

MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: TRATAMIENTOS NO CONVENCIONALES

36



MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: TRATAMIENTOS NO CONVENCIONALES

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento

Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Tratamientos no Convencionales

ISBN: 978-607-626-031-9

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

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

Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

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

CONTENIDO

Presentación	V
Objetivo general	VII
Introducción a los tratamientos no convencionales de aguas residuales municipales	IX
1. Filtración intermitente con arena	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Descripción	2
1.4 Componentes	4
1.4.1 Medio filtrante	4
1.4.2 Sistema de distribución	5
1.4.3 Sistema de drenaje	5
1.4.4 Dispositivos de regulación	5
1.5 Funcionamiento	6
1.6 Ventajas y desventajas	6
1.7 Diseño	7
1.7.1 Criterios de diseño	7
1.7.2 Ejemplo de diseño para el sistema de filtración intermitente de arena	9
1.8 Construcción y especificaciones generales	14
1.9 Operación y mantenimiento	16
2. Sistemas de aplicación superficial al suelo	17
2.1 Filtro verde	18
2.1.1 Ventajas	18
2.1.2 Desventajas	19
2.1.3 Criterios de diseño	19
2.1.4 Diseño del filtro verde	20
2.1.5 Ejemplo de diseño	24
2.1.6 Operación y mantenimiento	27
2.2 Infiltración rápida	28
2.2.1 Introducción	28
2.2.2 Objetivos	29
2.2.3 Descripción	29
2.2.4 Pretratamiento del agua residual	32
2.2.5 Cuencas de infiltración	34
2.2.6 Remoción de contaminantes	35
2.2.7 Distancia entre el punto de infiltración y recuperación del agua tratada	36
2.2.8 Ventajas y desventajas	36
2.2.9 Diseño	37

2.2.10 Ejemplo de diseño	39
2.2.11 Operación y mantenimiento	40
3. Sistemas de aplicación subsuperficial al terreno	43
3.1 Zanjas filtrantes	43
3.1.1 Diseño hidráulico	44
3.2 Lechos filtrantes	48
3.2.1 Diseño hidráulico	48
3.3 Pozos filtrantes	52
3.3.1 Diseño hidráulico	52
4. Disposición de agua tratada	55
4.1 Riego superficial	55
4.1.1 Introducción	55
4.1.2 Criterios de calidad para el agua de riego	55
4.1.3 Características biológicas	65
4.1.4 Sistemas de riego	66
Conclusiones del libro	71
Bibliografía	73
Tabla de conversiones de unidades de medida	75
Ilustraciones	85
Tablas	87

PRESENTACIÓN

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

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

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

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

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

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

Director General de la Comisión Nacional del Agua



OBJETIVO GENERAL

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

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



INTRODUCCIÓN A LOS TRATAMIENTOS NO CONVENCIONALES DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES

Como respuesta al problema de contaminación y carencias de servicios de alcantarillado, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) analiza diferentes opciones tecnológicas de disposición de excretas y tratamiento de aguas residuales aplicables a las condiciones del medio rural. Los municipios se ven limitados al proporcionar servicios de saneamiento en el medio rural y zonas marginadas debido a la falta de tecnología de bajo costo, por lo que los habitantes de estas comunidades tienen que solucionar el problema del tratamiento de las aguas residuales. Considerando esta situación, se deben proponer y desarrollar tecnologías que puedan adaptarse a las necesidades de dichas comunidades.

El objetivo principal de este libro es presentar alternativas de tratamiento de aguas residuales que permitan combatir y prevenir la contaminación de las fuentes de agua disponibles en pequeñas comunidades de la forma más económica posible.

Las tecnologías presentadas son las siguientes: filtración intermitente de arena, sistemas de aplicación superficial al suelo y sistemas de aplicación subsuperficial al suelo.

Para el caso de México los sistemas de aplicación de agua residual al suelo son una alternativa atractiva debido a la unión de dos factores: Las regiones áridas donde la producción agrícola depende del riego y el bajo costo asociado al tratamiento.



1

FILTRACIÓN INTERMITENTE CON ARENA

1.1 GENERALIDADES

Las comunidades rurales se enfrentan a una variedad de condiciones socioeconómicas y territoriales que causan que la construcción y operación de instalaciones sofisticadas para el tratamiento de aguas residuales sean difíciles de llevar a cabo. Estos problemas se relacionan con las restricciones de descarga, altos costos per cápita, financiamientos, así como presupuestos de operación y mantenimiento limitado.

La cobertura de alcantarillado en zonas rurales es limitada, debido principalmente a los costos de construcción y de mantenimiento, sin embargo es de vital importancia para la salud y el bienestar de la sociedad en su conjunto, contar con una red de alcantarillado o un sistema alternativo de saneamiento para el tratamiento y disposición adecuada de los residuos.

Por lo anterior, el agua residual proveniente de viviendas individuales y comunidades pequeñas en localidades sin alcantarillado puede ser tratada por sistemas de tratamiento en el sitio. Aunque existe una diversidad de estas tecnologías, sólo unas pocas de ellas pueden, en principio, satisfacer plenamente las necesidades específicas de las comunidades rurales.

Dentro de estas tecnologías, el proceso de filtración intermitente con arena es una alternativa de tratamiento del agua residual sencillo, eficiente y confiable. Sus costos, por lo general, son accesibles para las comunidades y los recursos para el diseño de construcción, operación y mantenimiento, se encuentran usualmente disponibles a nivel local o pueden adquirirse en forma relativamente fácil.

La filtración intermitente con arena es un proceso para el tratamiento de pequeños caudales de agua residual que pueden aplicarse en comunidades rurales con un rango de población de uno a cien habitantes.

La instalación de estos sistemas no se ve afectada por el clima, ya que se pueden construir en clima seco, templado o caluroso e incluso durante la temporada de invierno. En este último caso, en las zonas nevadas se debe remover la superficie del lecho para formar surcos y lomos, de tal modo que las aguas residuales heladas formen una cubierta de hielo apoyada en los lomos y las subsecuentes aplicaciones encuentren paso hacia el filtro por los surcos bajo el hielo.

Una característica peculiar de los filtros intermitentes de arena es la calidad del líquido que se obtiene de ellos y que no requiere de un tra-

tamiento posterior. En una instalación bien planeada y operada, el líquido resultante es claro, incoloro y brillante, está completamente vitrificado, es estable y no contiene sólidos sedimentables, aunque a veces, en periodos muy distanciados, puede aparecer una pequeña cantidad de sólidos. La eficiencia en la eliminación de bacterias se encuentra entre el 98 y 99 por ciento, la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno es del 90 por ciento y la de los sólidos en suspensión es del 75 por ciento. Incluso un filtro intermitente de arena puede usarse en sistemas de recirculación de albercas igual que en sistemas de tratamiento de agua residual municipal. Otra ventaja del proceso, es que puede usarse como una unidad de pulimento en sistemas lagunares.

1.2 OBJETIVO

El principal objetivo al aplicar un proceso de filtración intermitente de arena es contar con un método sencillo y confiable de tratamiento de aguas residuales domésticas, por medio de la remoción de microorganismos y materia en suspensión contenida en el agua. Además, este proceso se presenta como una alternativa que se puede combinar con otros sistemas de tratamiento para elevar la calidad del efluente.

1.3 DESCRIPCIÓN

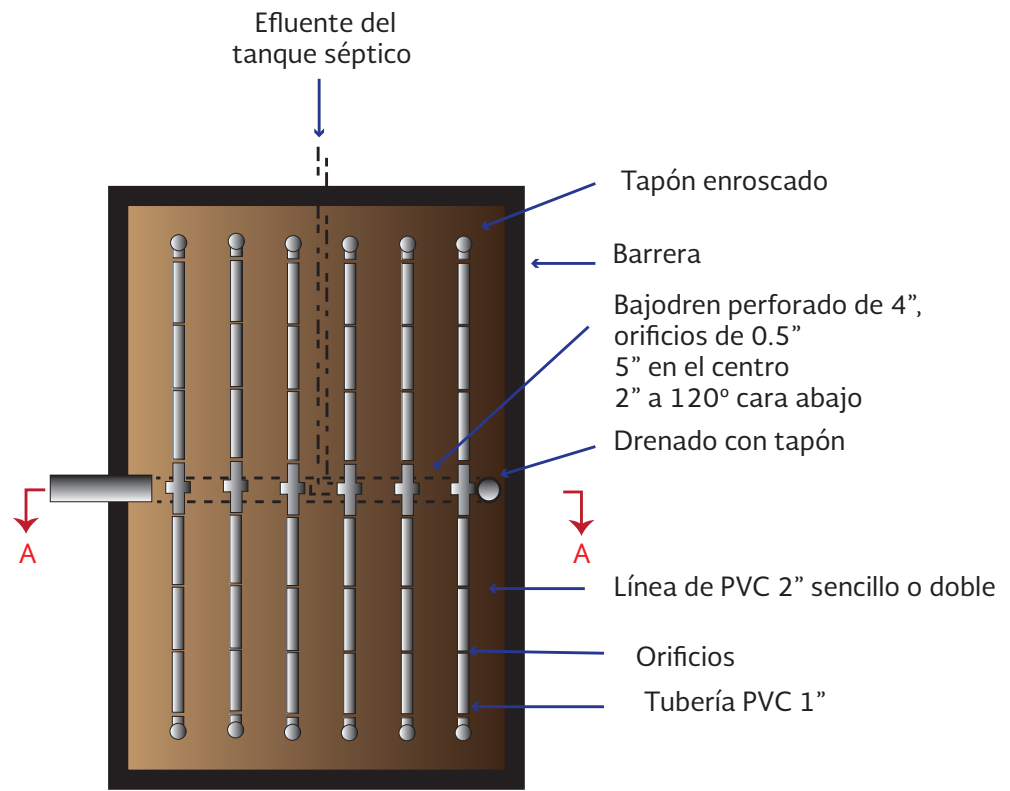
La filtración intermitente de arena es un proceso de purificación del agua que consiste en hacer pasar el agua residual a través del lecho filtrante de arena u otro material finamente granulado, lo que retiene la materia orgánica y los sólidos suspendidos presentes en el agua.

La aplicación del líquido sobre la superficie de arena se lleva a cabo a través de un sistema de distribución superficial y opera aplicando el efluente del tanque séptico o laguna facultativa en forma periódica o intermitente, hasta alcanzar una diferencia de presión predeterminada, y limitada por la zona muerta disponible. En este punto el lecho es drenado y limpiado y el líquido tratado se colecta en el sistema de drenaje localizado en el fondo del filtro. Comúnmente el efluente es descargado desde el filtro hasta un campo agrícola o dispuesto en algún cuerpo de agua superficial (Metcalf & Eddy, 1991; Middlebrooks, 1995).

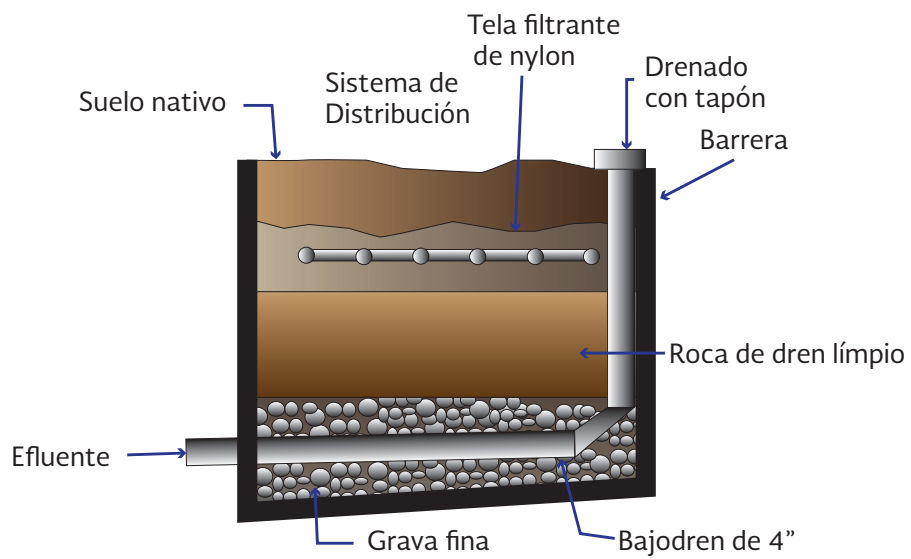
Las partículas de sólidos suspendidos de 5 a 8 mm se acumulan en la cima del filtro y obstruyen la superficie, evitando una efectiva infiltración del agua. Cuando esto sucede, el filtro es puesto fuera de servicio para remover la capa de arena obstruida. La arena removida puede ser lavada y reusada. Con un diseño apropiado de los filtros, es posible proporcionar de cuatro a seis meses de operación libre de mantenimiento (Living & Wahlberg, 1990; Middlebrooks, 1995). En la Ilustración 1.1 se presenta el esquema de un filtro intermitente de arena. En la Ilustración 1.2 se muestra el filtro antes de ser empacado.

La mayoría de estos filtros se construyen por debajo del nivel del suelo, aunque también se pueden usar filtros abiertos; estos últimos se distinguen por su superficie superior abierta a la atmósfera. En climas fríos, generalmente los filtros abiertos están provistos de una cubierta para minimizar el mantenimiento e incrementar la temperatura con calor solar (Metcalf & Eddy, 1991).

Ilustración 1.1 Esquema de un filtro intermitente de arena, a) vista del plano, b) sección transversal del filtro



a) Vista en planta



b) Corte A - A

Ilustración 1.2 Instalación de filtro intermitente de arena



1.4 COMPONENTES

Básicamente, los filtros intermitentes de arena constan de un medio filtrante, un sistema de distribución superficial, un sistema de drenaje y dispositivos de regulación del filtro.

1.4.1 MEDIO FILTRANTE

El medio filtrante generalmente consiste en una capa de arena limpia seleccionada por su tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad. Normalmente se elige un tamaño efectivo que oscila entre 0.20 a 0.30 mm y un coeficiente de uniformidad menor de 3.5 (Middlebrooks, 1995).

Para asegurar un funcionamiento adecuado del proceso de filtración, el espesor del estrato de arena debe ser de 90 cm y, como mínimo, de 60 centímetros. La capa de arena se sostiene sobre tres capas de grava de diferentes tamaños que cubren el sistema de drenaje hasta una altura de por lo menos 15 cm por encima de los mismos (Hilleboe, 1995).

En general, la eficiencia y el grado de remoción de sólidos mediante la filtración depende de las características y propiedades del medio filtrante, esto es, permeabilidad, porosidad y tamaño del poro. La efectividad del tratamiento y el proceso de ventilación dependen de que la arena y grava sean óptimamente seleccionadas.

