducto (m²)
- Q_u = Caudal de diseño de la galería por unidad de longitud (m³/s)
- V_e = Velocidad de entrada. (m/s)
- C_c = Coeficiente de contracción

9.1.5 *Forma, tamaño y distribución de las aberturas*

El tipo de abertura que se practica en las tuberías son las perforaciones y las ranuras, las mismas que pueden ser realizadas con taladros o discos.

Las dimensiones de las perforaciones dependen de las características del conducto. Según la publicación "The Desing of Small Dams", del "Bureau of Reclamation", la relación que debe existir entre la mayor dimensión de la abertura y el tamaño de los granos del filtro está dada por la siguiente expresión:

$$\frac{D_{85} \text{ de la grava del forro filtrante } *}{\text{Ancho o diámetro de las aberturas}} \geq 2$$

(*) D_{85} es el tamaño de la abertura del tamiz por donde pasa el 85 por ciento en peso del material filtrante.

A su vez, la relación de diámetros entre el forro filtrante y el material granular del acuífero debe ser igual o menor a cinco

$$\frac{D_{15} \text{ de la grava del forro filtrante}}{D_{85} \text{ del material granular del acuífero}} \geq 5$$

La distribución de las aberturas se hace de forma tal que no reduzca sustancialmente la resistencia a las cargas externas del conducto original. Se recomienda que tanto las perforaciones como las ranuras se distribuyan uniformemente en el área perimetral, tal como se muestran en la figura 9.2, lo que evita la creación de zonas débiles por donde podría fallar la tubería.

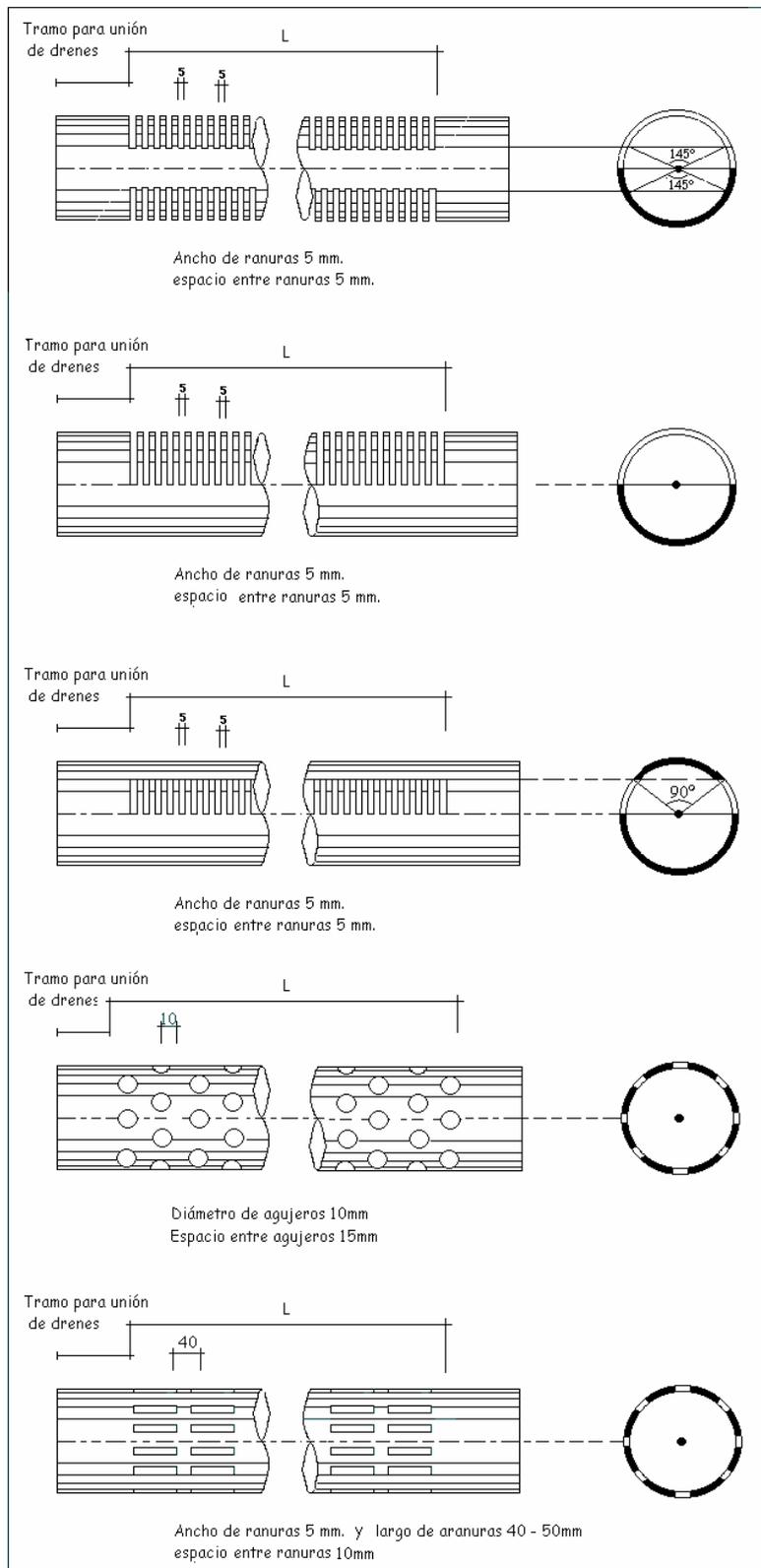


Figura 9.2 Modelos de drenes.

El máximo porcentaje de área perimetral abierta depende del tipo de material del conducto, de modo que a mayor resistencia del material, mayor área abierta permisible. En pruebas realizadas con tuberías de PVC de 200mm de diámetro, la resistencia a la carga externa aplicada con platos paralelos, disminuyó en un 20% con un área abierta del 3,2%.

Normalmente, un área abierta de alrededor del 3,0% permite velocidades de entrada que van a estar por debajo de los valores máximos recomendados. Como los conductos solamente soportan cargas de relleno, es poco probable que colapsen debido a la pérdida de resistencia causada por las perforaciones. Por ejemplo, una tubería de PVC de 200 mm de diámetro, clase 10, en una zanja de 0,60 m de ancho, debe resistir, en el peor de los casos, una carga de 1,680 kg por metro lineal, que es mucho menor que la carga máxima admisible en pruebas de laboratorio con un área perimetral abierta de 3,2% y que es de 3,050 kg/m.

9.2 Forro filtrante

Este elemento es de suma importancia en el buen funcionamiento de las galerías de filtración. Su función principal es impedir que el material fino del acuífero llegue al interior del conducto sin que sea afectada la velocidad de filtración, debiendo el forro filtrante ser mucho más permeable que el acuífero.

El forro filtrante se asemeja a la capa soporte de los filtros de arena, y pueden aplicarse las recomendaciones que para el efecto existen y que se sintetizan en el cuadro 9.1

Cuadro 9.1 Granulometría del forro filtrante.

Capa	Diámetro (mm)		Altura (cm)
	Mínimo	Máximo	
1	0,5 – 2,0	1,5 – 4,0	5
2	2,0 – 2,5	4,0 – 15,0	5
3	5,0 – 20,0	10,0 – 40,0	10

Como se observa en el cuadro anterior, el espesor de cada una de las capas de filtro no excede los 5 ó 10cms para lograr una filtración eficiente. Sin embargo, para evitar que durante la construcción queden tramos de conducto sin recubrimiento, puede ser necesario usar mayores espesores, lo cual no afecta el funcionamiento de los drenes, sino que mas bien lo protege contra cualquier defecto constructivo, por que a medida que aumenta el espesor de las capas del forro filtrante, disminuye el riesgo de que los granos más finos del acuífero sean arrastrados hacia el interior del conducto (ver figura 9.3).

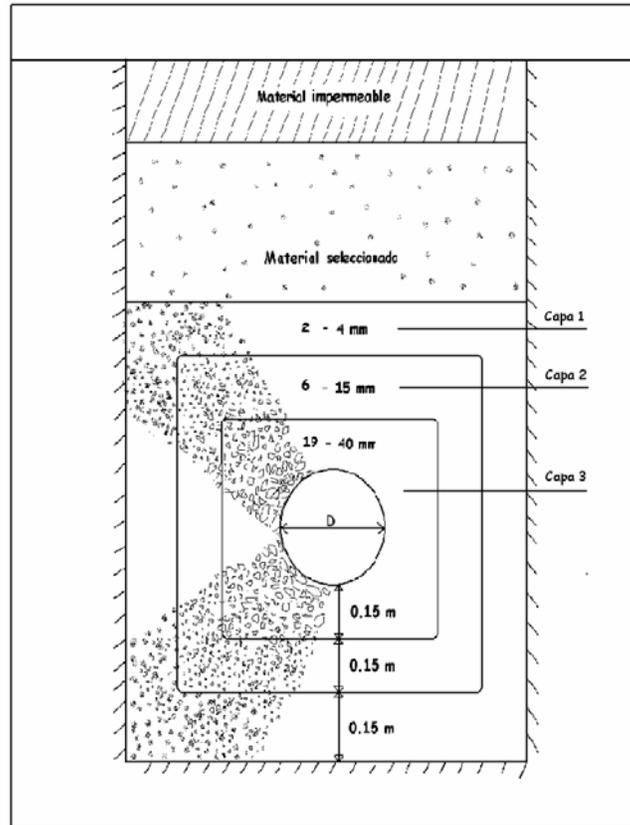


Figura 9.3 Distribución de capas concéntricas en el forro filtrante.

Actualmente, se dispone de geotextiles confeccionados con materiales sintéticos y resistentes al agua, que pueden ser empleados de manera exitosa en la conformación del forro filtrante. Al efecto, el geotextil se tiende en el fondo de la zanja o trinchera y sobre él se acomodan las diferentes capas de grava del forro filtrante que han de rodear al dren. Una vez concluido el acomodo de todas las capas filtrantes, se procede a cerrarlo conformando el empaque de grava. Encima del empaque se coloca el material de excavación hasta aproximadamente unos 0.30 m por debajo de la superficie natural del terreno (ver figuras 9.4 y 9.5).

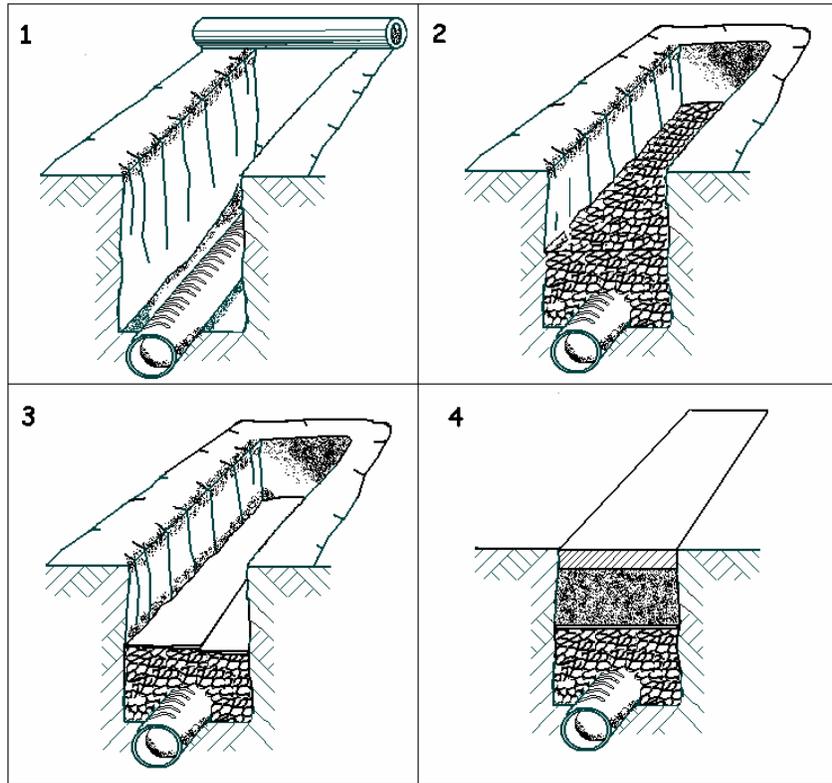


Figura 9.4 Proceso constructivo del pozo filtrante.

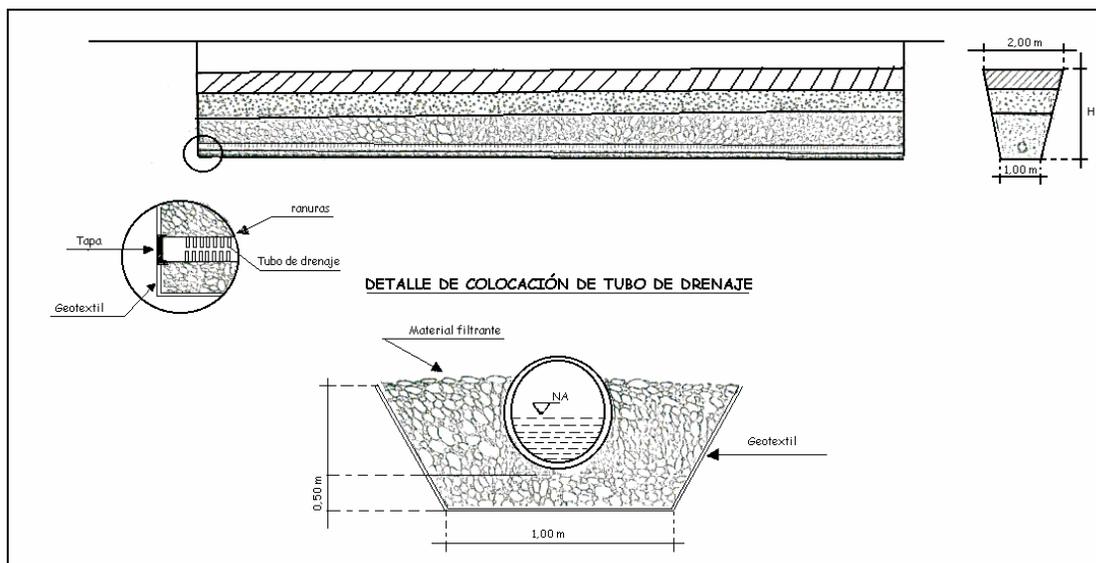


Fig. 9.5 Sección longitudinal de galería de filtración.

9.3 Sello impermeable

En las galerías ubicadas en las márgenes de los ríos o lagos y en los acuíferos con escurrimiento propio, es recomendable sellar la parte superior del relleno de la galería. El sello se ejecuta con material impermeable para evitar que el agua estancada se filtre hacia la galería y pueda contaminar el agua captada. Adicionalmente, la función del sello impermeable es aumentar la longitud del recorrido del agua superficial a través de la masa de suelos, y así mejorar su calidad física y bacteriológica.

El sello impermeable puede estar formado por una capa de arcilla de unos 30 centímetros de espesor. Este sello se puede complementar colocándole en su parte inferior papel impermeable o geomembrana. Para evitar que el agua superficial se estanque, se recomienda que la capa impermeable quede en un nivel un poco más alto que el terreno circundante, y con una pendiente que facilite el drenaje del agua superficial fuera del área donde se ubica el dren (ver figura 9.6).

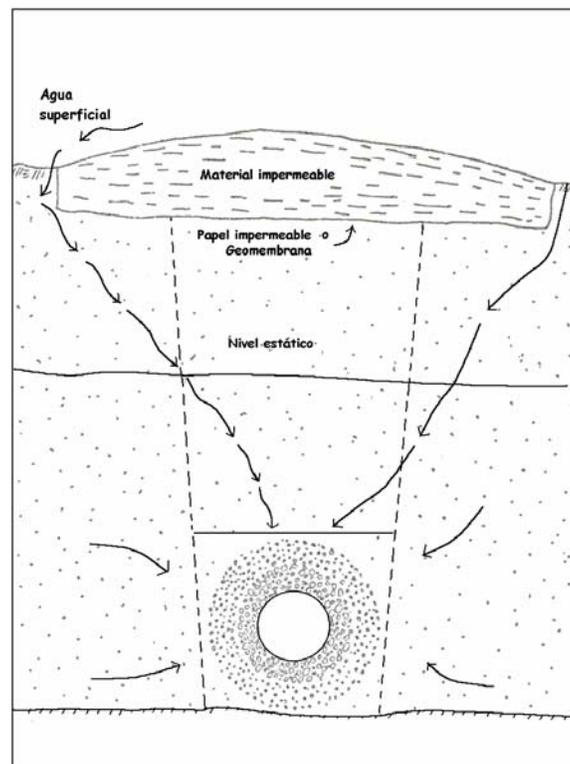


Fig. 9.6 Sello impermeable de galería.

9.4 Pozo colector

La función de este pozo es reunir el agua drenada por la galería de filtración y facilitar, si fuera el caso, el bombeo de esta agua. El pozo puede ser circular o rectangular, y sus dimensiones deben permitir a un hombre realizar labores tanto de limpieza como de mantenimiento de los conductos y válvulas de regulación de los drenes y de los equipos de impulsión (ver figura 9.7).

Es recomendable que el fondo del pozo se prolongue unos 60 centímetros por debajo de la boca de salida del dren para permitir, de una parte, la acumulación de la arena que pudiera ser arrastrada por las aguas captadas y, de otra parte, facilitar el funcionamiento satisfactorio del equipo de impulsión del agua, si lo hubiera.

Las paredes, el fondo y la parte superior del pozo deben ser fabricados de concreto reforzado y los acabados de las paredes y del fondo deben ser impermeables. La parte superior del pozo debe llevar una abertura para la instalación de una tapa de concreto o de fierro y, dependiendo de su profundidad, debe estar dotado de escalinatas para facilitar el acceso de un hombre al fondo del pozo.

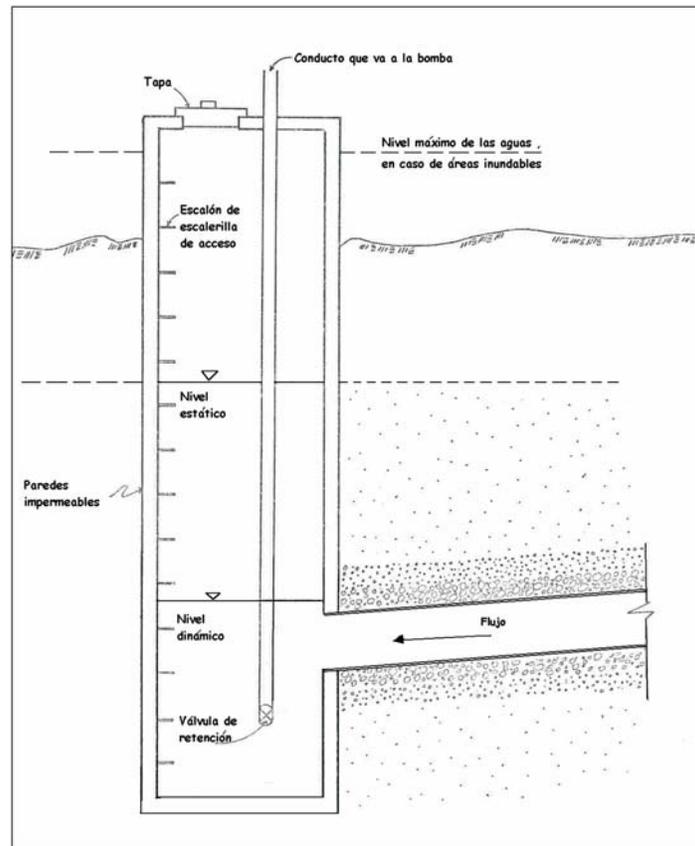


Fig. 9.7 Detalles del pozo o cámara colectora.

En el caso que la galería se encuentre ubicada en las márgenes de un curso o cuerpo de agua y que el área donde se ubica el pozo esté sujeta a inundación durante grandes avenidas, se debe elevar la tapa del pozo colector hasta una altura mayor a la que pueda alcanzar el agua, para evitar la entrada de agua superficial y la contaminación del agua captada por la galería de filtración.

9.5 Cámaras de inspección

En casos de galerías de gran longitud, es conveniente colocar cámaras de inspección en el extremo inicial y a intervalos regulares para facilitar su mantenimiento. Sin embargo, en pequeñas galerías, en el inicio del ramal puede colocarse tapones. Las cámaras de inspección son similares a las usadas en los sistemas de alcantarillado sanitario, distanciadas entre ellas unos 50m para diámetros de 200mm, y hasta de 100m para diámetros mayores de 200mm.

Estas cámaras, al igual que el pozo colector, deben tener el fondo y las paredes impermeabilizados. Además, la elevación de la tapa debe estar por encima del nivel máximo que alcanzan las aguas en el caso que la galería se encuentre expuesta a inundaciones (ver figura 9.8).

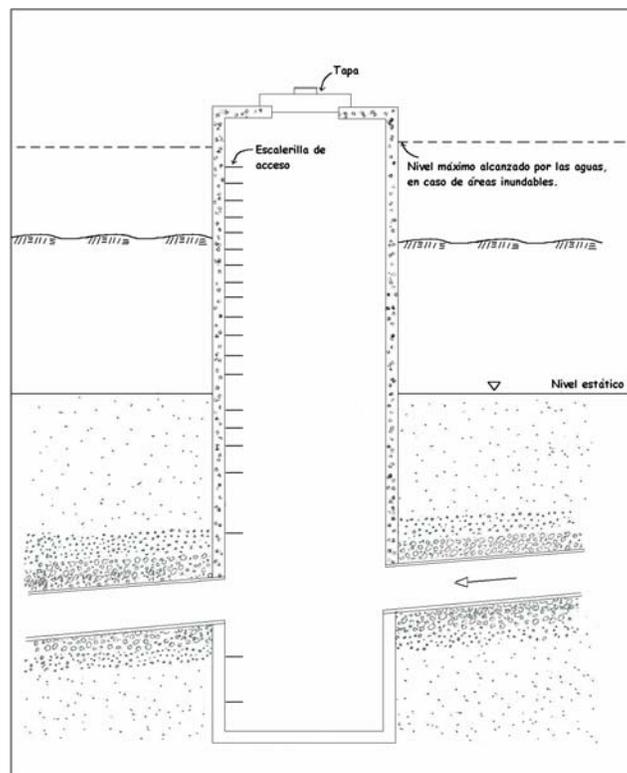


Fig. 9.8 Detalles de la cámara de inspección.

9.6 Válvulas de control

Las válvulas de control deben de instalarse en el extremo inferior del dren y se ubicará en la cámara de inspección o el pozo colector. Tiene por finalidad controlar la velocidad de ingreso del agua por las ranuras de los drenes o la depresión del nivel freático de agua y que por ningún motivo la columna de agua deberá ser menor a 0,30m por encima del conducto perforado.

10. Consideraciones para la construcción y mantenimiento de la galería de filtración y para la conservación de la calidad del agua

10.1 Construcción

Por lo general, la construcción de una galería de filtración es una operación sencilla. En las galerías localizadas en los márgenes de una corriente o en un acuífero con escurrimiento propio, la excavación puede hacerse con equipo mecánico o manualmente. Normalmente, estos acuíferos están constituidos por material no consolidado por lo que es necesario el uso de entibados para evitar el derrumbe de las paredes de las zanjas o trincheras.

10.1.1 Excavación

Los trabajos comienzan por definir la sección de la trinchera o zanja, la cual es función del tipo de suelo a excavar, de la profundidad de las aguas subterráneas, de la ubicación del dren, de la forma, de las dimensiones de la trinchera o zanja; y de las características de los equipos a utilizar durante la excavación, retiro de los escombros y de la extracción del agua. Deberá considerarse la necesidad de entibar las paredes de la zanja cuando ellas no le proporcionen estabilidad, como ocurre con los materiales no consolidados como las arenas, gravas, arcillas, etc. La dirección y pendiente de la galería deben ser comprobadas cada cierto tramo.

10.1.2 Extracción de escombros

En la excavación manual, la elevación de escombros en los primeros metros se hace por paleo, pero posteriormente se emplean recipientes metálicos elevados con polea, torno o montacargas. La polea se dispone suspendida en un trípode, colocado sobre la zanja. La elevación se realiza con sogas apropiadas y el peso de escombros a extraer manualmente no debe superar los 25 kg, pudiendo ser superior si se emplea un torno.