El desplazamiento del aire requiere que el medio sea totalmente permeable, por lo que hay que tener presente que la permeabilidad del aire o del agua puede ser reducida con una saturación parcial de la humedad. La permeabilidad del aire es mayor a bajos niveles de saturación y la del agua es mayor sólo si está cerca de la saturación completa. Por lo tanto, es recomendable seleccionar un medio que drene completamente el agua residual (Hills & Krone, 1971).

1.4.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

El objetivo del sistema de distribución es aplicar el agua residual sobre el lecho de arena y consiste en tubería perforada o de juntas abiertas, instaladas sobre la superficie de arena a junta perdida con abertura de 3 a 6 milímetros. El sistema de distribución está conformado al inicio por la línea de suministro que, generalmente, es tubería PVC de 2 a 6 pulgadas. Esta línea a su vez conecta el tanque de bombeo al múltiple que se localiza exactamente a la entrada del filtro para distribuirse, por último, con los laterales que descargan el líquido a través de los orificios con los que cuenta esta tubería. La tubería de los laterales puede ser PVC de 2 pulgadas. En la Ilustración 1.3 se presenta un esquema del sistema de distribución.

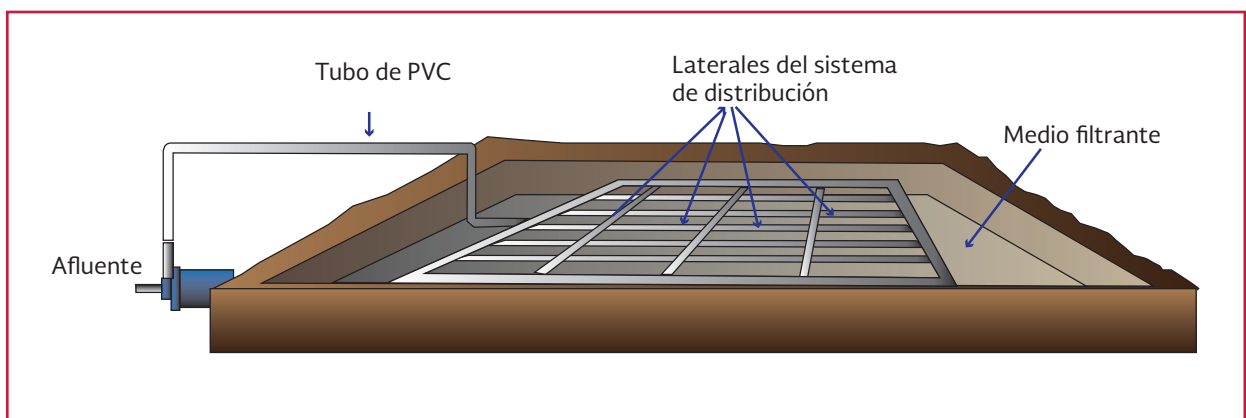
1.4.3 SISTEMA DE DRENAJE

El sistema de drenaje es la tubería localizada en el fondo del filtro, colocada en una zanja, cubierta y rodeada de grava limpia con un tamaño de 2 a 4 centímetros. La tubería puede ser de barro o tubería PVC perforada de 3 a 4 pulgadas. En caso de usar este último tipo, la tubería deberá colocarse con una pendiente no menor de 0.55 cm para lograr un escurrimiento eficiente dirigido hacia un colector, conectado en forma perpendicular a la dirección de las zanjas.

1.4.4 DISPOSITIVOS DE REGULACIÓN

El tanque regulador es un dispositivo para la aplicación intermitente del efluente en los filtros y su capacidad varía dependiendo del caudal a tratar de agua residual. La dosis puede administrarse también mediante sifones automáticos, por bombeo, o haciendo funcionar a mano válvulas convenientemente dispuestas. El múltiple, que es el dispositivo de entrada sobre la superficie del filtro adaptado para distribuir el líquido entrante, se conecta en una configuración “H” con los laterales en el sistema de distribución y puede ser tubería PVC de 2 a 6 pulgadas (Perkins, 1990).

Ilustración 1.3 Esquema del sistema de distribución de un filtro intermitente de arena



1.5 FUNCIONAMIENTO

Los mecanismos de tratamiento en los filtros intermitentes de arena es en parte mecánica y en parte biológica. El funcionamiento mecánico ocurre en el lecho de arena, en el que gracias al tamaño y graduación definidos se realiza una filtración que retiene las partículas de los sólidos suspendidos, así como la materia orgánica presente en el agua residual. La parte biológica esta influenciada por la granulometría de la arena, ya que debido a los poros pequeños y a los lodos acumulados se forman conglomerados de microorganismos en la superficie y debajo de ella. Así se lleva a cabo la filtración asociada a un proceso de degradación biológica de la materia orgánica.

La operación intermitente del filtro consiste en llenar la zanja con el agua, por medio de las líneas de distribución al nivel de éstas o por encima, de manera que cuando la zanja se drene completamente podrá ser admitida la siguiente dosis. Esta forma de dosificación facilita la ventilación al dejar que se vacíe en intervalos el filtro y se obtenga un suministro de aire fresco. Este proceso aerobio es fundamental para la oxidación de la materia orgánica. Considerando que la oxidación se lleva a cabo por medio de microorganismos predominantemente aerobios, en el lecho de arena se ofrecen las condiciones óptimas para la remoción de DBO y la conversión de nitrato de amonio (nitrificación). Por la acción bacteriológica, la conversión de nitrato a gas nitrógeno (denitrificación), ocurre con una significativa pérdida de nitrógeno (arriba del 45 por ciento). La denitrificación es conducida por bacterias anaerobias que coexisten en microambientes anaerobios entre el lecho filtrante. Otros constituyentes específicos son removidos por adsorción química y

física (Hilleboe, 1995). En el funcionamiento de un filtro intermitente de arena, la tasa de filtración es crítica poder operar adecuadamente. Por tanto, cuando ocurre un taponamiento frecuente del filtro, se debe atender para evitar que su funcionamiento se vea afectado. Como los filtros superficiales no son accesibles para su mantenimiento y reparación, la carga hidráulica aplicada de área de filtración debe moderarse.

1.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Las principales ventajas de un sistema de filtración intermitente de arena son las siguientes:

- Puede utilizarse para pulir efluentes de sistemas lagunares
- Costos de operación relativamente bajos
- Operación y mantenimiento sencillo
- El efluente tratado no requiere sedimentación posterior
- Adaptable a comunidades pequeñas
- Obtención de una alta calidad del efluente apta para reúso agrícola

Entre las principales desventajas del sistema se pueden mencionar las siguientes:

- Requerimientos de área
- Aplicación para pequeños caudales de agua
- Se necesitan cantidades de arena considerables

Esta tecnología requiere de áreas extensas de terreno para su instalación, además de arena para su funcionamiento después de cada periodo de limpieza, de manera que los costos de construcción y mantenimiento pueden resultar elevados.

1.7 DISEÑO

1.7.1 CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de diseño para un filtro intermitente de arena que pueden llevar a un dimensionamiento definitivo del sistema e describen a continuación.

1.7.1.1 Carga

La calidad del efluente depende casi siempre del tamaño efectivo de arena. Cuando la DBO y los sólidos suspendidos se encuentran por debajo de los 30 mg/L, podrían satisfacer los requerimientos para un filtro de etapa simple con arena media, lo cual produce un adecuado funcionamiento del sistema. Si se requiere una mejor calidad del efluente es necesario un sistema de filtración de dos etapas, con arena fina en la segunda etapa.

Hay filtros que funcionan con una tasa de filtración que oscila entre 0.063 y 0.189 m³/(m² d), aunque otros funcionan con aportaciones mayores a este rango. En otros casos, la tasa de filtración para la operación de paso simple se encuentra entre 0.37 y 0.56 m³/(m² d).

En caso de que los sólidos suspendidos en el afluente del filtro excedieran los 50 mg/L, la tasa de filtración deberá reducirse de 0.19 a 0.37 m³/(m² d), para incrementar la fluidez del filtro. El área total del filtro requerida para la operación de paso simple se obtiene dividiendo el nivel de flujo estimado del afluente por la tasa de filtración seleccionada para el sistema. Podría incluirse una unidad filtrante para permitir una operación continua cuando se requiera realizar la limpieza de la unidad por varios días. El mejor arreglo es el de tres lechos filtrantes para permitir una máxima flexibilidad.

En sistemas pequeños que requieren limpieza manual, el lecho individual no deberá superar los 90 metros cuadrados. Los sistemas grandes con equipos de limpieza mecánica deberán tener lechos filtrantes individuales con áreas arriba de 5 000 m² (Middlebrooks, 1995).

1.7.1.2 Grava y arena

El tamaño de la arena está determinado más por la velocidad de filtración que por la acción bacteriológica del filtro. El espesor de la capa de arena no debe ser menor de 0.9 m para asegurar un tratamiento del agua residual. Cuando se tienen capas más delgadas, el agua residual puede atravesar el filtro sin recibir un tratamiento adecuado. Generalmente, las capas de arena se establecen con un espesor de 0.9 a 1.0 m, pero cuando se dispone de arena en la localidad, la profundidad de las capas de arena no se limita.

La arena seleccionada es usada normalmente como el medio filtrante y es descrita generalmente por su tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad. El tamaño efectivo es el tamaño percentil 10; por ejemplo, sólo el 10 por ciento de arena, por peso, es más pequeño que este tamaño. El coeficiente de uniformidad es la relación del tamaño percentil 60 al tamaño percentil 10 (Middlebrooks, 1995).

La arena para filtros de etapa simple deberá tener un tamaño efectivo entre 0.20 y 0.60 milímetros, con un coeficiente de uniformidad menor a 3.5 y con menos del 1 por ciento de arena menor de 0.1 milímetros.

El diseño de la profundidad de la arena en el lecho deberá ser al menos de 0.45 metros, más un coeficiente de profundidad para mínimo un año de ciclo de limpieza. Una operación de limpieza

sencilla podría remover de 0.025 a 0.05 m de arena y un filtro funcionando treinta días podría requerir 0.3 m de arena adicional. Normalmente se usa un lecho profundo de 0.9 m de arena, como ya se ha mencionado, para asegurar una operación eficiente del filtro.

Sobre el drenaje se colocan tres o más capas de grava limpia y graduada; una capa de grava graduada separa de 0.30 a 0.45 m la capa de arena desde los desagües. La capa del fondo se gradúa de manera que su tamaño efectivo sea cuatro veces más grande que la abertura en la tubería de drenado. La capa sucesiva de grava es progresivamente fina para prevenir intrusión de arena. Una alternativa es usar grava alrededor de la tubería de drenaje y membrana geotextil permeable para separar la arena de la grava.

1.7.1.3 Ciclo

En el funcionamiento de un filtro intermitente de arena se considera normal hacer una aplicación de aguas residuales por día, aunque algunas instalaciones de este tipo funcionan sobre la base de hacer cuatro aplicaciones o dosis por día; otras aplican una dosis determinada a intervalos largos e irregulares. No es necesario interrumpir el funcionamiento del filtro a menos que haya señales de sobrecarga o de obstrucción. Se necesitan dos o más filtros para el mantenimiento y descanso de los lechos. El tanque de dosificación debe tener una capacidad suficiente para cubrir el lecho con una lámina de 0.25 a 0.10 m del líquido en una sola aplicación y el sifón debe descargar un gasto aproximado de 6.15 L/s por cada 100 m² de superficie. Cada dosis debe filtrarse en la superficie de 20 a 30 minutos después de cada aplicación al filtro.

1.7.1.4 Distribución

El líquido entrante se puede distribuir sobre el lecho de arena por medio de un sistema de tubos. Cada salida o desagüe puede estar rodeado de una losa de concreto de no más de 0.45 a 0.60 m de diámetro para evitar la erosión de la superficie de arena; estas salidas no deben estar espaciadas a más de 9 a 12 metros.

El sistema de tuberías debe proyectarse de modo que la velocidad no sea menor de 0.30 m/s cuando se disponga de carga suficiente y todos los tubos deben tener una pendiente dirigida hacia un mismo punto para facilitar el drenaje del sistema. Con el gasto indicado y dos aplicaciones por día con una lámina de 0.05 m en cada dosis, la aplicación por hectárea y por día será de 1 063 metros cúbicos. Para la distribución pueden usarse tubos metálicos colocados en forma tal que el recorrido máximo lateral del líquido sea de 7 metros.

1.7.1.5 Desagües

El efluente se extrae por debajo del filtro a través de un sistema de drenes, a los cuales penetra después de haber pasado a través del lecho de arena. No hay dispositivos de regulación en la salida, puesto que la velocidad de filtración se regula por medio del aparato de dosificación y por la velocidad con que la dosis llega a él. El aparato de dosificación debe responder rápidamente a las variaciones de gasto del líquido entrante.

Los drenes inferiores para los filtros intermitentes de arena suelen estar constituidos por tubos con juntas abiertas, con el manguito a 6 o 9 mm del hombro del cubo. Las juntas deben cubrirse cuidadosamente con grava clasificada de 5 a 6

Tabla 1.1 Criterios de diseño recomendados para filtros intermitentes de arena

Factor de diseño	Rango	Recomendado
Medio filtrante		
Tamaño efectivo	0.25-0.5 mm	0.35 mm
Coefficiente de uniformidad	< 4	3.5
Profundidad	45-90 cm	60 cm
Tipo grava durable y lavable		
Tamaño	9.52-19.06 mm	
Tipo abertura o tubería perforada		
Tamaño	7.6-10.16 cm	10.16 cm
Inclinación	0 - 1.0 %	
Diámetro de tubería	2.54-5.08 cm	3.18 cm
Diámetro de orificio	3 - 6 mm	3 mm
Carga sobre el orificio	0.9-1.5 m	1.5 m
Espacio lateral	0.46-1.22 m	0.61 m
Espacio de orificio	0.46-1.22 m	0.61 m
Parámetros de diseño		
Tasa de filtración	0.0162-0.0407 m ³ /(m ² d)	0.0244 m ³ /(m ² d)
Carga orgánica	2.44-9.76 gr DBO/(m ² d)	< 4.88 gr DBO/(m ² d)
Frecuencia de dosis	3 - 6 veces/d	4 veces/d
Volumen del tanque de dosificación	0.5-1.0	0.5
Remoción	90-98 %	
Coliformes	98-99 %	
Sólidos en suspensión	75 %	

mm para impedir la entrada de arena en el dren. Los drenes inferiores deben establecerse a una distancia no mayor de 4.5 m y en los casos de material más fino o de lechos poco profundos se adoptará una distancia menor. En la Tabla 1.1 se presenta un resumen de los criterios de diseño para filtros intermitentes de arena. El tamaño de la tubería de distribución depende del flujo estimado.