A los costados de la zanja debe colocarse un entablado de seguridad, que se prolongue unos 10 ó 20cm por encima de la superficie, para proteger a los poceros de la caída casual del material, bien sea de las paredes de la zanja o de la excavación. El material de excavación será acumulado a una distancia prudente del borde de la zanja para que no obstaculice los futuros trabajos y para que minimice el riesgo de derrumbe de las paredes de la zanja.

10.1.3 Extracción del agua

Una vez llegado al nivel del agua subterránea, es necesario extraer el agua para que los operarios puedan continuar con la excavación. El sistema más elemental es el empleo de electrobombas o motobombas.

Es importante evitar paradas imprevistas del proceso de extracción de agua durante los trabajos de excavación, por que puede crear situaciones peligrosas a los operarios, principalmente cuando se trabaja con caudales importantes, que podría conducir a que se

produzca un rápido ascenso en el nivel de las aguas. Es conveniente que el extremo del tubo de succión esté ubicado en pequeñas pozas con el fondo por debajo del nivel de excavación. Así mismo, es recomendable la colocación de escaleras para que, en casos de emergencia, los operarios puedan evacuar la zanja.

Las aguas extraídas deberán ser vertidas lo suficientemente lejos de la zona de trabajo para evitar su retorno a la excavación.

10.1.4 Entibado

Cuando la excavación se realice en material muy blando y poco consolidado que pueda derrumbarse, será necesario emplear entibados. Este proceso se realiza generalmente con tablas de madera colocados verticalmente contra las paredes de la zanja. En la figura 10.1 se presentan los detalles recomendados de entibados para distintas profundidades de zanja

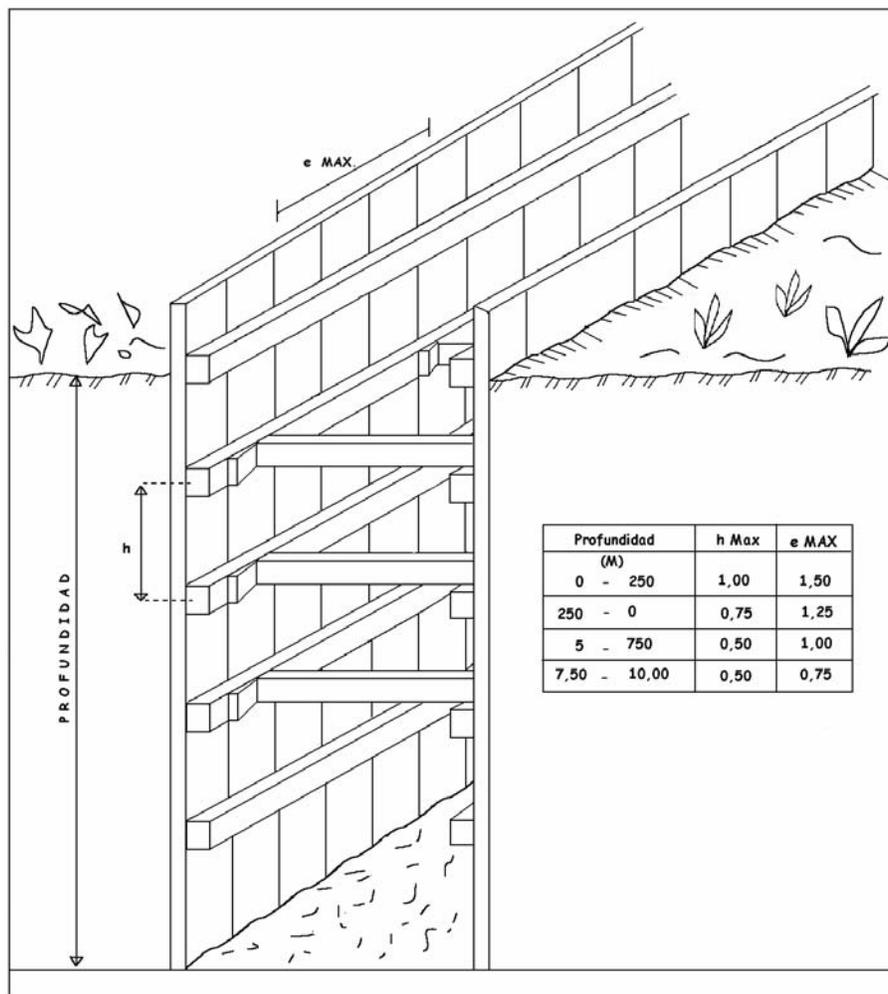


Figura 10.1 Detalle de entibados de madera para evitar deslizamientos de la zanja.

10.1.5 Sistema de drenaje

Luego de alcanzada la profundidad de diseño se coloca la mitad inferior del forro filtrante. Para realizar esta operación, es conveniente bajar por bombeo el nivel del agua en la zanja. Después de la colocación de las capas inferiores del forro filtrante se coloca la tubería perforada, y para asegurar la correcta pendiente de ésta, se debe emplear el procedimiento constructivo aplicado en la instalación de alcantarillado sanitario. En esta operación podrá emplearse geotextil para preparar el empaque de grava.

Una vez instalado el dren en la zanja, se procede a colocar las capas superiores del forro filtrante y al sellado del empaque de grava. El resto de la zanja se rellena con el material excavado hasta unos 0,30m por debajo del nivel natural del terreno, en donde se instala una lámina de geomembrana para facilitar la colocación del sello impermeable de arcilla compactada u otro tipo de material impermeable, si fuera el caso.

En galerías de muy poca longitud, donde no se justifica la construcción de cámaras de inspección, es necesario colocarle un tapón al inicio del conducto colector.

Es recomendable que la construcción se realice a fines de la estación de sequía por que: a) facilita la construcción por los bajos niveles de agua; b) requiere de menos bombeo para mantener un bajo nivel de agua; y c) aumenta la probabilidad de que la galería vaya a estar por debajo del nivel de agua establecido en el diseño.

Para la construcción del pozo colector y de las cámaras de inspección, se utilizan los mismos procedimientos utilizados para la construcción de las cámaras de inspección de los sistemas de alcantarillado.

10.2 Mantenimiento

La conservación y mantenimiento sistemático de la galería es un aspecto muy importante a considerar, lo cual permite garantizar un funcionamiento óptimo y duradero de la captación. Para ello, cada dos años deberá realizarse una inspección técnica para evaluar el estado de la galería y del forro, y las reparaciones se realizarán aprovechando el período de sequía.

Una galería adecuadamente diseñada y construida debe operar sin problemas y libre de mantenimiento si se cumplen las siguientes reglas:

- a) No extraer de la galería un mayor caudal de agua que la de diseño.
- b) Limitar la depresión del nivel freático hasta 0,30m por encima del conducto perforado.

La extracción de caudales de agua mayores a los de diseño, conduce inevitablemente al ingreso de arena y turbiedad al forro filtrante, alterando su porosidad, el rendimiento de la galería y la calidad del agua. Cuando esta condición se presenta, es difícil realizar un mantenimiento efectivo, debiendo procederse al retiro del forro filtrante obstruido, lo cual equivale a construir una nueva galería. La vida útil de la galería puede ser

conservada si se mantiene el caudal de extracción hasta una tasa que minimice la aparición de material fino con el agua captada.

La limpieza del interior de la tubería de drenaje es una operación sencilla y, al efecto, se acostumbra emplear los dispositivos desarrollados en la limpieza de tuberías de alcantarillado sanitario. En caso de que no se cuente con este tipo de equipamiento, se pueden usar escobillas radiales tiradas de una sogá desde las cámaras de inspección.

La otra dificultad que se presenta con frecuencia es el desarrollo de películas biológicas y la acumulación de precipitados inorgánicos en el forro filtrante, en los orificios del conducto y en el acuífero circundante a la galería de filtración. Esto es importante cuando se trata de aguas con alto contenido de hierro, por que ello puede resultar en la acumulación de bacterias fijadoras de hierro de los tipos "crenothrix" y "gallionella" con la consecuente producción de un limo impermeable que puede obstruir los espacios vacíos del forro filtrante. Estos problemas son muy difíciles de prevenir, pero un buen diseño puede reducir el riesgo. En general, estas acumulaciones orgánicas e inorgánicas tienden a disminuir la porosidad de todos los elementos situados alrededor de la galería, incrementando la velocidad en los orificios del conducto y en el forro de grava, con el consecuente arrastre de las partículas finas y la obstrucción de toda la galería.

Las acumulaciones, tanto orgánicas como inorgánicas, pueden ser removidas mediante la adición de productos químicos. Siendo los depósitos más comunes los de calcio, magnesio, carbonatos y limos orgánicos. El tratamiento puede efectuarse con una solución de ácido clorhídrico al 5 ó 10%, seguido de pistoneo al igual como se realiza en los pozos de agua o por inyección de aire comprimido. En caso que el conducto pueda ser afectado por el ácido, debe usarse inhibidores para prevenir cualquier daño.

Antes de dar mantenimiento a la galería, es necesario suspender el suministro de agua a la población. A continuación se distribuye el ácido a lo largo de los tramos de la galería por medio de una tubería plástica perforada de media pulgada de diámetro, insertándose la por una de las cámaras de inspección. Después de aplicado el ácido, se procede a pistonear o inyectar aire con ayuda de una tubería plástica. El propósito es provocar la mezcla del ácido con el agua acumulada en la tubería y la penetración en profundidad de la solución ácida en el acuífero. El aire se inyecta por medio de un compresor y la permanencia del ácido en la galería debe ser, por lo menos, de 8 horas. Al final de este período, el agua de la galería debe ser eliminada a una tasa de bombeo moderada hasta eliminar los últimos vestigios del ácido clorhídrico o hasta que el valor del pH haya retornado al valor normal.

Las acumulaciones orgánicas pueden ser tratadas por medio de soluciones de cloro. Las soluciones de cloro pueden ser inyectadas a la galería en la misma forma que el ácido, o inyectadas en el acuífero por medio de pozos distribuidos sobre la galería. Cuando se inyecta el cloro por medio de pozos distribuidos en la superficie, es posible continuar con el suministro de agua. Cuando el cloro se aplica en los conductos de la galería, actuará sobre la materia orgánica liberando partículas de arena y lodo, que de una manera u otra afectarán la calidad organoléptica del agua. El tratamiento con cloro puede ejecutarse en forma continua o intermitente, dependiendo de los requerimientos del sistema. Controlando las

inyecciones y manteniendo una baja concentración de cloro en el pozo colector, es posible tratar el acuífero y la galería sin afectar la calidad del suministro de agua.

10.3 Calidad del agua

La contaminación es un suceso vinculado a la actividad humana en general, y al nivel de desarrollo del área en donde se ubica la galería en particular. Ella afecta la calidad de las aguas causando, bien sea en el mediano o en el largo plazo, la contaminación del agua subterránea. En muchas ocasiones, cuando la contaminación es descubierta, el foco contaminante que la originó ha desaparecido y resulta muy difícil implementar medidas correctivas. Esto hace que resulte imprescindible el establecimiento de estrictas zonas de protección sanitaria de la fuente de agua subterránea.

La calidad físico-química del agua producida por las galerías de filtración situadas en los márgenes de las corrientes superficiales, depende de la calidad del agua subterránea en los alrededores de la galería y de la fuente superficial. A su vez, la calidad bacteriológica es muy variable y difícil de predecir. Las galerías poco profundas están sujetas a la contaminación bacteriológica por acción humana. Al efecto, el área cercana a la galería debe ser estudiada para prever cualquier tipo de contaminación. El problema es serio cuando el terreno que separa la galería de las fuentes contaminantes es fisurado o cavernoso.

El agua producida por las galerías de filtración adecuadamente diseñadas, construidas, operadas y mantenidas, no necesita de procesos de clarificación adicionales, por lo que sólo es necesario desinfectarla antes de su distribución a los consumidores.

Bibliografía

- El agua subterránea y los pozos.- 1975 – Johnson Division UOP Inc.
- Hydrology.- Oscar E. Meinzer. Dover Publications, Inc.
- Driscoll, F.G. Groundwater and wells. Second Edition 1986.
- U.S. Department of the Interior. Ground Water Manual.
- Water Resources Bulletin.- American Water Resources Association .- Kenneth B. Edwards . Estimating Aquifer Parameters from a horizontal well pumping test in an unconfined aquifer.
- Manual de Consultas para agua potable y saneamiento básico.- Proyecto ALA 86/20.
- Feitoo Olivera, Rafael.- Cuaderno sobre galerías filtrantes. Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud. Julio 1997.
- Paz Moroto, José; Paz Casañe, José.- Abastecimientos de agua. Tomo I – 1962.
- Proyecto de captação drenante de cidade de Pedra Azul, MG – COPASA-MG-junio /79.
- Martínez Beltrán, Julián.- Drenaje Agrícola. Volumen I - 1986

ANEXO I
Tablas de valores

**Tabla 1. Valores par la profundidad equivalente de Hooghoudt
($r = 0.1\text{m}$, H_d y D_d expresados en metros)**

Dd →	5 m	7.5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Hd											
0.50	0.47	0.48	0.49	0.49	0.49	0.50	0.50				
0.75	0.60	0.65	0.69	0.71	0.73	0.74	0.75	0.75	0.75	0.76	0.76
1.00	0.67	0.75	0.80	0.86	0.89	0.91	0.93	0.94	0.96	0.96	0.96
1.25	0.70	0.85	0.89	1.00	1.05	1.09	1.12	1.13	1.14	1.14	1.15
1.50		0.88	0.97	1.11	1.19	1.25	1.28	1.31	1.34	1.35	1.36
1.75		0.91	1.02	1.20	1.30	1.39	1.45	1.49	1.52	1.55	1.57
2.00			1.08	1.28	1.41	1.50	1.57	1.62	1.66	1.7	1.72
2.25			1.13	1.34	1.50	1.69	1.69	1.76	1.81	1.84	1.86
2.50				1.38	1.57	1.69	1.79	1.87	1.94	1.99	2.02
2.75				1.42	1.63	1.76	1.88	1.98	2.05	2.12	2.18
3.00				1.45	1.67	1.83	1.97	2.08	2.16	2.23	2.29
3.25				1.48	1.71	1.88	2.04	2.16	2.26	2.35	2.42
3.50				1.50	1.75	1.93	2.11	2.24	2.35	2.45	2.54
3.75				1.52	1.78	1.97	2.17	2.31	2.44	2.54	2.64
4.00					1.81	2.02	2.22	2.37	2.51	2.62	2.71
4.50					1.85	2.08	2.31	2.50	2.63	2.76	2.87
5.00					1.88	2.15	2.38	2.58	2.75	2.89	3.02
5.50						2.20	2.43	2.65	2.84	3.00	3.15
6.00							2.48	2.70	2.92	3.09	3.26
7.00							2.54	2.81	3.03	3.24	3.43
8.00							2.57	2.85	3.13	3.35	3.56
9.00								2.89	3.18	3.43	3.66
10.00									3.23	3.48	3.74
∞	0.71	0.93	1.14	1.53	1.89	2.24	2.58	2.91	3.24	3.56	3.88

Tabla 1. (Continuación)

Dd →	50	75	80	85	90	100	150	200	250
Hd									
0.50	0.50								
1.00	0.96	0.97	0.97	0.97	0.98	0.98	0.99	0.99	0.99
2.00	1.72	1.80	1.82	1.82	1.83	1.85	1.00	1.92	1.94
3.00	2.29	2.49	2.52	2.54	2.56	2.60	2.72	2.70	2.83
4.00	2.71	3.04	3.08	3.12	3.16	3.24	3.46	3.58	3.66
5.00	3.02	3.49	3.55	3.61	3.67	3.78	4.12	4.31	4.43
6.00	3.23	3.85	3.93	4.00	4.08	4.23	4.70	4.97	5.15
7.00	3.43	4.14	4.23	4.33	4.42	4.62	5.22	5.57	5.81
8.00	3.56	4.38	4.49	4.61	4.72	4.95	5.68	6.13	6.43
9.00	3.66	4.57	4.70	4.82	4.95	5.23	6.09	6.63	7.00
10.00	3.74	4.74	4.89	5.04	5.18	5.47	6.45	7.09	7.53
12.50		5.02	5.20	5.38	5.56	5.92	7.20	8.06	8.68
15.00		5.20	5.40	5.60	5.80	6.25	7.77	8.84	9.64
17.50		5.30	5.53	5.76	5.99	6.44	8.20	9.47	10.4
20.00			5.62	5.87	6.12	6.60	8.54	9.97	11.1
25.00			5.74	5.96	6.20	6.79	8.99	10.70	12.1
30.00							9.27	11.30	12.9
35.00							9.44	11.60	13.4
40.00								11.80	13.8
45.00								12.00	13.8
50.00								12.10	14.3
60.00									14.6
∞	3.88	5.38	5.76	6.00	6.26	6.82	9.53	12.20	14.7

ANEXO II
Diseño de Galería

Diseño de Galería

Ejemplo 1

Se ha diseñado una galería de filtración tipo zanja en un acuífero con escurrimiento propio que compromete todo su espesor. El largo de la galería [L] es de 100m, la profundidad del acuífero [H] es de 8m y la conductividad hidráulica [k_f] es de 0.0005m/s. Calcular: a) la máxima capacidad de producción de agua; b) la capacidad de captación de la galería si se produjera un abatimiento de la napa de agua [s] de 2m y la alimentación se realizará por ambas caras de la galería; y c) para condiciones similares a (b) pero con alimentación por una sola cara de la galería. Mediante pruebas de bombeo se ha determinado que la pendiente del acuífero [i] es de 10.6%.

- a) La máxima capacidad de producción del acuífero (ver figura 1.1) se determina mediante la ecuación:

$$q = H * k_f * i$$

Reemplazando los valores en la ecuación se tiene:

$$\begin{aligned} q &= 8.00 \text{ m} * 0.0005 \text{ m/s} * 0.106 \text{ m/m} = 0.000424 \text{ m}^3/\text{m-s} \\ Q &= 0.000424 \text{ m}^3/\text{m-s} * 100\text{m} = 0.0424 \text{ m}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$Q = 0.042 \text{ m}^3/\text{s} \text{ o } 42.4 \text{ l/s}$$

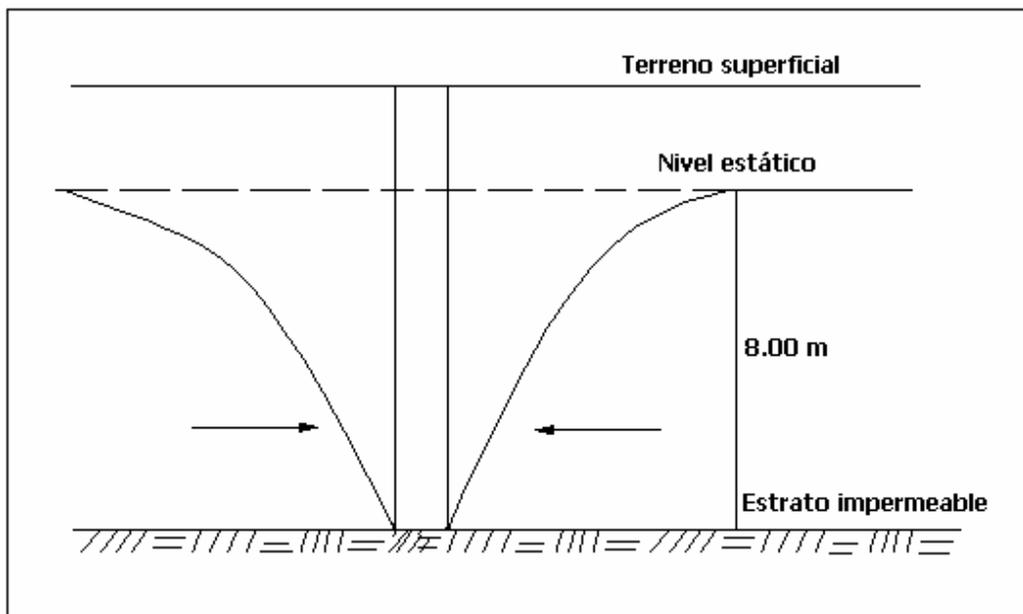


Figura 1.1 Galería con escurrimiento que compromete todo el espesor del acuífero.

- b) Para un abatimiento [s] de 2m, la capacidad de captación de la galería de filtración alimentado por ambos lados (ver figura 1.2) es:

$$Q = L * (H^2 - Hd^2) * k_f / R$$

Donde:

$$R = 3 * [k_f * t * s / S]^{0.5}$$

Considerando que las galerías se diseñan para condiciones de equilibrio, se ha estimado que esta estabilidad se estaría consiguiendo luego de un día de operación y para una porosidad del 30%, se tiene que el radio de influencia de la galería [R] es igual a:

$$R = 3 * [0.0005 \text{ m/s} * 1 \text{ días} * 24 \text{ h/día} * 3600 \text{ s/h} * 2 \text{ m} / 0.3]^{0.5}$$

$$R = 50.91 \text{ m}$$

$$Q = 100 \text{ m} * [(8.00 \text{ m})^2 - (6.00 \text{ m})^2] * 0.0005 \text{ m/s} / 50.91 \text{ m}$$

$$Q = 0.0275 \text{ m}^3/\text{s} \text{ o } 27.5 \text{ l/s}$$

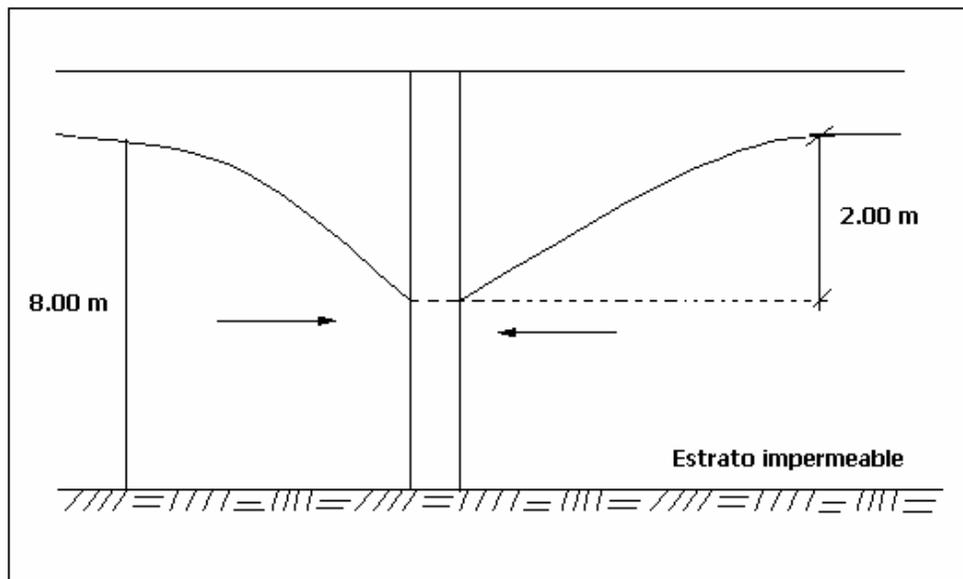


Figura 1.2 Galería con escurrimiento que compromete todo el espesor del acuífero y con alimentación por las dos caras.

- c) Si la alimentación fuera solamente por una cara de la galería de infiltración (ver figura 1.3), el caudal de captación sería:

$$Q = L * (H^2 - Hd^2) * k_f / (2 * R)$$

$$Q = 100 \text{ m} * [(8.00 \text{ m})^2 - (6.00 \text{ m})^2] * 0.0005 \text{ m/s} / (2 * 50.91 \text{ m})$$

$$Q = 0.0138 \text{ m}^3/\text{s} \text{ o } 13.8 \text{ l/s}$$

Discusión: La solución del problema por este método demanda el conocimiento exacto de la pendiente dinámica del acuífero y del radio de influencia, los mismos que deben ser obtenidas mediante pruebas de bombeo.