1.7.2 EJEMPLO DE DISEÑO PARA EL SISTEMA DE FILTRACIÓN INTERMITENTE DE ARENA

El diseño para este ejemplo se realizará considerando un rango de población de uno a cinco habitantes. Si bien este número puede variar, los datos iniciales como tasa de filtración, carga en los orificios del sistema de distribución y el tamaño de los orificios entre otros, pueden considerarse constantes para el diseño de todos los rangos,

dependiendo de los resultados de presión en la tubería de distribución obtenidos, que presentan algunas restricciones y que serán mencionadas más adelante en el cálculo del sistema.

Por consiguiente, los datos iniciales para calcular el tamaño del filtro son los siguientes:

$$\text{Caudal de diseño } Q_p = 770 \text{ L/d}$$

$$\text{Tasa de filtración } T_f = 24.45 \frac{\text{L}}{\text{m}^2 \text{ d}}$$

Debido a que la tasa de filtración es baja, se esperan corridas de filtración mayores a dos meses, por lo que se justifica el uso de una unidad para todos los rangos de población diseñados.

1.7.2.1 Tamaño del filtro

El área de filtración se determina con el caudal de diseño dividido por la tasa de filtración.

$$A_f = \frac{Q_D}{T_f} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Entonces el área de filtración resulta:

$$A_f = \frac{770 L/d}{24.45 L/m^2 d} = 31.49 m^2$$

El tamaño del filtro se determina con el área de filtración dividida por el número de filtros.

$$T_f = \frac{A_f}{N_f} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

Para este ejemplo solo se considera una sola unidad, por tanto el tamaño del filtro resulta:

$$T_f = \frac{31.49}{1} = 31.49 m^2$$

Con el área obtenida se construirá un filtro de 5.40 m de ancho, para determinar el largo del mismo se divide el área del filtro por el ancho obteniéndose un filtro de forma rectangular.

$$L_f = \frac{A_f}{B_f} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Por tanto, la longitud del filtro resulta:

$$L_f = \frac{31.49}{5.4} = 5.83 \approx 5.9 m$$

1.7.2.2 Sistema de distribución

Para calcular el sistema de distribución se determina el número de tuberías laterales así como el número de orificios en cada una de ellas. Los criterios de diseño de la Tabla 1.1 se tomaron para el cálculo del sistema de distribución del

líquido sobre el medio filtrante. La separación de laterales es de 0.61 m y se consideraron 4 dosificaciones al día.

- a) El número de tuberías laterales se determina a partir del largo del filtro dividido entre la separación de laterales.

$$N_{ul} = \frac{L_f}{S_{ul}} \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Por tanto, el número de tuberías laterales resulta:

$$N_{ul} = \frac{5.9}{0.61} \approx 9$$

- b) El número de orificios, por lateral, se determina dividiendo el ancho de lateral por el doble del espacio entre laterales.

$$N_{of} = \frac{B_f}{2S_{ul}} \quad \text{Ecuación 1.5}$$

De esta ecuación, el número de orificios por lateral resulta:

$$N_{of} = \frac{5.4}{2(0.61)} = 4.42 \approx 5$$

- c) La separación de orificios entre cada lateral resulta de dividir el ancho del filtro entre el doble de número de orificios.

$$S_{of} = \frac{B_f}{2N_{of}} \quad \text{Ecuación 1.6}$$

Por tanto, la separación de orificios resulta:

$$S_{of} = \frac{5.4}{2(5)} = 0.54 m$$

La longitud de laterales se determina con la siguiente ecuación:

$$L_{ul} = \frac{N_{of} S_{of}}{2} \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Con ello, la longitud de los laterales es:

$$L_{ll} = \frac{5(0.54)}{2} = 1.35 \text{ m}$$

El número total de orificios se determinará de la siguiente forma:

$$N_{T0} = 2N_f N_u \cdot N_{of} \quad \text{Ecuación 1.8}$$

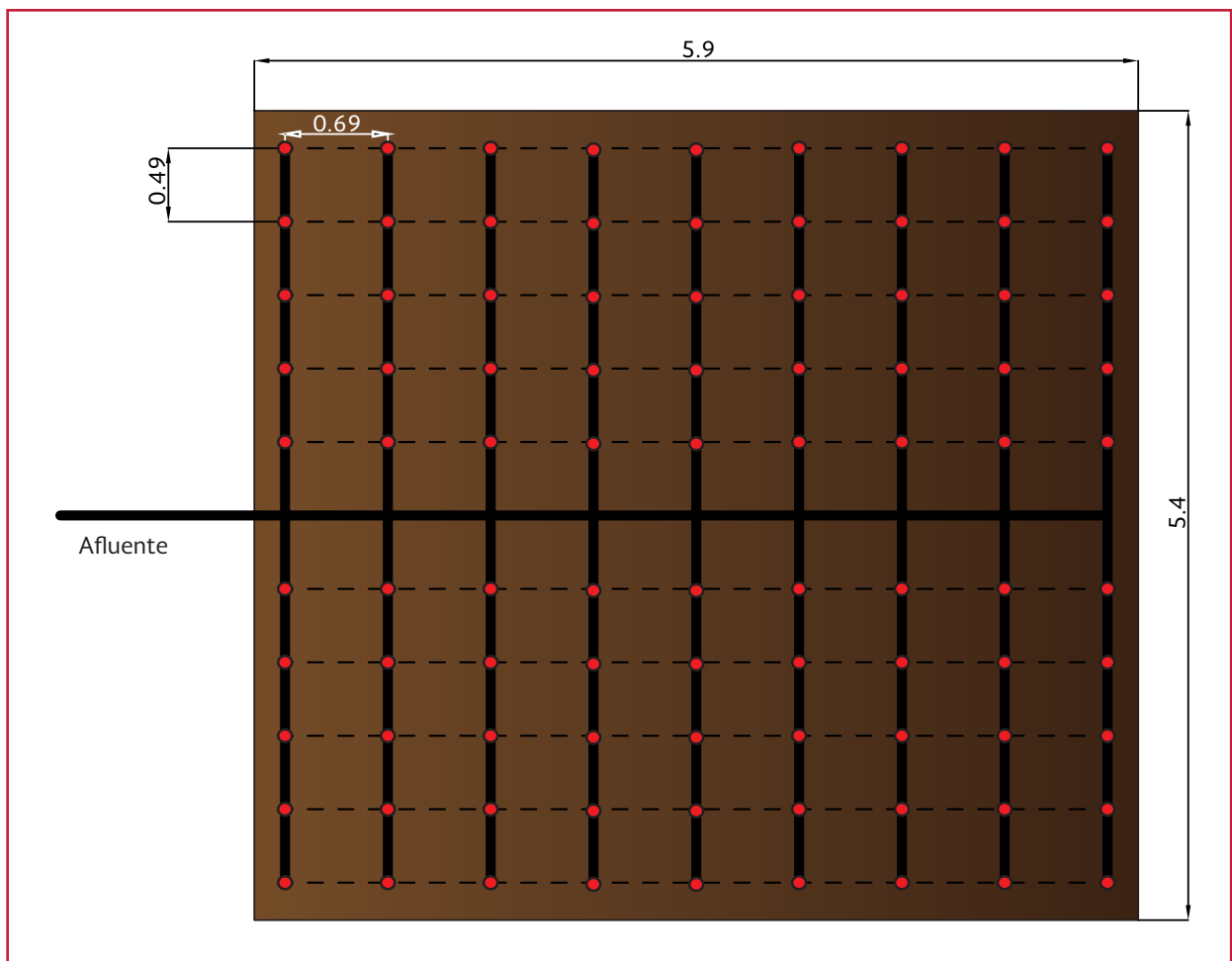
Entonces el número total de orificios en el filtro resulta:

$$N_{T0} = 2(1)(9)(5) = 90$$

Para optimizar el funcionamiento de dosificación en filtros intermitentes, se debe usar un sistema de distribución presurizado. La tubería del sistema de distribución debe ser de un diámetro tal, que la descarga en cada orificio del sistema de distribución debe ser tan similar como sea posible.

Para sistemas en sitio, los flujos esencialmente iguales en los orificios se determinan ajustando el diámetro de tubería de distribución, es decir, la descarga en la tubería de distribución debe ser tan baja como la descarga a través de los orificios. Esta última puede ser determinada tomando diferentes diámetros de tubería y orificios. La Ilustración 1.4 muestra el esquema general del filtro.

Ilustración 1.4 Esquema general del filtro



1.7.2.3 Determinación del gasto y nivel de descarga en cada lateral en el sistema de distribución

De la Tabla 1.1 se tomaron los siguientes criterios. Se consideró carga en los orificios de 1.5 metros, diámetro de los orificios de 0.003 m y tubería de 2 pulgadas (0.0508 m).

El análisis hidráulico se realiza a través del modelo en estado permanente del programa Epanet 2.0® (Para el uso de este y otros programas de simulación matemática, refiérase al libro de *Moderación hidráulica y de calidad del agua en redes de distribución* del MAPAS). Para lo cual se deben calcular los siguientes parámetros.

Caudal por orificio (q_n)

$$q_n = Ch_n^k \quad \text{Ecuación 1.9}$$

donde:

C = Coeficiente de descarga del orificio para este ejemplo es de 0.023 (Sotelo, 1994)

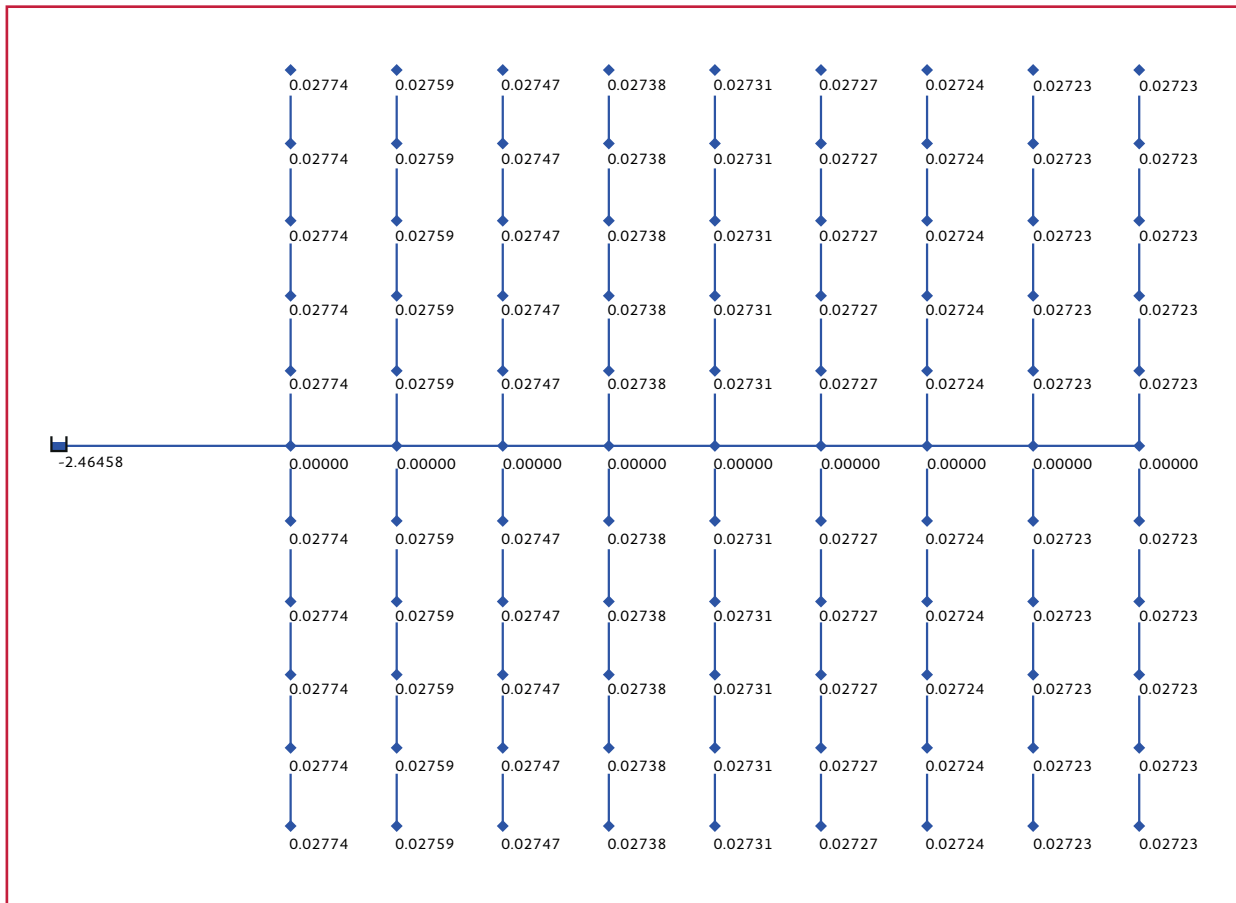
k = 0.5

h_n = Carga en orificio n , en m

En la Ilustración 1.5 se muestra el caudal por orificio resultante.

Debido a que el gasto en los orificios está relacionado con la carga, se debe determinar si los resultados son adecuados; para ello se calcula

Ilustración 1.5 Resultados del modelo matemático



el valor m , que es un valor decimal menor que uno. Si este valor calculado es demasiado bajo (< 0.98), se deberá aumentar el tamaño de la tubería, es decir, el diámetro y la carga en orificio para ajustar.

$$m = \sqrt{\frac{\text{Caudal en el nodo último}}{\text{Caudal en el primer nodo}}}$$

Ecuación 1.10

Entonces, el valor m resulta:

$$m = \sqrt{\frac{0.02723}{0.02774}} = 0.99$$

Por tanto los resultados son adecuados para continuar con el diseño.