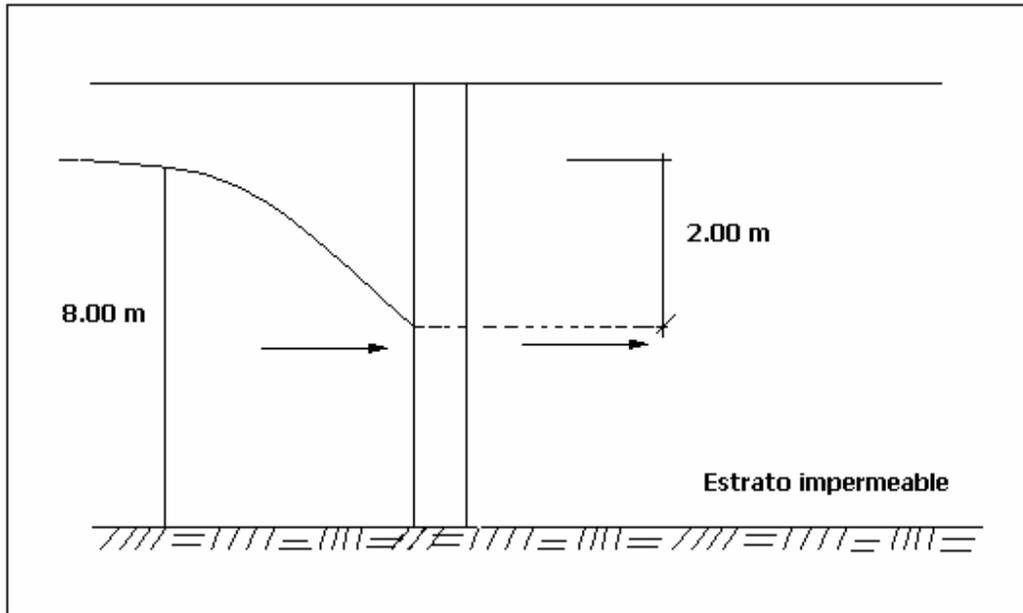


Figura 1.3 Galería con escurrimiento que compromete todo el espesor del acuífero y con alimentación por una cara

Ejemplo 2

Considerando el ejemplo anterior, determinar el caudal de captación de la galería tipo zanja cuando el abatimiento de agua en la galería es de 2m y el curso de agua responsable de la recarga del acuífero se encuentra en el momento más desfavorable a 25m de distancia.

La máxima capacidad de captación de la galería tipo zanja es:

$$\begin{aligned}
 Q &= L * (H^2 - H_d^2) * k_f / (2 * R) \\
 Q &= 100 \text{ m} * [(8.00 \text{ m})^2 - (6.00 \text{ m})^2] * 0.0005 \text{ m/s} / (2 * 25.00 \text{ m}) \\
 Q &= \mathbf{0.028 \text{ m}^3/\text{s} \text{ o } 28.0 \text{ l/s}}
 \end{aligned}$$

Ejemplo 3

Calcular la máxima capacidad de producción de agua de una galería de filtración de 100m de largo que compromete la parte superior de un acuífero con escurrimiento propio de 15m de profundidad y conductividad hidráulica (k_f) de 0.0005m/s. Se estima que la pendiente del acuífero es de 11.2% y la galería está compuesta por un dren de 200mm de diámetro ubicada 2m por debajo del nivel estático del acuífero (ver figura 1.4).

Considerando que el abatimiento de la napa de agua coincidirá con la ubicación del dren, se tiene que la ecuación para determinar el caudal unitario de captación es:

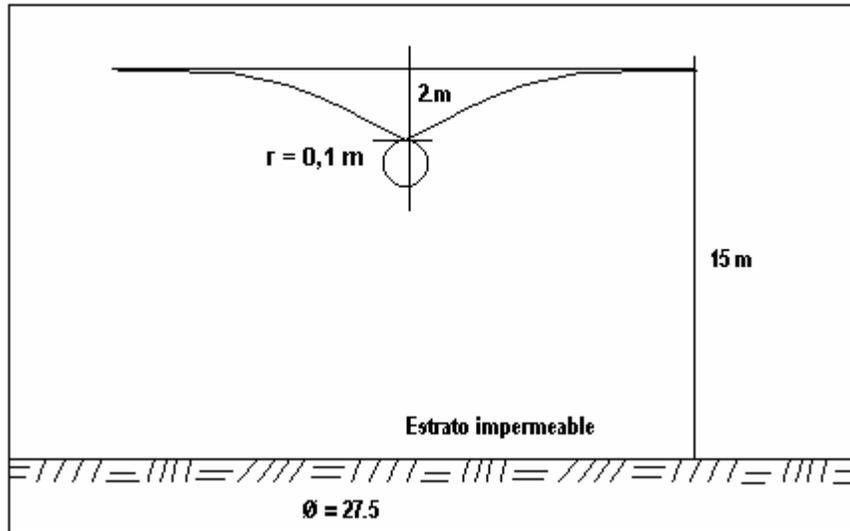


Figura 1.4 Galería que compromete la parte superior del acuífero (un dren).

$$q = \pi * k_f * s / [\text{Ln} (([q * s / (\pi * k_f)]^{0.5}) / (r * i))]$$

$$q = \pi * 0.0005 \text{ m/s} * 2.00 \text{ m} / [\text{Ln} (([q \text{ m}^3/\text{s} * \text{m} * 2.00 \text{ m} / (\pi * 0.0005 \text{ m/s})]^{0.5}) / (0.10 \text{ m} * 0.0112 \text{ m/m}))]$$

Resolviendo por aproximaciones sucesivas se tiene:

"q" Caudal unitario (m ³ /s-m)	
Supuesto	Calculado
0.000100	0.000908
0.000600	0.000721
0.000700	0.000708
0.000708	0.000708

Para los 100m de galería de filtración, el caudal por día sería de 0.0708m³ por segundo equivalente a 70.8l/s.

Para trabajar con números mayores, la conductividad hidráulica puede ser expresada en m/d el caudal unitario en m³/d-m. Los resultados son:

Conductividad hidráulica 0.0005 m/s = 43.2 m/d

“q” Caudal unitario (m ³ /d-m)	
Supuesto	Calculado
10.0	76.80
40.0	64.21
55.0	61.88
60.0	61.27
61.10	61.14
61.14	61.14

Para 100 m de galería se captaría 6,114m³ por día, equivalente a 70.8l/s.

El radio de influencia del pozo es:

$$R = [q * s / (\pi * k_f)]^{0.5} / i$$

$$R = [48.68\text{m}^3/\text{d-m} * 1.5\text{m} / (\pi * 43.2\text{m}/\text{d})]^{0.5} / 0.112 = 8.47\text{m}$$

Aplicando la ecuación de Hooghoudt para el caso anterior y para dos drenes paralelos de 50m de longitud y espaciados 10m, el caudal específico por área superficial y expresado como velocidad vertical es:

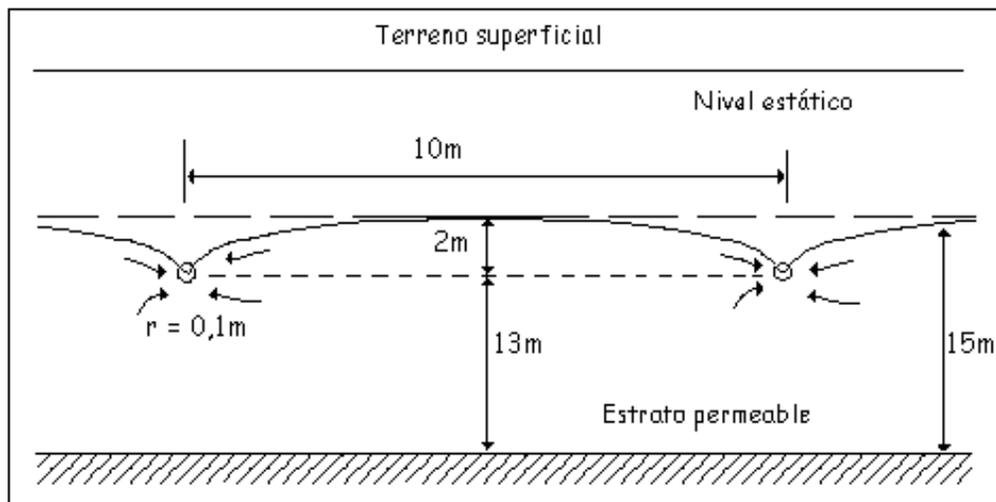


Figura 1.5 Galería que compromete la parte superior del acuífero (dos drenes).

$$q' = (8 * k_f * d * s + 4 * k_f * s^2) / D_d^2$$

Donde:

$$F_h = (D_d - H_d * \sqrt{2})^2 / (8 * H * D_d)$$

$$F_r = \text{Ln} [H_d / (\sqrt{2} * r)] / \pi$$

$$d = D_d / [8 * (F_h + F_r)]$$

La relación H_d/D_d es igual a $10/(15-2) = 0.769$, la cual es menor a 3.18. Por lo tanto, la profundidad (H_d) a ser empleada en el cálculo es:

$$\begin{aligned} D_d &= 10 / 3.18 = 3.144 \text{ m} \\ F_h &= (10\text{m} - 3.144\text{m} * \sqrt{2})^2 / (8 * (15-2.0)\text{m} * 10\text{m}) = 0.123 \\ F_r &= \text{Ln} [3.144\text{m} / (\sqrt{2} * 0.1\text{m})] / \pi = 0.987 \\ d &= 10\text{m} / [8 * (0.1220 + 0.9878)] = 1.130 \end{aligned}$$

Siendo la separación de los drenes 10 m, el caudal unitario es:

$$\begin{aligned} q' &= (8 * 0.0005\text{m/s} * 1.13 * 2.0\text{m} + 4 * 0.0005\text{m/s} * 2.0^2) / 10^2 \\ q' &= 0.0001701 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-s} \text{ ó } 0.1701 \text{ l/s-m}^2 \\ Q &= 0.1701 \text{ l/s-m}^2 * 50\text{m} * 10\text{m} \end{aligned}$$

$$Q = 85.1 \text{ l/s}$$

Discusión. Al igual que para el problema 1, la solución del problema mediante la primera ecuación demanda conocer la pendiente dinámica del acuífero. Más bien, mediante la aplicación e la ecuación de Hooghoudt la solución es más confiable.

Ejemplo 4

Considerando el ejemplo anterior, determinar el caudal de captación de la galería cuando el abatimiento de agua en la galería es de 2m y el curso de agua responsable de la recarga del acuífero se encuentra en el momento más crítico a una distancia de 20m.

$$\begin{aligned} q &= \pi * k_f * s / [\text{Ln} (D/r)] \\ q &= \pi * 0.0005\text{m/m} * 2.0\text{m} / [\text{Ln} (20\text{m} / 0.1\text{m})] = 0.5929 \text{ l/s-m} \end{aligned}$$

Para los 100m de galería, el caudal sería:

$$Q = 59.29 \text{ l/s}$$

Ejemplo 5

Calcular la máxima capacidad de producción de agua de una galería de filtración de 100m de largo ubicado en el fondo de lago correspondiente a un acuífero profundo de 25m con una conductividad hidráulica (k_f) de 0.0005m/s. La galería está compuesta por un dren de 200mm de diámetro ubicada 2 m por debajo del lecho del lago y con un tirante de agua es de 0.20m.

La capacidad teórica está dada por la ecuación:

$$\begin{aligned} q &= 2 * \pi * k_f * (z + a) / [\text{Ln} (2 * z / r)] \\ q &= 2 * \pi * 0.0005\text{m/m} * (2.0+0.2\text{m}) / [\text{Ln} (2 * 2.0\text{m} / 0.10\text{m})] \\ q &= 0.001874 \text{ m}^3/\text{s-m} \text{ ó } 1.874 \text{ l/s-m} \end{aligned}$$

Para los 100m de galería, el caudal sería:

$$Q = 187.4 \text{ l/s}$$

La ecuación práctica, considerando el régimen de sedimentación es:

$$\begin{aligned} q &= 2 * \pi * k_f * (z + a) / [4 * \text{Ln} (1.1 * z / r)] \\ q &= 2 * \pi * 0.0005 \text{ m/m} * (2.0 + 0.2 \text{ m}) / [4 * \text{Ln} (1.1 * 2.0 \text{ m} / 0.10 \text{ m})] \\ q &= 0.000559 \text{ m}^3/\text{s-m} \text{ ó } 0.559 \text{ l/s-m} \end{aligned}$$

Para los 100 m de galería, el caudal sería:

$$Q = 0.559 \text{ l/s-m} * 100 \text{ m} = 55.9 \text{ l/s}$$

Resolviendo mediante la ecuación de Moody-Ribbens para una porosidad del 30% con un tirante de agua de 0.20m y como no debe presentarse abatimiento en el nivel de las aguas; por lo tanto, se puede considerar que el tiempo de explotación es prácticamente nulo, por lo que se considera un tiempo $t =$ un segundo. La ecuación es:

$$q = 2 * k_f * p_d / \{A^{0.5} * \exp(-B) - 2/\pi * \ln[\exp(C) - \exp(-C)]\}$$

Donde:

$$\begin{aligned} A &= 4 * k_f * t / (\pi * H * S) \\ B &= r^2 * S / (4 * T * t) \\ C &= \pi * r / (2 * H) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A &= 4 * 0.0005 * 1 / (\pi * 25 * 0.3) &= 8.488 \text{ E-}05 \\ B &= 0.1^2 * 0.3 / (4 * 25 * 0.0005 * 1) &= 6.000 \text{ E-}02 \\ C &= \pi * 0.1 / (2 * 25) &= 6.283 \text{ E-}03 \end{aligned}$$

$$q = 2 * 0.0005 * (2.0 + 0.20) / \{8.488 \text{ E-}04^{0.5} * \exp(-6.000 \text{ E-}02) - 2/\pi * \ln[\exp(6.283 \text{ E-}03) - \exp(-6.283 \text{ E-}03)]\}$$

$$q = 0.000787 \text{ m}^3/\text{m-s} = 0.787 \text{ l/m-s}$$

Para los 100 m de galería, el caudal sería:

$$Q = 0.787 \text{ l/m-s} * 100 \text{ m} = 78.7 \text{ l/s}$$

Ejemplo 6

Considerando el ejemplo anterior, determinar el caudal de captación de la galería cuando el lecho impermeable se encuentra ubicado a 2.5m por debajo del dren.

La capacidad teórica está dada por la ecuación:

$$\begin{aligned}q &= 2 * \pi * k_f * (z + a) / \text{Ln} [2 * z * (z + b) / (r * b)] \\q &= 2 * \pi * 0.0005 * (2.0 + 0.2) / \text{Ln} [2 * 2.0 * (2.0 + 2.5) / (0.1 * (4.5 - 2.0))] \\q &= 0.001391 \text{ m}^3/\text{s-m} \text{ ó } 1.391 \text{ l/s-m}\end{aligned}$$

Para los 100 m de galería, el caudal sería:

$$Q = 1.391 \text{ l/m-s} * 100\text{m} = 139.1 \text{ l/s}$$

La ecuación práctica, considerando el régimen de sedimentación sería:

$$\begin{aligned}> q &= 2 * \pi * k_f * (z + a) / [4 * \text{Ln} (1.1 * z * (z + b) / (r + b))] \\q &= 2 * \pi * 0.0005 \text{ m/m} * (2.0 + 0.2\text{m}) / [4 * \text{Ln} (1.1 * 2.0\text{m} * (2.0 + 2.5) / (0.10 * (4.5 - 2.0\text{m})))] \\> q &= 0.000395 \text{ m}^3/\text{s-m} \text{ ó } 0.395 \text{ l/s-m}\end{aligned}$$

Para los 100 m de galería, el caudal sería:

$$Q = 0.395 \text{ l/m-s} * 100\text{m} = 39.5 \text{ l/s}$$

Discusión. Las ecuaciones de Dupuit aplicadas en el cálculo de las galerías que comprometen todo el espesor del acuífero requieren de la determinación del radio de influencia, el mismo que se obtiene a partir de pruebas de bombeo. Así mismo, por la base teórica de la ecuación, supone que el flujo simétrico hacia una zanja que corta el acuífero hasta el fondo del mismo; es decir, hasta llegar a la capa impermeable; y que las líneas de flujo son horizontales con equipotenciales verticales a la pendiente de la superficie. Esto indica que la galería tiene que ser del tipo zanja o en su defecto, el forro filtrante tiene que ser de mayores dimensiones para que simule a una zanja cubierta.

Las ecuaciones aplicadas en el cálculo de galerías que comprometen la parte superior del acuífero se aplican para drenes circulares, pero al igual que el caso anterior, es necesario determinar mediante pruebas de campo el radio de influencia. Mas bien, la ecuación de Hooghoudt pareciera ser más realista que la racional.

En el caso de la presencia de fuentes de recarga superficial en las proximidades de las galerías de filtración, la solución al problema es mas sencillo por que el radio de influencia está definido por la distancia entre la galería y el borde de la fuente de agua.

Las ecuaciones racionales para galerías en acuíferos con recarga superficial son reales bajo condiciones de aguas limpias y por ello es mas conveniente emplear las fórmulas empíricas; sin embargo, la aplicación de la ecuación de Moody-Ribbens es adecuada cuando la carga de agua sobre el dren es menor al 10% del espesor del acuífero.

Por ello, el proyectista de pequeñas obras de abastecimiento de agua tiene que diseñar una galería de filtración en base a su experiencia y, por lo general, sin un detallado estudio hidrogeológico, por lo que resulta práctico efectuar cálculos por medio de

diferentes métodos, variando los parámetros dentro de un rango razonable de magnitud. El procedimiento de emplear diferentes ecuaciones, permite al proyectista identificar los parámetros o factores de mayor influencia y por lo tanto, ayuda a definir las pruebas de campo a ser realizadas.

Así por ejemplo, si se considera el diseño de una galería de infiltración de 0.20m de diámetro, 50m de largo, situado a 2m por debajo del nivel estático de agua en un acuífero de 25m de profundidad cuyo coeficiente de permeabilidad de 0.0006m/s, los resultados que se obtienen según la aplicación de los diferentes modelos son:

a) Galerías que comprometen todo el espesor del acuífero

Galerías en acuífero con escurrimiento propio (Ecuación de DUPUIT):

Dos caras	51.6l/s
Una cara	25.8l/s

b) Galerías que comprometen la parte superior del acuífero

Galerías en acuífero con escurrimiento propio: Por no disponer de la pendiente dinámica del acuífero no se puede determinar el caudal de captación.

Aplicando la ecuación de Hooghoudt	51.0l/s
------------------------------------	---------

c) Galerías en acuíferos con recarga superficial

Galerías en acuífero de gran espesor:

Modelo racional	85.0l/s
Ecuación empírica	30.5l/s
Ecuación de Moody-Ribbens	42.9l/s

Galerías en acuífero de poco espesor: No aplicable por ser ecuaciones para acuíferos de poco espesor.

Del análisis de los resultados se puede notar que la *ecuación de DUPUIT* para una galería abastecida por dos lados, la de Hooghoudt y de Moody-Ribbens, desde el punto de vista práctico dan resultados muy parecidos.

ANEXO III
Determinación de la Conductividad Hidráulica

Determinación de la Conductividad Hidráulica

Ejemplo 1

Pozo que compromete todo el espesor del acuífero libre y dos pozos piezométricos de observación.

Determinar la conductividad hidráulica en base a los resultados de las pruebas de bombeo realizadas en un pozo de tres metros de profundidad y 50mm de diámetro durante 30 horas, cuyos datos se muestran en el cuadro 1.1. La distancia del pozo de bombeo al primer pozo piezométrico es de 0.5m y de éste último al segundo pozo piezométrico es de 1.00m. En la figura 1.1 se muestra la distribución de las obras para la realización de la prueba de bombeo. El nivel de agua antes del inicio del proceso de bombeo fue de 161cm por encima de la capa impermeable y el caudal de bombeo durante las 30 horas fue constante y con un valor de 100ml/s.

Cuadro 1.1 Niveles de agua en los pozos piezométricos.

Tiempo (h)	Nivel de agua (cm)		Tiempo (h)	Nivel de agua (cm)	
	Pozo1	Pozo 2		Pozo 1	Pozo 2
0.1	161.0	161.0	7.7	113.0	150.7
0.3	148.9	160.3	10.3	109.8	149.7
0.5	143.2	159.6	12.8	107.4	148.3
0.7	139.5	158.9	14.3	106.2	147.6
0.9	136.7	158.2	14.9	105.7	147.5
1.0	135.6	157.8	18.9	103.1	146.3
1.2	134.0	157.5	19.2	102.9	146.4
1.9	128.5	157.1	22.2	101.3	144.5
3.5	121.7	154.8	22.7	101.1	145.0
5.0	117.8	153.0	28.6	98.5	144.5
6.7	114.6	151.5	30.0	98.0	144.0

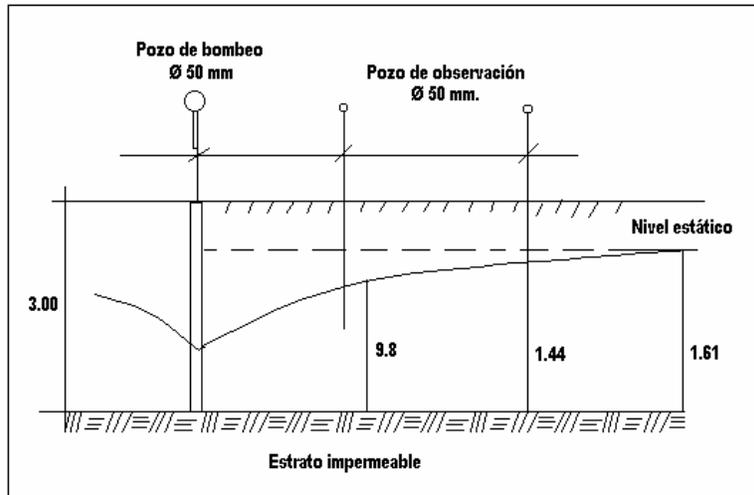


Figura 1.1 Distribución del pozo de bombeo y de los pozos de observación.

Datos:

Distancia del pozo de bombeo al pozo de observación 1 (r):	=	50cm
Distancia del pozo de bombeo al pozo de observación 2 (R):	=	150cm
Columna de agua sobre el pozo de observación r después de 30 horas (Ha):	=	98cm
Columna de agua sobre el pozo de observación R después de 30 horas (Hb):	=	144cm
Caudal de bombeo (Q):	=	100ml/s

El coeficiente de permeabilidad o la conductividad hidráulica se determina mediante la fórmula:

$$k_f = Q * \ln (R / r) / [\pi * (H_a^2 - H_b^2)]$$

$$k_f = 100 \text{ ml/s} * \ln (150 / 50) / [\pi * (144 \text{ cm})^2 - (98 \text{ cm})^2]$$

$$k_f = 3.14 \text{ E-03 cm/s} \quad \text{ó} \quad 2.71 \text{ m/d}$$

Ejemplo 2

Pozo en acuífero libre con pozo piezométrico de observación y recarga superficial.

Luego de 36 horas de bombeo, se ha determinado que la columna de agua en el pozo de observación, distante 2.5m. del pozo de bombeo, es de 90cm. por debajo del nivel estático de la napa de agua. El pozo de bombeo está ubicado perpendicularmente a la fuente de recarga a 5m y hace un ángulo con el pozo de observación de 30 grados. El caudal de extracción ha sido de 500ml/seg. y el espesor medio del acuífero es de 3.5m. En la figura 1.2 se muestra la distribución de las obras para la realización de la prueba de bombeo.

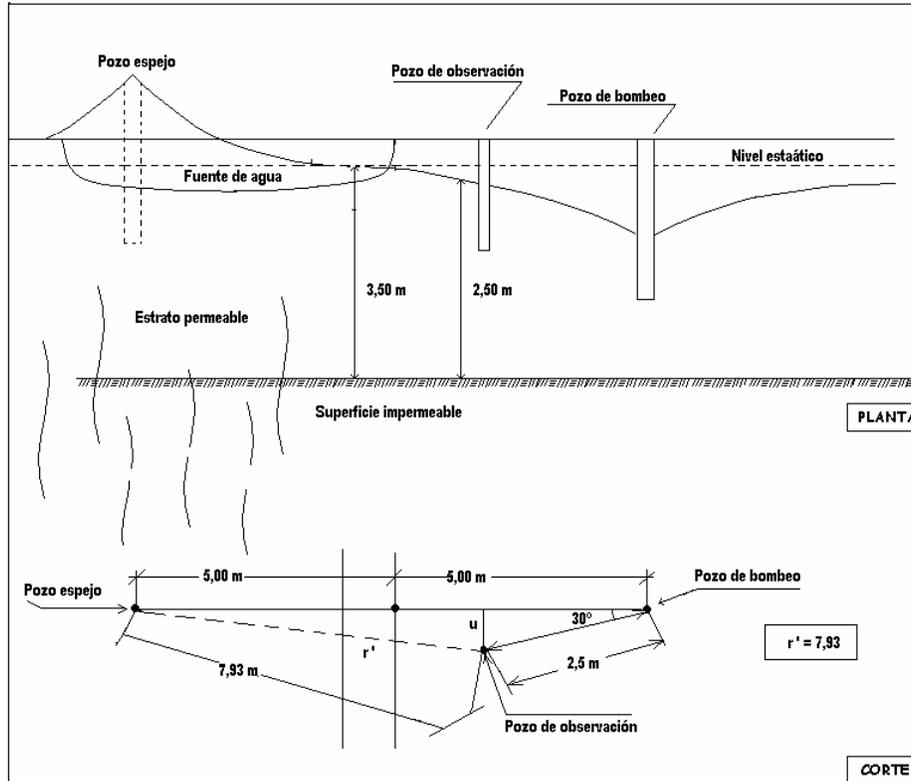


Figura 1.2 Distribución del pozo de bombeo y del pozo de observación.