1.7.2.4 Cálculo del cárcamo

- a) Para obtener el flujo descargado por cada una de las cuatro dosis se divide el caudal entre el número de dosificaciones por día:

$$V_{descarga} = \frac{Q_D}{4} = \frac{770}{4} = 192.5 L$$

- b) El tiempo de descarga es determinado dividiendo el volumen por descarga entre el caudal del orificio:

$$t_{descarga} = \frac{192.5}{2.46} = 78.25 s$$

- c) La capacidad del cárcamo se determina a partir del factor de Q máximo horario igual a 1.4, que se establece en el libro de *Datos básicos para proyectos de agua potable y alcantarillado* del MAPAS.

$$\begin{aligned} V_{carcamo} &= V_{descarga} C_{vd} \\ &= 192.5(1.4) \\ &= 269.5 L = 0.3 m^3 \end{aligned}$$

Entonces, considerando un cárcamo circular de 1.5 m de altura, el diámetro resulta:

$$D = \left(\frac{4V_{carcamo}}{\pi h} \right)^{0.5} = \left(\frac{4(0.3)}{\pi(1.5)} \right)^{0.5} = 0.5 m$$

1.7.2.5 Diseño del equipo de bombeo

Para este ejemplo se determinó una bomba para el suministro.

- a) El caudal necesario es de 2.46 L/s (Ilustración 1.5). y la carga necesaria resulta de 1.5 m (parámetro de diseño) más la altura del cárcamo (1.5 m), esto para garantizar el flujo en el sistema para un nivel mínimo en el cárcamo, la curva propuesta se presenta en la Ilustración 1.6
- b) La potencia de la bomba es obtenida con el siguiente cálculo, con una eficiencia del 60 por ciento

$$\begin{aligned} P &= \frac{\gamma Q H_B}{\eta} \\ &= \frac{9789 \frac{N}{m^3} \left(\frac{2.46 L/s}{1000 L/m^3} \right) (3 m)}{0.6} \\ &= 120.4 \frac{N m}{s} = 120.4 W \end{aligned}$$

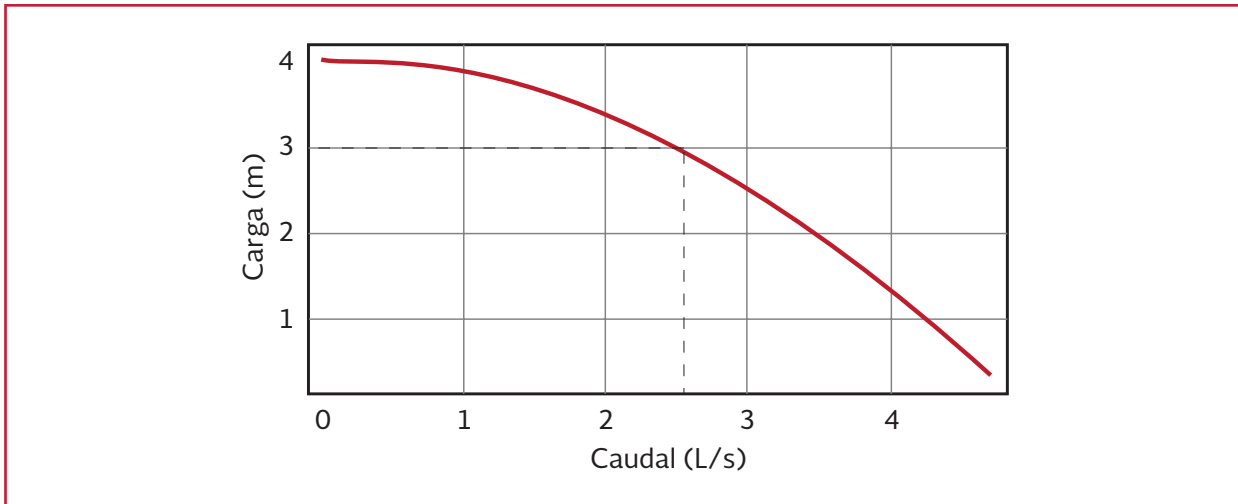
$$P = \frac{120.4 W}{745.7 \frac{W}{HP}} = 0.16 HP$$

Este resultado debe ajustarse a una potencia comercial, como puede ser 0.25 HP

1.7.2.6 Drenes

El cálculo del número de drenes para la recolección del líquido en el fondo del filtro se presenta en la siguiente ecuación:

Ilustración 1.6 Curva de bomba propuesta



$$N_{drenes} = \frac{B_f}{3} = \frac{5.4}{3} = 1.8 \approx 2 \quad \text{Ecuación 1.11}$$

Como se puede ver, la separación de drenes es de 2.7 metros. En la Ilustración 1.7 se presenta el arreglo general del filtro.

1.8 CONSTRUCCIÓN Y ESPECIFICACIONES GENERALES

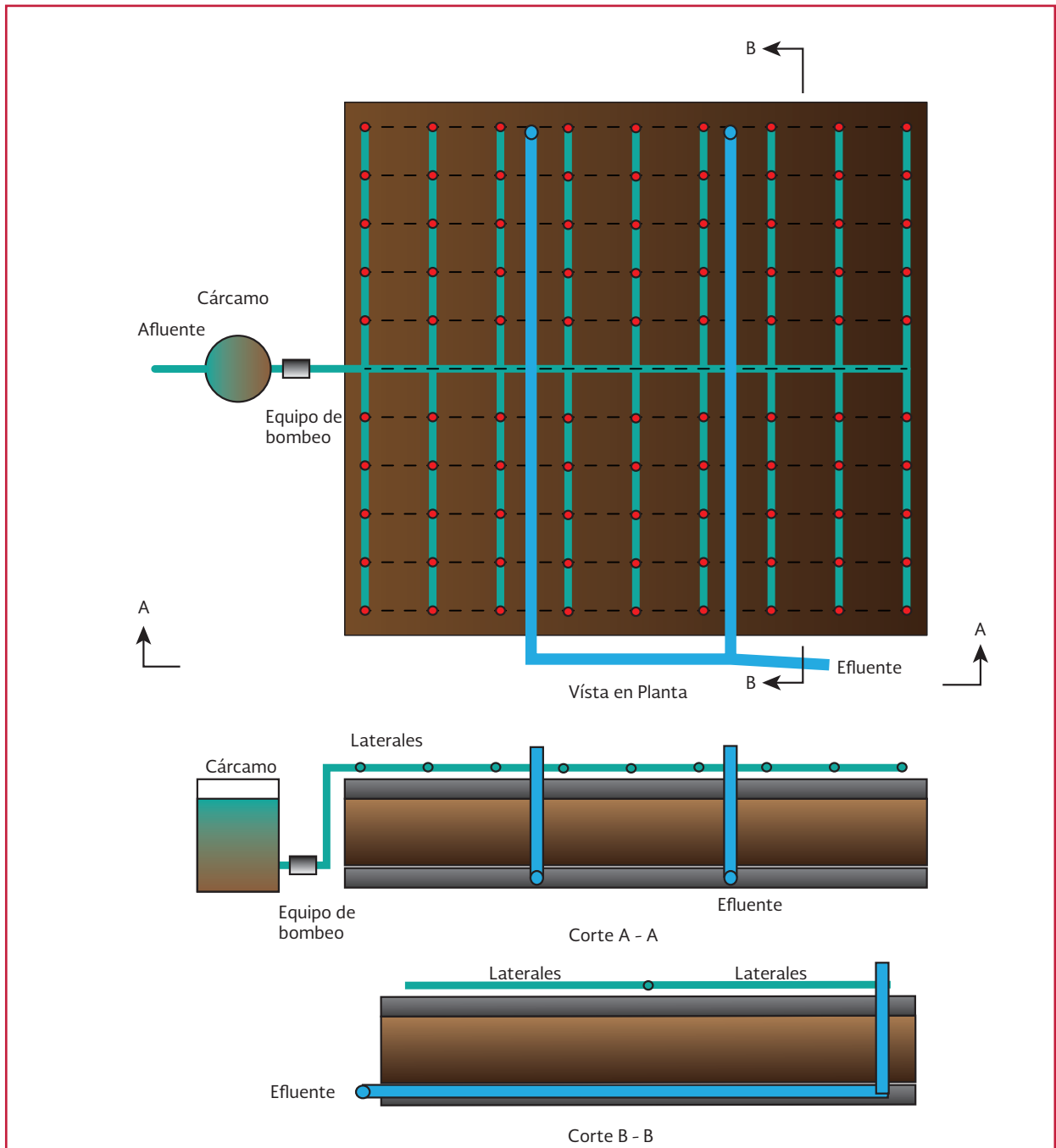
A menos que los lechos sean de dimensiones muy reducidas, los filtros intermitentes de arena están constituidos por dos o más unidades dotadas de sus correspondientes mecanismos de dosificación, lo que facilita la distribución del líquido y el manejo de las unidades. Pueden ser construidos en excavaciones y dispuestos en un banco de tierra compacta o de concreto reforzados.

La materia desplazada se dispone en diques bajos que lindan y separan las diferentes unidades de un grupo. A los lados y los fondos se les da forma de artesas o acanalamientos bajos paralelos, cada uno se coloca en una zanja con un desagüe inferior. El líquido filtrado se descarga en un tubo colector transversal que lo lleva hacia

un punto de descarga debidamente situado. Se recomienda construir el ancho de la zanja aproximadamente de 1.5 metros.

En caso de ser necesaria una segunda línea, ésta podrá construirse colindando con la primera y duplicando el ancho de la zanja. En este caso sólo se requerirá una tubería de recolección localizada a la distancia media entre las dos tuberías de distribución. Cuando el área de las zanjas de absorción sobrepase 170 m² se recomienda instalar un elemento dosificador a la entrada. Dicho elemento podrá ser un sifón, una bomba o cualquier otro sistema que cumpla con esta función. El tamaño del tanque y del elemento dosificador estará determinado por los caudales a tratar. Sobre los desagües y sobre el fondo entero de la zanja se colocan cuidadosamente tres capas de grava limpia de un tamaño seleccionado, se cubren hasta una profundidad no menor de 15 centímetros. Los tres tamaños de grava oscilan entre los 3.3 cm para la grava gruesa, 1.9 cm para la media y 0.6 cm la grava más fina. Cada una de estas capas deben colocarse de tal forma que la más gruesa quede en el fondo, posteriormente la de tamaño medio y por último la grava más fina. Finalmente, por encima de todo

Ilustración 1.7 Arreglo general del filtro



se coloca la arena que debe ser de un tamaño y uniformidad aprobados (ver criterios de diseño para arena).

El sistema de drenaje es tubería PVC perforada de 3 a 4 pulgadas, que debe situarse con una pendiente de 0.025 a 1 por ciento adecuada para desalojar el

filtrado a una velocidad de 0.30 a 1.22 metros por segundo. El sistema de distribución es el último factor a considerar en el diseño, y consiste en un tanque de bombeo, línea de suministro, múltiple y laterales de distribución. La bomba debe ser capaz de suministrar un gasto aproximado de 1.6 L/s a 6.15 L/s por cada 100 m² de superficie del filtro. La

línea de suministro es generalmente tubería PVC de 1 a 2 pulgadas conectada de la bomba hacia el múltiple. Éste, generalmente, es tubería PVC de 2 pulgadas que alimenta a dos o más laterales.

Los laterales generalmente también consisten en tubería PVC de 1 a 2 pulgadas que debe conectarse al múltiple en una configuración "H"; el espacio entre ellos debe ser entre 5 y 13 metros.

Los filtros intermitentes de arena también pueden construirse en forma circular, con paredes de concreto y una columna central del mismo material, la cual sostiene un mecanismo giratorio que distribuye el agua residual con mayor eficacia. Debido a este diseño, en algunas partes se acepta mayor aplicación de agua, que llega a ser hasta 150 por ciento más de la que se puede aprobar para aquellos filtros dotados de puntos de alimentación fijos.

1.9 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Como ya se mencionó anteriormente, el mecanismo de acción de este proceso es a través de una dosificación intermitente del agua residual para cubrir la superficie del filtro, lo que forma una lámina de 5 a 8 centímetros. A medida que el agua residual pasa hacia abajo a través de la arena, se arrastra el aire desde la superficie.

A medida que se aplica la dosis a un filtro de arena, se forma en la superficie del lecho una capa de materia orgánica. Esta capa se mantiene unida por cabello, papel y otros materiales tenaces y pueden alcanzar un espesor de 8 a 12 mm antes de que sea necesario quitarla. Mientras el filtro esté funcionando con suficiente rapidez no es necesario eliminar esta capa, pero cuando el le-

cho muestra señales de obstrucción es necesario romperla. La mayor parte de la acción del filtro se lleva a cabo en la capa formada por los 12.5 a 20.0 cm superiores del espesor del lecho pero, en ocasiones el lecho se obstruye tanto que es necesario levantar de 2 a 5 centímetros, además de la trama seca de la superficie o aflojar la superficie mediante un pase de arado o de rastra.

Es muy importante que no se permitan estancamientos sobre los lechos, pues éstos favorecen olores molestos y un efluente de menor calidad. El estancamiento es un indicador de la necesidad de limpiar el lecho y, además, cuando la operación intermitente del filtro alcanza una predeterminada caída de presión, el lecho debe ser drenado y limpiado.

Cuando se incrementa la frecuencia en la caída de presión o en el estancamiento del filtro, es necesario disminuir la dosis de aplicación u optimizar el pretratamiento, según sea el caso. Debe evitarse incorporar, por medio del arado, el material obstruido al resto del lecho, pues quedaría en peores condiciones de las que tenía cuando se observó el defecto al inicio. La superficie de los lechos debe mantenerse nivelada para proveer una distribución uniforme del agua residual, y no debe dejarse crecer hierbas o pasto sobre ellos.

En un lecho bien operado el material del filtro puede durar indefinidamente sin modificarse, salvo en lo que se refiere a la reposición de la arena que se pierde en las limpiezas del lecho. Sin embargo, si se hace funcionar un filtro con mucha intensidad, aunque la calidad del efluente pueda ser satisfactoria, será necesario quitar la arena periódicamente y sustituirla (Middlebrooks, 1995).

2

SISTEMAS DE APLICACIÓN SUPERFICIAL AL SUELO

Tradicionalmente se planteaba el tratamiento de las aguas residuales como una acción de mejora ambiental lineal y desconectada de su entorno. Sin embargo, dicho entorno puede ser aprovechado para el tratamiento de las aguas, de tal manera que la inversión de recursos económicos para este fin puede resultar de beneficio para actividades productivas, incluso para la recuperación de nutrientes contenidos en ella.

El tratamiento natural utiliza y maximiza una serie de procesos que ocurren de forma natural en el ambiente, en un espacio controlado, en el que se desarrollan una serie de ecosistemas que permiten la recuperación del agua, así como la reintroducción al ciclo biológico de algunos compuestos excedentes que se convierten en compuestos estables para el ambiente.