Datos

- Distancia del pozo de bombeo al pozo de observación (r) = 250cm
- Distancia perpendicular del pozo de bombeo a la fuente de recarga = 500cm
- Angulo entre el pozo de bombeo y observación con respecto a la fuente = 30°
- Columna de agua en el pozo de observación $-r-$ después de 36 horas (H_a): = 260cm
- Espesor del acuífero (H): = 350cm
- Caudal de bombeo (Q): = 500ml/s

El coeficiente de permeabilidad o la conductividad hidráulica se determina mediante la fórmula

Distancia del pozo de observación al pozo espejo:

$$r^2 = [(2 \cdot 500)^2 + (250)^2 - (2 \cdot 2 \cdot 500 \cdot 250 \cdot \cos 30)]^{0.5}$$

$$r^2 = 793 \text{ cm}$$

$$k_f = \frac{Q \cdot \ln(r^2 / r)}{[2 \cdot \pi \cdot H \cdot (H - H_a)]}$$

$$k_f = \frac{500 \text{ ml/s} \cdot \ln(793 / 250)}{[2 \cdot \pi \cdot 350 \cdot (350 - 260\text{cm})]}$$

$$k_f = 2.92 \text{ E-03 cm/s } \text{ ó } 2.52 \text{ m/d}$$

Ejemplo 3

Pozo con columna positiva de carga de agua

Determinar la conductividad hidráulica en un pozo de 3m de profundidad y 50mm de diámetro ubicado en un acuífero no confinado y que ha sido llenado con agua 0.55m por encima del nivel estático y el descenso de 2cm se ha producido en 6 segundos (ver figura 1.3).

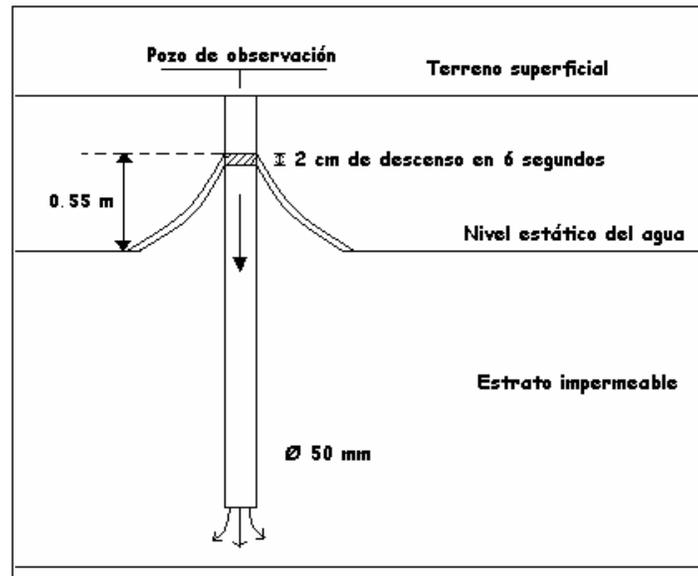


Figura 1.3 Conductividad hidráulica con pozo con recuperación descendente del nivel estático del agua.

Datos

Diámetro del pozo:	=	5cm
Sobre carga por columna de agua	=	55cm
Descenso de la columna de agua	=	2cm
Tiempo	=	6seg

El coeficiente de permeabilidad o la conductividad hidráulica se determina mediante la ecuación racional:

$$k_f = r * \text{Ln} [(h_o + r/2) / (h_1 + r/2)] / (2 * \Delta t)$$

$$k_f = 5/2 * \text{Ln} [(55 + 5/4) / (55-2 + 5/4)] / (2 * 6)$$

$$k_f = 7.54 \text{ E } -0.3 \text{ cm/s } \text{ ó } 6.51 \text{ m/d}$$

Aplicando la segunda ecuación recomendada el resultado obtenido es muy similar, por lo que cualquiera de ellas puede ser aplicado:

$$k_f = r * \Delta h / (2 * h * \Delta t)$$

$$k_f = 5 / 2 * 2 / (2 * 55 * 6)$$

$$k_f = 7.58 \text{ E } -0.3 \text{ cm/s } \text{ ó } 6.55 \text{ m/d}$$

Ejemplo 4

Pozo piezométrico con recuperación de la columna de agua

Determinar la conductividad hidráulica en un pozo piezométrico 50mm de diámetro que se extiende 3m por debajo del nivel freático de agua. La longitud de la cavidad situado en la parte final del tubo piezométrico es de 7.5cm y que ha sido rellenado con grava por tratarse de un suelo no consolidado. El nivel de agua a partir del fondo del pozo de observación al inicio de la prueba de recuperación es de 1.44m y después de 16 segundo el nuevo nivel de la columna de agua es de 1.61m. (ver figura 1.4).

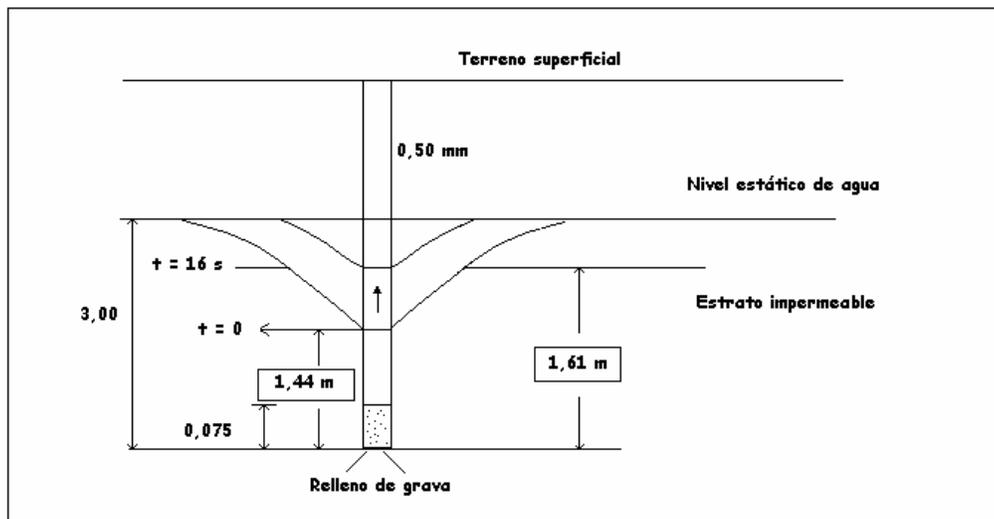


Figura 1.4 Conductividad hidráulica en pozo piezométrico con recuperación ascendente del nivel estático del agua.

Datos

Diámetro del pozo:	=	5cm
Columna de agua al inicio de la prueba (h_1)	=	161cm
Columna de agua al final de la prueba (h_2)	=	144cm
Tiempo de recuperación de la columna de agua	=	16seg
Longitud de la cavidad	=	7.5cm

El coeficiente de permeabilidad o la conductividad hidráulica se determina mediante la ecuación:

$$k_f = \pi * r^2 * \ln(h_1 / h_2) / [A * (t_2 - t_1)]$$

$$A = \pi * (2 * \sqrt{2} * r + h / \sqrt{2} - 1)$$

$$A = \pi * (2 * \sqrt{2} * 2.5 + 7.5 / \sqrt{2} - 1) = 35.7*$$

$$k_f = \pi * 2.5^2 * \ln(164 / 144) / [35.7 * 16]$$

$$k_f = 3.83 E -0.3 \text{ cm/s} \text{ o } 3.31 \text{ m/d}$$

* Según la figura 1 del Anexo IV, el valor de “A” es igual a 36.5, con lo que el valor de la conductividad hidráulica “kf” es igual 3.75×10^{-3} cm/s ó 3.24m/d y que desde el punto de vista práctico es muy poca la diferencia entre ellos.

Ejemplo 5

Galería filtrante

Determinar la conductividad hidráulica en una galería piloto ubicado en un acuífero libre con escurrimiento propio cuyas características se indican en la figura 1.5. El nivel de la napa de agua antes del inicio del proceso de extracción de agua es de 161cm por encima de la capa impermeable. El agua fue extraída mediante una bomba por espacio de 30 horas. Se definió que la altura de mínima aceptable de carga de agua sobre el dren era de 98cm el mismo que se logró a los 13 minutos de iniciado el bombeo. A continuación el bombeo se efectuó a caudal variable de modo de mantener la carga de 98cm sobre el dren. Los resultados de la prueba de bombeo determinados en el pozo de observación ubicado a 1.22m de la galería filtrante de 15.20m de longitud se presentan en el cuadro 1.2.

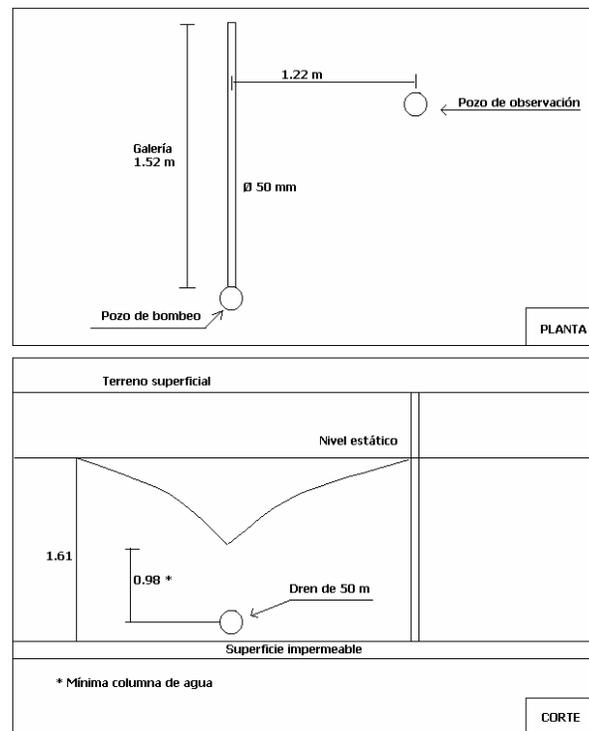


Figura 1.5 Conductividad hidráulica mediante galería de filtración piloto.

Cuadro 1.2 Nivel de agua en el pozo de observación.

Tiempo (h)	Caudal (m/s)	Nivel de agua (cm)	Tiempo (h)	Caudal (m/s)	Nivel de agua (cm)
0.1	12.10	161.0	7.7	2.90	150.7
0.3	9.00	160.3	10.3	2.60	149.7
0.5	7.80	159.6	12.8	2.40	148.3
0.7	7.00	158.9	14.3	2.35	147.6
0.9	6.30	158.2	14.9	2.30	147.5
1.0	6.00	157.8	18.9	2.12	146.3
1.2	5.30	157.5	19.2	2.07	146.4
1.9	4.50	157.1	22.2	1.95	144.5
3.5	3.70	154.8	22.7	1.95	145.0
5.0	3.40	153.0	28.6	1.83	144.5
6.7	3.10	151.5	30.0	1.80	144.0

En la figura 1.6 se presentan los datos procesados bajo la forma de caudal de extracción de agua versus tiempo; y columna de agua versus tiempo. En los cuadros 1.3 y 1.4 se exponen la relación entre caudal de extracción versus inversa de tiempo y columna de agua versus inversa de tiempo. La figura 1.7 (caudal de extracción versus inversa de tiempo) permite determinar el caudal máximo extraíble para las condiciones previstas, es decir para una columna de agua sobre el dren de 98cm y la figura 1.8 (columna de agua versus inversa de tiempo) ayuda a determinar la mínima columna de agua en el pozo de observación para las condiciones previstas.