La aplicación de agua residual al suelo implica el uso de plantas de la superficie y de la matriz del suelo para su tratamiento. El reúso de afluentes tratados se ha incrementado en la agricultura ya que tiene como metas promover la sostenibilidad en esta actividad, preservar las escasas fuentes de agua y mantener la calidad ambiental.

Este tipo de tratamientos se clasifican en dos grupos: los de aplicación directa sobre el terreno y los sistemas acuáticos. Ambos constituyen

una acción combinada de vegetación, suelo y microorganismos presentes en ellos.

En comparación con los sistemas convencionales, los sistemas de tratamiento de aplicación superficial al suelo presentan las siguientes ventajas:

- Escasa necesidad de personal de mantenimiento
- Consumo energético reducido
- Baja producción de lodo
- Alta calidad del efluente
- Incrementa la fertilidad de terreno

Entre los factores limitantes para estos sistemas se pueden mencionar los siguientes:

- Se requiere mayor superficie de terreno disponible (entre 4 y 40 m²/hab, aproximadamente)
- Sólo pueden aplicarse a determinados tipos de descargas, con amplio contenido de materia biodegradable
- No se pueden aplicar para el tratamiento de residuos tóxicos o peligrosos

En este tipo de tratamiento el suelo cumple dos funciones. Por un lado, es el medio receptor de las aguas residuales, lo que evita el vertido a otros medios; por otro lado, es el agente activo,

pues tanto en su superficie como en su interior se produce el proceso de remoción de nutrientes, materia orgánica, microorganismos y otros componentes como metales pesados o microcontaminantes orgánicos.

El rasgo común a todos ellos es que el tratamiento se consigue a través de los procesos físicos, químicos y biológicos naturales, desarrollados en un sistema planta–suelo–agua.

2.1 FILTRO VERDE

Este sistema consiste en el cultivo de masas forestales (árboles), que además de favorecer el tratamiento de las aguas residuales permiten la explotación maderera, con lo que se consigue de forma indirecta la protección de los bosques, la recarga artificial de acuíferos y la mejora de la calidad de la atmósfera. La Ilustración 2.1 muestra un ejemplo de un filtro verde.

El filtro verde tiene uno de los mayores potenciales de tratamiento de todos los sistemas de aplicación al terreno, debido a la aplicación de cargas relativamente bajas sobre el suelo vegetado y a la existencia de un ecosistema muy activo en el suelo, a escasa distancia de la superficie.

El tratamiento tiene lugar en niveles superiores del terreno, donde se encuentra una capa biológica activa.

El filtro verde se considera una alternativa de bajo costo que aprovecha la capacidad física, química y biológica del suelo para dar tratamiento a las aguas residuales.

La filtración está relacionada con las características físicas del terreno (granulometría), para lo cual se recomienda:

- Suelo arcilloso: diámetro de las partículas menor a 1/16 mm, filtración lenta y efectiva
- Suelo de grava: tamaño de grano > 2 mm, filtración rápida y poco efectiva
- Suelo de arenas y limos: 1/16 mm a 2 mm, funcionamiento intermedio

Debido a la presencia de plantas como árboles, carrizos y juncos, las sustancias químicas del agua residual se asimilan en forma de nutrientes y por acción biológica se metabolizan gracias a los microorganismos de la materia orgánica. Estos microorganismos del suelo y de las raíces de las plantas pueden llegar a remover hasta un 85 por ciento de la materia orgánica presente en el agua residual.

Por otra parte, la vegetación clorofílica asimila los compuestos nitrogenados, fosfóricos y potásicos que contenga la carga de aguas residuales, siempre que ésta se mantenga dentro de ciertos límites.

Todo ello hace que este sistema de tratamiento de aguas residuales sea ecológico y económico. No obstante, se debe tener cuidado cuando se utilice la vegetación para consumo humano o de ganado, ya que en sistemas como este es posible la supervivencia y transmisión de patógenos.

2.1.1 VENTAJAS

- Es una tecnología de bajo costo de mantenimiento y construcción
- Su operación es silenciosa
- Fomenta la reforestación y produce rentabilidad maderera
- Se puede aprovechar terreno no cultivable
- Reduce el impacto ambiental de las aguas residuales rurales

- No requiere de personal especializado (técnicos) para su operación
- Permite instalar nidos para pájaros insectívoros
- No produce lodos
- Área mínima de una hectárea por cada 200 habitantes
- Trazado previo de colectores
- Profundidad del nivel freático mayor a 2 metros

2.1.2 DESVENTAJAS

- Riesgo de contaminación del acuífero
- Se requiere una superficie grande de terreno (1 ha/ 200 hab, aproximadamente)
- Se pueden producir molestias como mal olor, hierbas, moscas y mosquitos
- El exceso de nitrógeno en el agua puede provocar el crecimiento desordenado de los árboles y falta de lignificación, lo que a su vez puede causar que se rompan ramas y copas, especialmente en zonas con vientos muy intensos y constantes
- Restricciones climáticas: periodos muy fríos o muy lluviosos
- No puede haber pozos ni tomas de agua potable cercanas

2.1.3 CRITERIOS DE DISEÑO

Para poder implementar un filtro verde se recomiendan las siguientes características.

- Población de 500 a 25 000 habitantes
- Suelo semipermeable, ni arcilloso ni arenoso, con un cierto contenido de gravas
- Aguas residuales no industriales (por los tóxicos) y sin contaminantes nocivos para los cultivos
- Terreno llano disponible, a un mínimo de 500 metros de la población en la dirección de los colectores y contra el viento

2.1.3.1 Selección del cultivo

Las plantas se utilizan en los sistemas de aplicación al terreno para:

- Captar nitrógeno
- Mantener e incrementar las tasas de entrada de agua y la permeabilidad del suelo
- Disminuir la erosión
- Servir como medio para los microorganismos

Los cultivos pueden ser agrícolas o forestales. Se hará referencia a estos últimos ya que, como se mencionó, los primeros pueden representar riesgos para la salud.

En la fase inicial de crecimiento de los cultivos forestales, la asimilación es baja (1 o 2 años), pero después crece rápidamente y permanece constante hasta la madurez. En el caso de los árboles se deben considerar dos periodos vegetativos a lo largo del año; la actividad vegetativa de primavera-otoño es mayor que la de otoño-primavera.

Se deben escoger cultivos con alta tolerancia al agua o a la humedad, es decir, aquéllos que puedan permanecer un largo tiempo con altas humedades en el suelo sin sufrir daños ni reducciones en la productividad. Esta característica es muy importante para maximizar las cargas hidráulicas de aplicación. Cabe mencio-

Ilustración 2.1 Ejemplo de un filtro verde



nar que los cultivos forestales que presentan mayor tolerancia son los árboles de hoja caduca y los que tienen un menor rendimiento son los pinos. Si bien la selección del cultivo es fundamental, hay poca información respecto a la rentabilidad y las propiedades de eliminación de tóxicos de las distintas especies vegetales, por lo que se suelen elegir álamos para estos fines (populicultura).

2.1.4 DISEÑO DEL FILTRO VERDE

2.1.4.1 Datos iniciales

Al igual que para cada estudio y proyecto de agua potable, alcantarillado y saneamiento, se requiere en primera instancia analizar las características de la comunidad de interés, esto es:

- Topografía
- Número actual de habitantes y proyecciones de población
- Tipo de descargas (habitacional, comercial, pública, industrial)
- Climatología
- Infraestructura existente (red de agua potable, red de alcantarillado sanitario y pluvial, líneas de corriente eléctrica, telefónica, etcétera)

Complementariamente se debe proponer un predio para la instalación del filtro verde y para ello es muy importante tener claros los siguientes aspectos:

- Uso de suelo
- Título de propiedad

- Superficie
- Características hidrogeológicas
- Vegetación, fauna y acometida eléctrica

Una vez obtenida esta información, se deberá:

- Analizar las aguas residuales
- Hacer un levantamiento topográfico del predio y el trazo de colectores
- Realizar un informe geológico

2.1.4.2 Diseño hidráulico

Al evaluar y seleccionar el sitio destinado para el filtro verde se deben considerar como factores más importantes la permeabilidad y la profundidad del nivel freático. Se puede decir que el suelo presenta condiciones óptimas cuando:

- El pH está entre 5.5 y 8.4
- La conductividad eléctrica es menor de 4 Ω/cm
- La permeabilidad está entre 5 y 50 mm/h
- El nivel freático está entre 0.6 y 1.5 m
- Las pendientes están entre el 2 y el 15 por ciento en terrenos cultivados, en terrenos no cultivados pueden ser superiores

La selección del cultivo es otro paso fundamental en el proceso de diseño, ya que muchas de las decisiones asociadas con el proyecto dependerán del tipo de cultivo. Los más adecuados son los que presentan una elevada capacidad de asimilación de nutrientes, alto consumo de agua, elevada tolerancia a la humedad del suelo, baja sensibilidad a los constituyentes del agua residual y mínimas necesidades de control. Entre estos cultivos se encuentran especies forrajeras perennes, turbas,

ciertas especies de árboles, algunos cultivos agrícolas y algunos frutales.

Los cultivos forrajeros y forestales presentan una elevada capacidad de asimilación de nutrientes, mientras que los volúmenes de agua requeridos son significativamente menores que los que demandan los cultivos agrícolas.

Las necesidades de pretratamiento se deben considerar como una operación unitaria que se incorporará a otros procesos para conseguir un sistema de tratamiento completo.

El tratamiento se hace necesario por razones relacionadas con la protección de la salud pública, el control de las condiciones desagradables, las limitaciones de los sistemas de distribución, la reducción de la presencia de constituyentes limitantes y aspectos relacionados con el terreno y los cultivos. El nivel de tratamiento puede variar dependiendo de la calidad del agua esperada o reúso y de las razones antes mencionadas.

En las áreas forestales los niveles de pretratamiento se pueden reducir al mínimo considerando que las cosechas no serán consumidas por humanos y que el grado de contacto con el residual sólo involucra a operadores (siempre que el tratamiento no se establezca con fines recreativos).

El método de distribución del agua residual se selecciona en las primeras etapas del diseño preliminar, ya que la eficiencia de aplicación del sistema de distribución constituye un parámetro importante en las necesidades totales de agua de riego. Los métodos de aplicación pueden ser:

- Aspersión
- Riego superficial
- Por goteo

La selección de uno u otro dependerá de las condiciones para su uso, de acuerdo con las necesidades de cada tipo de cultivo.

La carga hidráulica o dotación de riego es el volumen de agua residual aplicada por unidad de área de terreno en un determinado periodo (semanal, mensual o anual). Éste es el parámetro básico en el diseño y operación del sistema y puede ser determinado con base en el requerimiento de agua del cultivo, en la capacidad de asimilación hidráulica y en la capacidad de asimilación de constituyentes del sistema suelo-planta para asegurar que éste no sea degradado.

2.1.4.3 Carga hidráulica de diseño Lw

La carga hidráulica de diseño será el menor valor obtenido de acuerdo a los requerimientos del cultivo; la asimilación hidráulica del sistema suelo-planta y la capacidad asimilativa de los constituyentes, se tomará para el diseño el menor valor. En caso de que el menor valor sea la carga basada en la capacidad asimilativa de constituyentes, será necesario realizar una comprobación de los valores mensuales correspondientes y adoptar el menor de ellos para el diseño.

Carga hidráulica basada en los requerimientos de agua del cultivo

La cantidad de agua requerida por un cultivo se define como la cantidad de agua necesaria para reemplazar el agua consumida por evapotranspiración más el agua necesaria para el lavado del suelo. Puede ser definida por la ecuación:

$$R = (ET - P_r)(1 + LR) \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde:

R = Agua neta requerida por la vegetación (mm/mes)

ET = Evapotranspiración (mm/mes)

P_r = Precipitación respectivamente (mm/mes)

LR = Agua requerida para el lavado la cual suele variar entre el 10 y 25 por ciento del agua total aplicada (fracción)

Debido a que los sistemas, no aplican el agua uniformemente sobre el área y una parte de esta se pierde durante el riego, la carga hidráulica a aplicar se determina por la ecuación:

$$Lw(I) = \frac{R}{Ea} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

$$Lw(I) = \frac{(ET - P_r)(1 + LR)}{Ea} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

donde:

$Lw(I)$ = Carga hidráulica basada en los requerimientos de agua del cultivo (mm/mes)

Ea = Eficiencia de aplicación del sistema de aplicación (fracción)

Carga hidráulica basada en la capacidad de asimilación hidráulica del sistema suelo - planta

Por su parte, la carga hidráulica basada en la capacidad de asimilación hidráulica del sistema suelo - planta se determina por la ecuación general de balance de agua:

$$Lw(p) = ET - Pr + Pw \quad \text{Ecuación 2.4}$$

donde:

$Lw(p)$ = Carga hidráulica basada en la capacidad de asimilación hidráulica del sistema suelo-planta (mm/mes)

Pw = Velocidad de percolación, se basa en el mínimo valor de la permeabilidad en condiciones saturadas de los primeros 2.5 m de la columna estratigráfica (mm/mes)

Para el diseño preliminar se puede emplear un valor máximo diario variable entre el 2 y el 6 por ciento de la permeabilidad mínima del suelo.

Carga hidráulica basada en la capacidad asimilativa de constituyentes

Cada constituyente del agua residual puede ser un factor limitante de la carga hidráulica dependiendo de su concentración en el agua residual, la capacidad de asimilación del sistema y de las restricciones ambientales. La carga hidráulica

basada en la capacidad asimilativa de nitrógeno se determina por la siguiente ecuación.

$$Lw(n) = \frac{Cp(Pr - ET) + U(100)}{(1-f)Cn - Cp} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

donde:

$Lw(n)$ = Carga hidráulica admisible basada en la carga anual de nitrógeno (mm/año)

Cp = Concentración de nitrógeno total admisible en el agua percolada (mg/L)

Cn = Concentración total de nitrógeno en el agua residual aplicada (mg/L)

f = La fracción del nitrógeno total aplicado eliminado por desnitrificación, volatilización y almacenamiento en el suelo

U = Asimilación de nitrógeno del cultivo (kg/ha año)

El factor de conversión de 100 resulta del siguiente análisis dimensional:

$$\begin{aligned} Lw(n) \left[\frac{mm}{año} \right] &= \frac{Cp \left[\frac{mg}{L} \right] \left(Pr \left[\frac{mm}{año} \right] - ET \left[\frac{mm}{año} \right] \right) + U \left[\frac{kg}{ha \text{ año}} \right] \left[\left(\frac{0.0001 \text{ ha}}{1 m^2} \right) \left(\frac{1 \times 10^6 \text{ mg}}{1 \text{ kg}} \right) \left(\frac{1 m^3}{1000 L} \right) \left(\frac{1000 \text{ mm}}{1 m} \right) \right]}{(1-f)Cn \left[\frac{mg}{L} \right] - Cp \left[\frac{mg}{L} \right]} \\ &= \frac{\left[\frac{mg}{L} \right] \left(\left[\frac{mm}{año} \right] \right) + \left[\frac{100(mg)(mm)}{año(L)} \right]}{\left[\frac{mg}{L} \right]} = \frac{\left[\frac{mg}{L} \right] \left[\frac{mm}{año} \right] + \left[\frac{mg}{L} \frac{mm}{año} \right]}{\left[\frac{mg}{L} \right]} = \frac{\left[\frac{mg}{L} \right] \left[\frac{mm}{año} \right]}{\left[\frac{mg}{L} \right]} = \frac{mm}{año} \end{aligned}$$

De forma complementaria, la carga hidráulica basada en la capacidad asimilativa de constituyentes puede obtenerse por:

$$Lw(c) = (10M)C \quad \text{Ecuación 2.6}$$

donde:

$Lw(c)$ = Carga hidráulica basada en la capacidad asimilativa de constituyente (cm/año)

M = Capacidad asimilativa de constituyente (kg/ha año)
 C = Concentración del constituyente en el agua residual (cm/ha kg)

Normalmente los cultivos forestales son los que presentan una mayor capacidad de asimilación de nitrógeno. A veces llegan a valores por encima de 400 kg/(ha año).

2.1.4.4 Superficie necesaria

La superficie necesaria incluye el área cultivada, el área requerida para las instalaciones de pretratamiento, las zonas de amortiguación, los accesos y los depósitos de almacenamiento. La superficie de campo requerida se calcula a partir de la carga hidráulica de diseño con la siguiente expresión:

$$A = \frac{365Q\Delta vs}{10Lw} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

donde:

A = Superficie del campo (ha)
 Q = Caudal medio de agua residual (m³/d)
 Lw = Carga hidráulica de diseño (mm/año)
 Δvs = Ganancia o pérdida neta de agua almacenada debidas a las precipitaciones, evaporación y fugas en el depósito de almacenamiento (m³/año)

Otra forma de calcular las necesidades preliminares de terreno para filtros verdes es a partir de la siguiente expresión.

$$A_w = \frac{QC}{12\,000} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

donde:

Q = Caudal medio diario de tratamiento (m³)
 C = Concentración de DBO promedio en el agua residual (mg/L)
 12 000 = Cantidad de gramos de DBO por habitantes equivalentes asimilados en una hectárea de terreno (g/ha)

Si la cantidad de agua residual excede la carga hidráulica de diseño, es necesario disponer de instalaciones para el almacenamiento del agua residual, lo cual podría implicar que:

- Se produzcan fermentaciones anaerobias, y en consecuencia malos olores
- Se produzcan lodos al sedimentarse los productos en suspensión en las aguas residuales

2.1.5 EJEMPLO DE DISEÑO

Para ejemplificar el procedimiento de diseño se analiza la instalación de un filtro verde, de acuerdo con los datos de la Tabla 2.1, que se obtuvieron del sitio de estudio, y considerando un caudal de aguas residuales de 68 m³/día.

1. Se determina la carga de diseño de acuerdo con las tres condiciones:
 - a) Carga hidráulica basada en los requerimientos de agua del cultivo, de acuerdo con los datos mostrados en la Tabla 2.1, considerando un 25 por ciento de agua para lavado y una eficiencia del 75 por ciento, la Tabla 2.2 presenta los resultados de aplicar la Ecuación 2.1 y la Ecuación 2.2

Tabla 2.1 Datos para ejemplo

Mes	Evapotranspiración	Percolación	Precipitación
	mm/mes	mm/mes	mm/mes
Enero	20	288	87
Febrero	42	288	88
Marzo	88	288	80
Abril	93	288	61
Mayo	143	288	15
Junio	167	288	8
Julio	198	288	3
Agosto	188	288	0
Septiembre	131	288	9
Octubre	112	288	23
Noviembre	40	288	38
Diciembre	20	288	84
Anual	1 244	3 456	496

Tabla 2.2 Agua neta requerida por la vegetación

Mes	(ET)	(P _r)	R=(ET-P _r)(1+0.25)	Lw(I)=R/Ea
	mm/mes	mm/mes	mm/mes	mm/mes
Enero	20	87	-83.75	-111.67
Febrero	42	88	-57.50	-76.67
Marzo	88	80	10.00	13.33
Abril	93	61	40.00	53.33
Mayo	143	15	160.00	213.33
Junio	167	8	198.75	265.00
Julio	198	3	243.75	325.00
Agosto	188	0	235.00	313.33
Septiembre	131	9	152.50	203.33
Octubre	112	23	111.25	148.33
Noviembre	40	38	2.50	3.33
Diciembre	20	84	-80.00	-106.67
Anual			Σ	829.33 mm/año

b) Carga hidráulica basada en la capacidad de asimilación hidráulica del sistema suelo – planta. La Tabla

2.3 presenta los resultados de aplicar la Ecuación 2.4 a los datos de la Tabla 2.1

Tabla 2.3 Capacidad de asimilación hidráulica del sistema suelo – planta

Mes	(ET)	(P)	(Pw)	Lw(p)=ET-Pr+Pw
	mm/mes	mm/mes	mm/mes	mm/mes
Enero	20	87	288	221
Febrero	42	88	288	242
Marzo	88	80	288	296
Abril	93	61	288	320
Mayo	143	15	288	416
Junio	167	8	288	447
Julio	198	3	288	483
Agosto	188	0	288	476
Septiembre	131	9	288	410
Octubre	112	23	288	377
Noviembre	40	38	288	290
Diciembre	20	84	288	224
Anual			Σ	4 204.00 mm/año

c) Carga hidráulica basada en la capacidad asimilativa de constituyentes, a través de la Ecuación 2.5 y considerando una concentración admisible

en el agua percolada de 8 mg/L, una asimilación de nitrógeno de 375 kg/(ha año) y una concentración total de nitrógeno de 20 mg/Litro

$$\begin{aligned}
 Lw(n) &= \frac{8 \frac{mg}{L} \left(496 \frac{mm}{año} - 1244 \frac{mm}{año} \right) + 375 \frac{kg}{ha \text{ año}} \left[\frac{100 \text{ ha } mg \text{ m}^3 \text{ mm}}{kg \text{ m}^2 \text{ L m}} \right]}{(1 - 0.25) 20 \frac{mg}{L} - 8 \frac{mg}{L}} \\
 &= \frac{8 \frac{mg}{L} \left(-748 \frac{mm}{año} \right) + 37500 \frac{mg \text{ mm}}{L \text{ año}}}{7 \frac{mg}{L}} = \frac{31516 \frac{mg}{L} \frac{mm}{año}}{7 \frac{mg}{L}} \\
 &= 4502.3 \frac{mm}{año}
 \end{aligned}$$

La carga hidráulica de diseño será el menor valor obtenido de acuerdo a los requerimientos del cultivo, la asimilación hidráulica del sistema suelo-planta y la capacidad asimilativa de los constituyentes. Por tanto se adopta como valor de diseño el agua neta requerida por el cultivo

2. La superficie necesaria resulta de aplicar la Ecuación 2.7 y considerando que no

hay pérdidas, extracciones o almacenamiento de agua.

Tabla 2.4 Comparación de resultados

Lw(I)	829.33	mm/año
Lw(p)	4 204.00	mm/año
Lw(n)	4 502.30	mm/año

$$A = \frac{365(68)(1)}{10(829.33)} = 2.99 \approx 3 \text{ hectareas}$$

2.1.6 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Una vez instalado el filtro verde, es importante establecer un programa de mantenimiento para que funcione adecuadamente. Será necesaria la presencia de cuando menos un operador que se encargue del manejo de las aguas y que realice las siguientes labores:

- a) Limpiar anualmente las hierbas que proliferen con rapidez, dada la riqueza orgánica y mineral del suelo. Considérese que un crecimiento por encima de 1 m disminuye la penetración de la luz y dificulta la fotosíntesis
- b) Reparar los cauces
- c) Controlar la población de mosquitos y otros insectos con pájaros insectívoros
 - Controlar la contaminación edáfica a diario. Abrir y cerrar las compuertas de forma que se alternen las parcelas de terreno
 - Limpiar los sedimentos que se hayan formado
 - Graduar la aportación continua de agua en primavera y otoño en relación con las necesidades volumétricas diarias. En caso de tormenta será necesario vigilar el depósito regulador y, antes de que se llene, derivar el caudal que baje por el emisor. En caso de falla también habría que hacer lo mismo

Complementariamente, es necesario considerar un programa de mantenimiento anual que incluya:

- Trabajos silvícolas anuales, es decir, laboreo del suelo, podas y tratamiento de plagas
- Si el cultivo se utiliza para la explotación de madera será necesario prever la superficie a cortar y los trabajos de las subsiguientes repoblaciones
- Conservación de las vías de acceso y de la infraestructura de riego

Dado que la implantación de un filtro verde modifica las características del entorno de la población, es necesario contar con un programa educativo como apoyo y complemento. Este programa no solo debe tener fines informativos respecto al tema, sino que también debe plantear una actuación directamente relacionada con la mejora del medio ambiente y la influencia de este sistema en la estética del entorno y en la salud del individuo. Sus objetivos son:

- Informar e interesar a la población sobre la necesidad de tratar las aguas residuales
- Dar a conocer el filtro verde como una alternativa rentable y ecológica
- Prevenir los riesgos sanitarios

Adicionalmente, se debe fomentar la aceptación del sistema con actividades de carácter recreativo. Estas actividades deben abarcar a los distintos grupos poblacionales según sus características específicas y el rol que desarrollan en la sociedad. Es fundamental que el personal a cargo del filtro verde trabaje de manera conjunta con las autoridades municipales, escuelas y asociaciones locales.

También se requerirá realizar un adiestramiento sanitario para dilucidar el tipo de actividades que se deben llevar a cabo en su entorno, como

por ejemplo, la ingesta de hongos, la plantación de cultivos alimenticios, el pastoreo de animales, beber agua de una zona cercana, tener precaución por la fragilidad de las ramas.

Para este tipo de actividades se recomienda consultar el libro *Cultura del agua* del MAPAS.

2.2 INFILTRACIÓN RÁPIDA

2.2.1 INTRODUCCIÓN

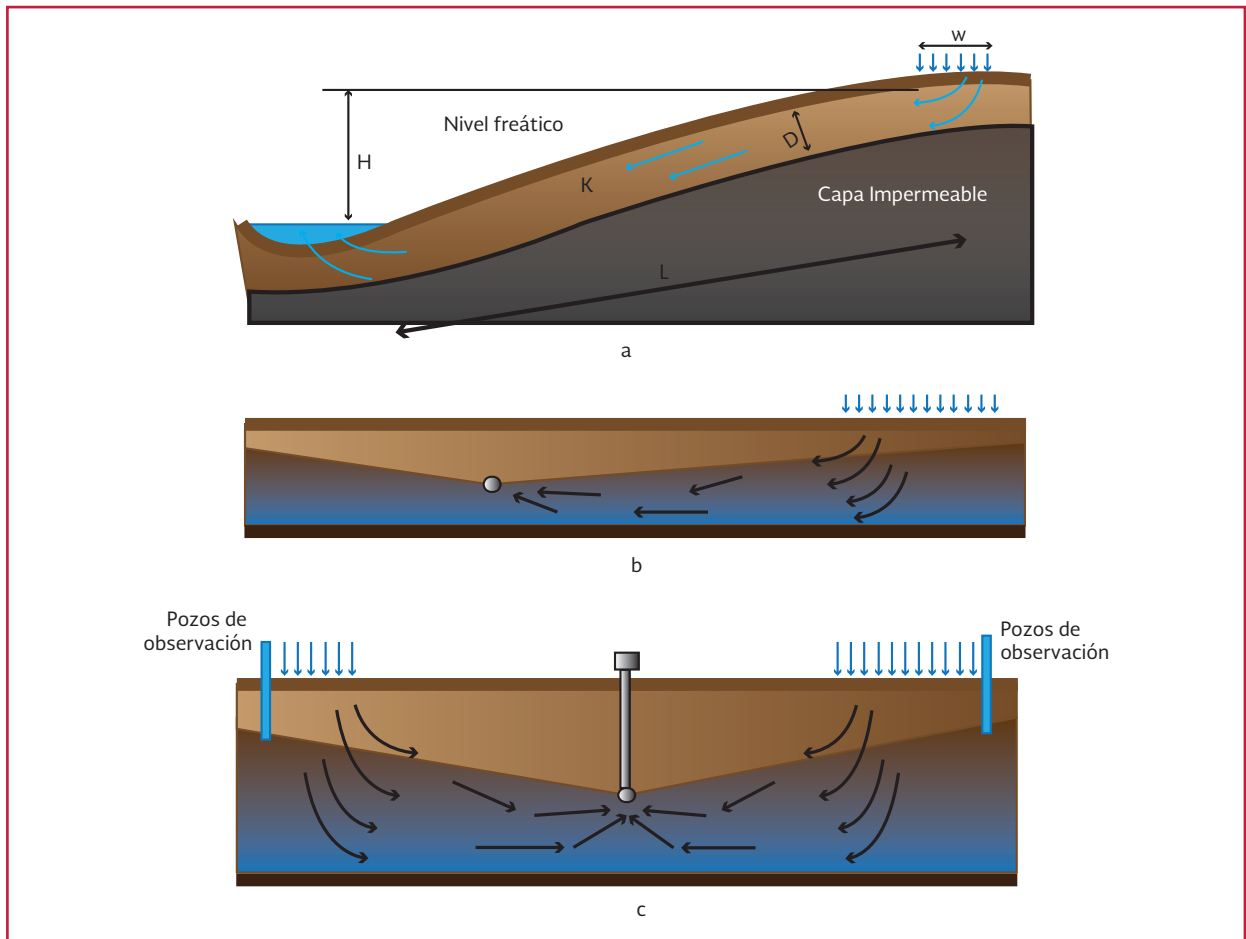
Los sistemas de infiltración rápida pueden producir agua tratada de suficiente calidad para irrigación. Sin embargo, su movimiento dentro del acuífero se debe controlar, para ello la Ilustración 2.2 muestra algunos sistemas.