De esta manera, se obtienen los datos siguientes

Longitud de dren (L):	=	1520cm
Distancia a pozo de observación (X):	=	122cm
Columna de agua sobre dren (h_d):	=	98cm
Caudal máximo extraíble (Q):	=	1.40ml/s (figura 1.7)
Columna de agua mínima (h_a):	=	140cm (figura 1.8)

El coeficiente de permeabilidad o la conductividad hidráulica se determina mediante la fórmula

$$k_f = 2 * Q * X / [L * (h_a^2 - h_d^2)]$$

$$k_f = 2 * 1.4 \text{ cm}^3/\text{s} * 122 \text{ cm} / [1520 \text{ cm} * \{ (140 \text{ cm})^2 - (98 \text{ cm})^2 \}]$$

$$k_f = 2.23 \text{ E-05 cm/s } \text{ ó } 2.23 \text{ E-07 m/s } \text{ ó } 0.019 \text{ m/d}$$

CAUDAL vs TIEMPO y CAUDAL vs COLUMNA DE AGUA

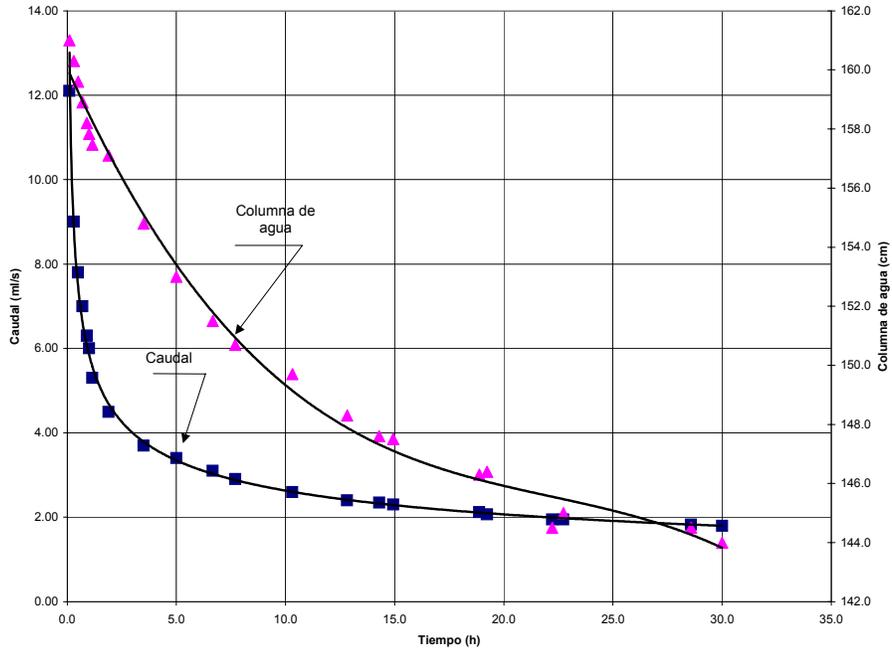


Figura 1. 6 Caudal de extracción de agua versus tiempo; y columna de agua versus tiempo.

Cuadro 1.3 Caudal de extracción versus inversa de tiempo.

Caudal	Tiempo (h)	1/tiempo	Caudal	Tiempo (h)	1/tiempo
12.10	0.1	10.000	2.90	7.7	0.130
9.00	0.3	3.333	2.60	10.3	0.097
7.80	0.5	2.000	2.40	12.8	0.078
7.00	0.7	1.429	2.35	14.3	0.070
6.30	0.9	1.111	2.30	14.9	0.067
6.00	1.0	1.000	2.12	18.9	0.053
5.30	1.2	0.870	2.07	19.2	0.052
4.50	1.9	0.526	1.95	22.2	0.045
3.70	3.5	0.286	1.95	22.7	0.044
3.40	5.0	0.200	1.83	28.6	0.035
3.10	6.7	0.150	1.80	30.0	0.033

Cuadro 1.4 Columna de agua versus inversa de tiempo.

Tiempo (h)	Nivel (m)	1/tiempo	Tiempo (h)	Nivel (m)	1/tiempo
0.1	161.0	10.000	7.7	150.7	0.130
0.3	160.3	3.333	10.3	149.7	0.097
0.5	159.6	2.000	12.8	148.3	0.078
0.7	158.9	1.429	14.3	147.6	0.070
0.9	158.2	1.111	14.9	147.5	0.067
1.0	157.8	1.000	18.9	146.3	0.053
1.2	157.5	0.870	19.2	146.4	0.052
1.9	157.1	0.526	22.2	144.5	0.045
3.5	154.8	0.286	22.7	145.0	0.044
5.0	153.0	0.200	28.6	144.5	0.035
6.7	151.5	0.150	30.0	144.0	0.033

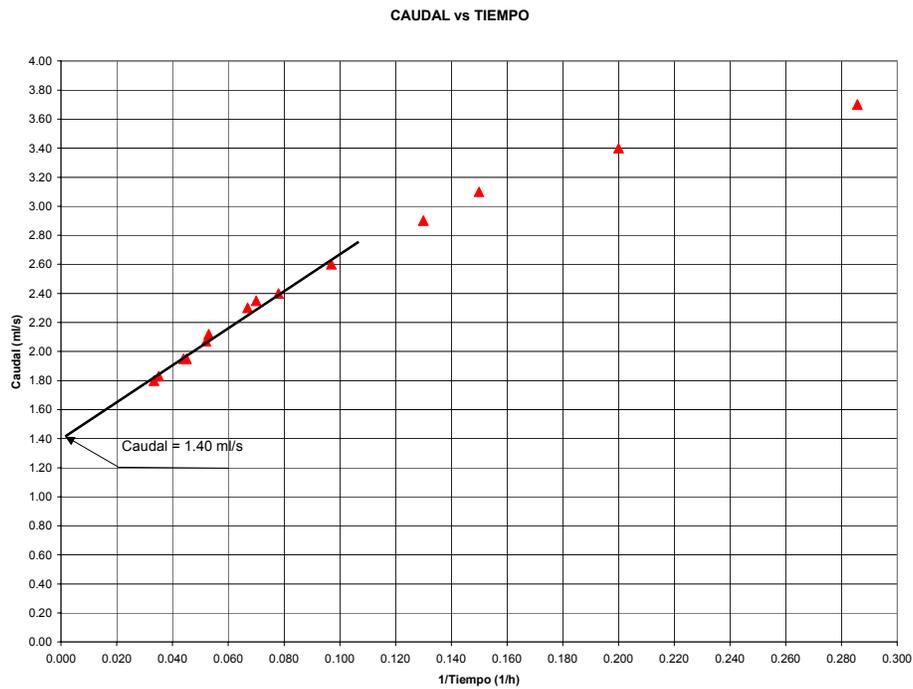


Figura 1.7 Caudal de extracción versus inversa de tiempo.

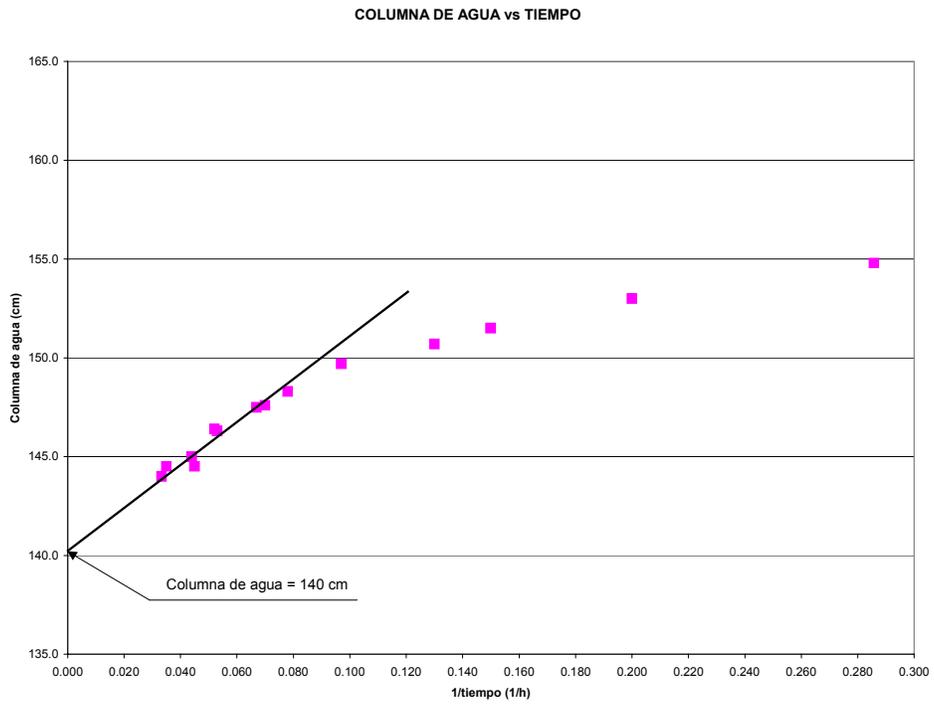


Figura 1.8 Columna de agua versus inversa de tiempo.

ANEXO IV

Ábaco para determinar el factor geométrico “A”

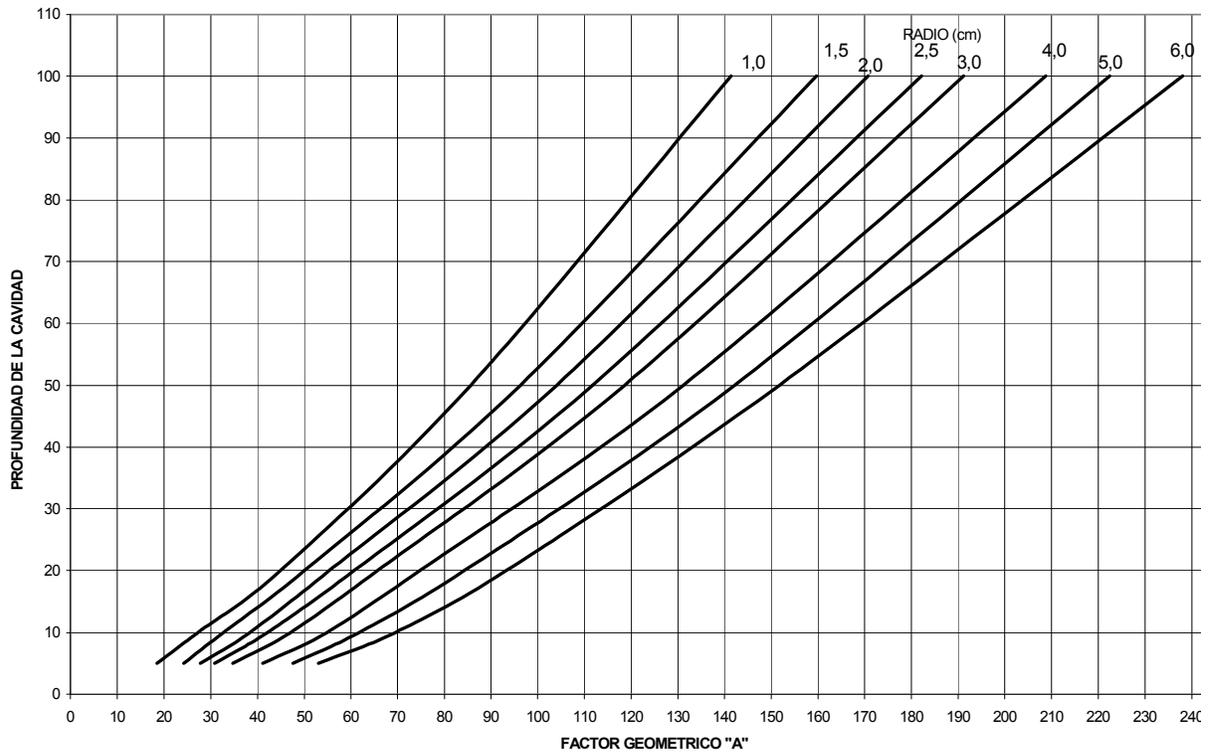


Figura 1. Ábaco para determinar el factor geométrico “A”