El primer sistema (Ilustración 2.2a) representa la situación en la que las cuencas de infiltración rápida se localizan en sitios elevados y el agua tratada drena naturalmente hacia las corrientes u otros cuerpos superficiales, desde donde se puede utilizar nuevamente. En estos casos, el nivel del agua subterránea debe controlarse para prevenir montículos de agua. Estos sistemas también se usan en lugares donde se pretende reducir la contaminación de lagos o corrientes. En lugar de ser descargado directamente al cuerpo de agua superficial, el efluente pasa primero a través del sistema de infiltración rápida para que eventualmente drene al acuífero como agua tratada. En el segundo sistema (Ilustración 2.2b), no existe drenaje natural hacia el cuerpo receptor, pero el nivel del agua subterránea es suficientemente alto para que el agua tratada pueda ser colectada mediante drenes.

Cuando el nivel del agua subterránea es demasiado profundo no se pueden utilizar drenes subterráneos y el agua debe ser colectada a través de una serie de pozos (tercer sistema, Ilustración 2.2c). Las cuencas de infiltración se pueden colocar en dos líneas paralelas con una serie de pozos en medio de ambas. Para evitar que el agua tratada se disperse fuera del acuífero del sistema, se pueden controlar las tasas de infiltración y bombeo de los pozos, con el fin de proteger el nivel del agua subterránea en el acuífero adyacente; para ello se colocan pozos de observación en el extremo más alejado de las cuencas de infiltración y se monitorea el nivel del agua en los pozos.

Cuando el agua tratada se recolecta para reuso directo se debe aplicar un postratamiento después de la infiltración rápida, principalmente para remover compuestos orgánicos no biodegradables que pueden resultar tóxicos para el hombre. Los métodos utilizados para eliminar dichos compuestos pueden ser adsorción por carbón activado, adsorción por resinas y ósmosis inversa. Estas opciones resultarán mucho más económicas como postratamiento en los casos en que las concentraciones de carbón orgánico total son mucho menores, que como pretratamiento cuando dichas concentraciones suelen ser de hasta 20 mg/litro. Sin embargo, existen situaciones en las cuales el agua tratada se dispersa en el acuífero de manera descontrolada, posteriormente se recolecta en los pozos de recuperación y se utiliza para uso potable. En estos casos es necesario proporcionar al agua residual un pretratamiento que resultará ser una opción mucho más cara. Cuando el agua tratada se utiliza para recarga de acuíferos subterráneos no debe ser clorada. A pesar de que el sistema de

Ilustración 2.2 Sistemas de infiltración con recuperación de agua tratada



infiltración rápida puede producir efluentes de buena calidad, se requieren costosos estudios de suelo, por lo que se deben evaluar otros métodos de tratamiento con el objetivo de determinar cual representa el costo más adecuado.

2.2.2 OBJETIVOS

Los principales objetivos que se persiguen al utilizar este tratamiento son:

- Recargar el acuífero
- Recuperar el agua tratada por medio de

pozos o drenes subterráneos para su reúso posterior

- Recargar corrientes superficiales alimentadas por mantos freáticos
- Almacenamiento temporal del agua tratada en los acuíferos
- Evitar intrusión salina

2.2.3 DESCRIPCIÓN

La infiltración rápida es un tratamiento que utiliza los procesos naturales físicos, químicos y biológicos del suelo para tratar agua residual

cruda, afluentes de tratamientos primarios, secundarios o terciarios. Las tasas de aplicación son relativamente altas y el agua se percola horizontal o verticalmente desde las zonas de aplicación, que suelen ser cuencas ubicadas en suelos arenosos o de alta permeabilidad. Por cuenca se entenderá una cavidad hecha en el suelo y en la que se aplicará la infiltración.

El fondo de una cuenca puede estar cubierto por vegetación que tolere tanto condiciones húmedas como secas. Sin embargo, usualmente ésta no forma parte del sistema, ya que las tasas de aplicación son demasiado altas para que se lleve a cabo una efectiva retención de nutrientes, aunque existen situaciones en las cuales la vegetación es parte integral en la estabilización de la superficie del suelo y ayuda a mantener altas tasas de aplicación.

2.2.3.1 Textura y estructura del suelo

La estabilización de la superficie del suelo y la tasa de aplicación son particularmente importantes cuando la infiltración del agua es un factor de diseño. Los suelos se agrupan en tres tipos principales: suelos arenosos, cuya textura es granular (partículas grandes, con tamaño de entre 0.5 y 2 mm); suelos para cultivo, de textura moderadamente granular (incluye arenas finas, el tamaño del grano está en el rango de 0.1 a 0.5 mm) y, finalmente, suelos arcillosos que pueden ser de textura media (arena muy fina), moderadamente finos (arcilla y arena) y finos (arcilla y arcillo-arenoso, de 0.001 a 0.05 mm).

La estructura del suelo se refiere a la aglomeración de partículas del mismo para formar agregados de mayor tamaño. Los suelos bien estructurados con grandes huecos entre las aglomeraciones transmitirán el agua más rápidamente que aquéllos menos estructurados de la misma textura; para la infiltración se prefieren los primeros.

Los suelos de textura más fina y que están bien estructurados pueden filtrar grandes cantidades de agua. Los movimientos de la tierra y las construcciones pueden alterar o destruir la estructura del suelo y cambiar significativamente la permeabilidad natural. Para la infiltración rápida se prefieren los suelos arenosos de textura granular.

2.2.3.2 Tasa de infiltración y permeabilidad

Un material es considerado permeable si contiene poros interconectados u otra forma similar a través de la cual el agua puede fluir. La permeabilidad es una medida de la capacidad de los suelos para permitir el paso de líquidos a través de éste.

La tasa de infiltración se define como la razón a la cual el agua entra al suelo desde su superficie. Aunque la tasa de infiltración medida en un sitio particular puede disminuir con el tiempo debido al taponamiento de la superficie, la permeabilidad en la subsuperficie vertical generalmente permanece constante; como resultado, las medidas de infiltración a corto plazo se pueden utilizar como una estimación a largo plazo de la permeabilidad vertical saturada.

Tabla 2.5 Ciclos de carga sugeridos para infiltración rápida

Objetivo	Tipo de tratamiento	Estación	Periodo de inundación	Periodo de secado
			días	días
Maximizar la tasa de infiltración	Primario	Verano	1- 2	5 - 7
		Invierno	1 -2	7 - 12
	Secundario	Verano	1-3	4-5
		Invierno	1-3	5-10
Maximizar nitrificación	Primario	Verano	1- 2	5 - 7
		Invierno	1 -2	7 - 12
	Secundario	Verano	1-3	4-5
		Invierno	1-3	5-10
Maximizar remoción de nitrógeno	Primario	Verano	1- 2	10-14
		Invierno	1 -2	12-16
	Secundario	Verano	7-9	10-15
		Invierno	9-12	12-16

2.2.3.3 Porosidad

Es la relación entre los huecos y el volumen total del suelo. Se puede expresar como fracción decimal en porcentaje. La porosidad se puede definir como la cantidad máxima de agua que un suelo puede contener cuando está saturado.

2.2.3.4 Funcionamiento

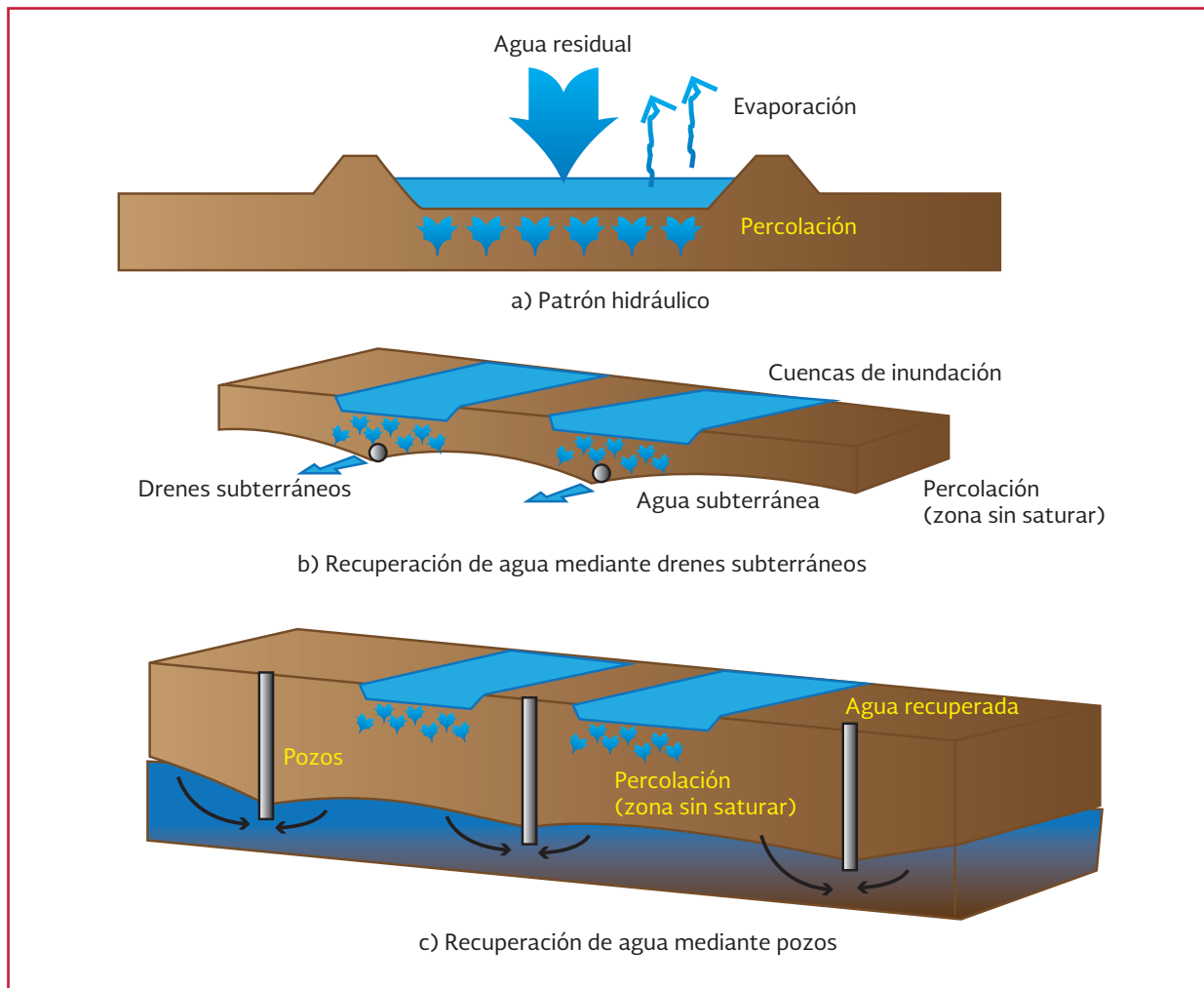
Como ya se mencionó, en este sistema el afluyente a tratar se vierte al suelo con una alta tasa de aplicación del orden de 0.1 a 3.0 m³/semana. Mientras no exista una capa en la subsuperficie que impida el flujo vertical, el agua percolada continuará su trayectoria por el subsuelo hasta que se una a un acuífero superficial. Las aplicaciones del agua se llevan a cabo por medio de aspersores o distribuyéndola de manera uniforme en áreas de infiltración relativamente pequeñas (0.1 a 0.2 hectáreas). Los diques que las separan forman cuencas no alineadas poco profundas. Las dimensiones recomendadas para la construcción de los diques son 0.6 m de ancho y 1.2 m de alto pues cuando son menos anchos se dificulta su construcción y carecen de estabilidad. Por otro lado, los diques altos incrementan el

costo de construcción, potencial de erosión y dificultan el acceso a las cuencas. En este sistema, la evaporación que se presenta en las cuencas es poca (ver Ilustración 2.3).

El sistema debe operar de manera intermitente con el fin de permitir periodos de secado que restauren las condiciones aerobias necesarias para la oxidación de materia orgánica y nitrificación del amonio adsorbido, al mismo tiempo que se recuperan las características de permeabilidad del suelo. Las condiciones anaerobias que se presentan durante los periodos de inundación tienden a reducir la porosidad del suelo; también debe existir en el perfil de éste una zona no saturada necesaria para mantener las tasas de aplicación deseadas. Solamente se necesitan 1.5 m para que se mantengan las condiciones adecuadas de no saturación; un manto freático muy profundo no es condición para que se incremente la zona de no saturación, además de que la difusión del oxígeno disminuye a más de 1 metro.

Los periodos de inundación y secado dependen de las condiciones climáticas, estación del año, características del suelo, tipo de agua residual, hidrología y otros factores. Muchas veces es neces-

Ilustración 2.3 Infiltración rápida



rio realizar pruebas locales para diseñar el mejor ciclo, aunque por lo general el líquido se aplica por periodos de aproximadamente dos semanas, seguido de una a tres de secado antes de que se vuelva a iniciar la siguiente aplicación. En la Tabla 2.5 se presentan los ciclos de carga sugeridos, dependiendo del objetivo que se desee alcanzar, tipo de agua residual y estación del año. Como se observa en la Tabla 2.6 los periodos de inundación para efluentes primarios se deben limitar de uno a dos días a pesar del objetivo o estación, con el fin de prevenir la obstrucción del suelo ocasionada por la mayor cantidad de sólidos suspendidos (SS). En cuanto a los periodos de secado, los tiempos más cortos se aplican para climas tem-

plados, mientras que para climas fríos los periodos de secado son más amplios.

El percolado obtenido por medio de la infiltración rápida puede recuperarse con ayuda de drenes subterráneos o mediante pozos; cuando se utilizan drenes, su profundidad debe ser de 1.8 m o más; generalmente, el agua obtenida es de buena calidad.

2.2.4 PRETRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

En general, el nivel de tratamiento de preaplicación tiene como objetivo asegurar el desempeño

Tabla 2.6 Número mínimo de cuencas requeridas para un flujo continuo de agua residual y aplicación de un año (Sherwood1995)

Periodo de inundación	Periodo de secado	Número mínimo de cuencas
día	día	
1	57	68
2	57	45
3	712	813
4	712	57
5	45	56
6	45	34
7	45	3
8	510	611
9	510	46
10	510	35
11	1 014	1 115
12	1 014	68
13	1 216	1 317
14	1 216	79
15	1 015	
16	1 015	
17	1 015	
18	1 216	
19	1 216	
20	1 216	

óptimo del proceso y es necesario por diversas razones, tales como:

- Mejorar el sistema de distribución
- Reducir condiciones adversas, si es necesario almacenar el agua residual
- Obtener el nivel más alto de remoción de contaminantes del agua residual
- Reducir la obstrucción de los poros del suelo
- Reducir el riesgo de impactos a la salud pública

En el caso de las aguas residuales municipales, el nivel adecuado para un tratamiento de pre-aplicación normalmente es sedimentación, que

reducirá la demanda bioquímica de oxígeno y sólidos suspendidos, pero no afectará las concentraciones de nitrógeno (N) y fósforo (P).

Un nivel equivalente de remoción de sólidos suspendidos se puede lograr mediante una laguna aireada seguida de una laguna de sedimentación, con tiempos de retención de cinco y un día, respectivamente. La ventaja que presenta este último sistema es que se evita el manejo, tratamiento y disposición de lodos. El tratamiento biológico previo sólo puede ser económicamente factible cuando la infiltración rápida se utiliza en asentamientos urbanos.

2.2.5 CUENCAS DE INFILTRACIÓN

La distribución espacial de la superficie de infiltración, también llamada cuenca de infiltración, depende tanto de la geometría del emplazamiento, como del ciclo operativo elegido. El área de infiltración debe ser dividida en varias zonas separadas, de forma que mientras unas reciben agua, las otras se encuentran en etapa de secado. El número y dimensiones de tales zonas deben calcularse de forma que siempre se disponga de suficiente superficie (si no existen sistemas de almacenamiento previo) para infiltrar el agua producida por la población servida y que el nivel de secado, en cualquier época del año, sea el previsto en todas las cuencas.

Otro factor limitante a la hora de determinar la geometría y dimensiones de las cuencas de infiltración es la situación del nivel freático y su variación anual, las cuencas de infiltración crean un domo de recarga bajo ellas, por tanto, para un correcto dimensionado del sistema es preciso tener en cuenta recomendaciones como (Metcalfe & Eddy, 1998):

1. Geometría de la cuenca
2. Caudal medio de aplicación
3. Distancia vertical mínima hasta el nivel freático
4. Distancia vertical hasta alcanzar un estrato impermeable
5. Pendiente del nivel freático
6. Conductividad hidráulica horizontal del acuífero
7. Espacio efectivo entre poros en el suelo situado por encima del nivel freático
8. Altura y distancia respecto a condiciones de contorno horizontales (arroyos, ríos o superficies de lagos)
9. Necesidades de seguimiento

En los sistemas de infiltración rápida se prefiere un mayor número de cuencas pequeñas que cuencas de mayor tamaño, ya que las primeras ofrecen mayor flexibilidad al seleccionar longitudes óptimas de los periodos de inundación y secado. En algunos casos se pueden tener cuencas como reserva, que se pueden utilizar cuando las otras estén en mantenimiento o cuando las tasas de infiltración se encuentren por debajo del promedio, por ejemplo, cuando se presentan largos periodos de lluvia y no se puede proporcionar un periodo de secado para devolver al suelo la tasa normal de infiltración.

El número de cuencas depende del ciclo de aplicación, disponibilidad de terreno y topografía del sitio, pero como mínimo se deben tener dos. El tamaño de las cuencas (ancho y largo) está controlado por las pendientes del terreno, número de cuencas deseadas, distribución del sistema hidráulico y restricciones del agua subterránea. La decisión sobre el número de cuencas que se inundarán afecta la distribución del sistema hidráulico. En la Tabla 2.6 se muestra el número mínimo de cuencas requerido para un flujo continuo de agua residual.

Cada cuenca debe tener su propio sistema de control de entrada y salida de flujo, así como una pendiente de aproximadamente 10 grados para que toda el agua pueda salir por gravedad cuando se detenga la entrada del afluente y comience el periodo de secado.

No deben existir sitios en desnivel para evitar que el agua continúe estancada y se desarrollen algas; si esto sucede, las tasas de infiltración llegarán a ser tan bajas que tomará varios días antes de que desaparezcan los últimos centímetros de agua, la recuperación de ésta será menor y el secado de toda la cuenca se llevará

a cabo en un periodo muy largo, lo cual no es recomendable.

El efecto neto de todo esto es que las áreas no drenadas en las cuencas reducirán la tasa de aplicación, ya sea por una pobre recuperación de la infiltración en los sitios a desnivel o por requerir periodos extra largos para el secado. La profundidad del agua en las cuencas de infiltración normalmente es de 0.10 a 0.60 metros. Cuando las profundidades son mayores, las tasas de infiltración normalmente se incrementan, aunque también aumenta el crecimiento de algas, lo que provoca que se generen los efectos antes mencionados. Se esperaría que cuando la profundidad del agua en la cuenca sea menor, la infiltración disminuya, sin embargo, si ésta es mayor las algas no tienen tiempo para desarrollarse. Por esta razón, una menor profundidad de agua producirá mayores tasas de infiltración que profundidades más grandes, sobre todo durante los meses de verano. En invierno las algas son mucho menos activas y se espera que las tasas de infiltración se incrementen al aumentar la profundidad del agua. Cuando se van a construir las cuencas se debe tener cuidado especial para no compactar las superficies de infiltración, ya que la permeabilidad puede variar dependiendo del contenido de humedad al momento de la compactación. De ser posible, en la construcción se debe evitar usar materiales de relleno (debe ser material poroso), porque ocasionaría que se utilice equipo de construcción que podría dañar las propiedades hidráulicas del suelo. Con base en la experiencia en la construcción de sistemas de infiltración rápida que utilizan materiales de relleno, se recomienda lo siguiente:

- Se debe hacer una prueba de inundación en una cuenca utilizando el material de relleno que se vaya a ocupar para todo el sistema. La profundidad del relleno

debe ser igual a la profundidad final o 1.5 metros, el valor que sea menor. La tasa de carga hidráulica para las áreas de relleno se basará en los resultados de estas pruebas

- Al colocar el material de relleno en el área de infiltración, el suelo debe estar seco
- El suelo areno-arcilloso con un contenido de arcilla de 10 por ciento o más no es confiable para usarse como material de relleno en las cuencas
- La secuencia de construcción en suelos secos es:
 1. Cortar o rellenar a la elevación especificada
 2. Rastrillar el fondo de las cuencas a una profundidad de 0.6 a 1 m en dos direcciones
 3. Retirar de la superficie el material apelmazado (Sherwood, 1995)

2.2.6 REMOCIÓN DE CONTAMINANTES

La remoción de contaminantes se realiza haciendo pasar el agua por el suelo y la filtración es el principal mecanismo que opera en este sistema. La carga de SS, DBO y coliformes fecales son removidos en la mayoría de los casos. En general se espera que, cuando se tratan efluentes primarios o secundarios a través de 4.5 m de suelo, la calidad del agua percolada sea la siguiente:

- DBO < 5 mg/L
- SS < 2 mg/L
- Nitrógeno total > 10 mg/L

Altas concentraciones de DBO en el afluente a tratar proporcionarán una fuente adicional de car-

bono para las bacterias denitrificantes y se puede llevar a cabo la remoción de nitrógeno del agua residual; además, estimulará la capacidad de los microorganismos para degradar compuestos orgánicos normalmente no biodegradables, si existe otro sustrato en mayor cantidad. Por otra parte, la remoción de fosfatos varía de 70 a 99 por ciento, dependiendo de las características físicas y químicas del suelo. El principal mecanismo de remoción de este contaminante es la adsorción y en menor escala, la precipitación química. Esto implica que la remoción decrecerá conforme el suelo se vaya saturando. La concentración del fósforo total debajo de las cuencas debe ser aproximadamente < 1 mg/litro. Sin embargo, no existe un tipo de suelo óptimo para llevar a cabo la remoción de contaminantes antes mencionados. Los suelos de textura fina, tales como tierras para cultivo, son muy efectivos en la remoción de DBO, nitrógeno, fósforo, SS y coliformes fecales, pero este tipo de suelo tiene la desventaja de poseer las tasas más bajas de operación y una menor capacidad de almacenaje para los sólidos. Por otro lado, los suelos arenosos o de textura más gruesa no podrán inmovilizar grandes cantidades de nitrógeno en la forma de amonio o complejos de fósforo.

La ventaja que tienen es que permiten grandes cargas de DBO y periodos de descanso más cortos después de aplicar las cargas. La remoción de coliformes fecales es muy efectiva en suelos arenosos, pero definitivamente será muy limitada en grava. Si la arena es muy gruesa, puede ser necesario activar la superficie del suelo mediante la aplicación continua de agua residual durante un periodo de tres a cinco días, lo que favorecerá el desarrollo de microorganismos en la superficie del suelo, y en consecuencia se incrementará la remoción de coliformes fecales.

2.2.7 DISTANCIA ENTRE EL PUNTO DE INFILTRACIÓN Y RECUPERACIÓN DEL AGUA TRATADA

La distancia óptima entre las cuencas de infiltración y el punto donde el agua tratada abandonará el acuífero depende de la calidad del afluente de agua residual que se descargue en el terreno, de los materiales del suelo, acuífero y requerimientos de calidad para el agua tratada. En general, la distancia del flujo subterráneo debe ser tan larga como sea posible; una distancia razonable puede ser de al menos 100 metros. El tiempo de retención del agua en el sistema subsuelo-acuífero debe ser por lo menos un mes.

Estos sistemas deben ser diseñados para que la distancia entre el fondo de la cuenca de infiltración y el manto freático, durante los periodos de inundación, no se incremente a más de 0.3 metros.

Un aumento sobre este nivel puede “regresar” el agua infiltrada y reducir la tasa de infiltración. Cuando una cuenca es drenada, el nivel del agua subterránea debe disminuir relativamente rápido a una profundidad de aproximadamente 1.2 m cuando se trata de arena y a 1.8 m en suelos más finos.

2.2.8 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En el caso específico de la infiltración rápida, cuando la superficie de las cuencas está cubierta por vegetación, existen las siguientes ventajas:

- Se mantienen las tasas de infiltración
- Se remueven los SS por filtración
- Se presenta una remoción adicional de nutrientes, si la vegetación se corta una vez al año

Al igual que cualquier otro proceso de tratamiento, también éste presenta algunas desventajas:

- Incremento en el mantenimiento de las cuencas
- Profundidades menores de inundación para evitar ahogamiento de la vegetación
- Periodos más cortos de inundación para promover el crecimiento de vegetación

2.2.9 DISEÑO

2.2.9.1 Metodología

Al igual que para cada estudio y proyecto de agua potable, alcantarillado y saneamiento, se requiere en primera instancia analizar las características de la comunidad de interés, es decir:

- Topografía
- Número actual de habitantes y proyecciones de población
- Tipo de descargas (habitacional, comercial, pública, industrial)
- Climatología
- Infraestructura existente (red de agua potable, red de alcantarillado sanitario y pluvial, líneas de corriente eléctrica, telefónica, etcétera)

Complementariamente se debe proponer un área de infiltración, para la cual se deben tener claros los siguientes aspectos:

- Uso de suelo
- Título de propiedad
- Superficie
- Características hidrogeológicas

La selección de sitios para la infiltración rápida requiere especial consideración con respecto a la topografía, tipo de suelo y uniformidad del mismo; la caracterización del perfil del suelo debe ser al menos 3 m de profundidad. Los sitios con numerosos cambios en el relieve sobre una pequeña área no son buenas opciones para la infiltración rápida. Cualquier suelo que contenga una fracción de arcilla mayor del 10 por ciento se debe excluir como opción para la construcción del sistema, sobre todo si se requiere rellenar el área para el diseño.

Los requerimientos de terreno incluyen: cuencas para infiltración, caminos de acceso, tratamiento de preaplicación y una zona de amortiguamiento o área para futuras expansiones.

Los suelos extremadamente no uniformes no son excluidos en el desarrollo del sistema, pero si se seleccionan, se incrementa significativamente el costo y la complejidad en la investigación del sitio.

Obtenida esta información, los pasos a realizar serán:

1. Determinar la tasa de infiltración y seleccionar un factor de seguridad con base en pruebas realizadas en el sitio donde se desee aplicar el tratamiento
2. Definir la trayectoria hidráulica de acuerdo al perfil del suelo e hidrología
3. Determinar los requerimientos de tratamiento
4. Seleccionar el nivel de tratamiento de preaplicación
5. Calcular la carga hidráulica anual y las cargas orgánicas para DBO y SS

6. Calcular el área de campo
7. Determinar requerimientos de almacenaje y cubierta vegetal
8. Revisar el nivel del agua subterránea
9. Seleccionar el ciclo de carga hidráulica final
10. Determinar la tasa de aplicación
11. Determinar el número de cuencas
12. Determinar la remoción de nitrógeno, fósforo, DBO, etcétera
13. Distribución del agua
14. Determinar los requerimientos de monitoreo
15. Calcular la descarga (agua subterránea) y recuperación (agua superficial)

2.2.9.2 Diseño hidráulico

El área de aplicación puede determinarse mediante la ecuación:

$$A = \frac{CQ_m 365}{Lw} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

donde:

- A = Superficie de aplicación (ha)
- C = Factor de conversión = 10^{-4} ha/m²
- Q_m = Caudal medio de agua residual (m³/día)
- L_w = Tasa anual de aplicación (m³/año)

Esta ecuación no considera los requerimientos de terreno para la construcción de diques que separen las cuencas y caminos de acceso. Finalmente, el clima no es un factor para el diseño.

En lo referente al transporte del agua, ésta puede conducirse hasta las cuencas de infiltración por medio de tubería o canales abiertos; las salidas en ambos casos pueden ser a través de válvulas; que deben dimensionarse adecuadamente para que las pérdidas de carga hidráulica sean poco significativas. Posteriormente, el sistema de distribución repartirá agua a una tasa que permita

que las cuencas se inundan de manera constante a una profundidad relativamente uniforme durante todo el periodo de aplicación. Esto se puede controlar desde la conducción que alimenta la cuenca.

La capacidad del sistema de distribución se define considerando los requerimientos de caudal máximo y de área de campo. Esta capacidad se calcula mediante:

$$Q = \frac{CAD}{FH} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

donde:

- Q = capacidad de descarga (L/s)
- C = constante igual a 28.1
- A = área de campo (hectáreas)
- D = profundidad de aplicación (cm)
- F = número de días del ciclo completo (días)
- H = número de horas de operación (horas)

La capacidad del sistema es útil para determinar el tamaño de la conducción principal, la capacidad de los equipos de bombeo, los requerimientos de almacenamiento y el tiempo de operación.

2.2.9.3 Tasa de carga hidráulica

El diseño para un sistema de infiltración rápida está limitado por las características hidráulicas del perfil del suelo, ya que se deben aplicar grandes volúmenes de agua en áreas relativamente pequeñas. También se debe considerar la tasa de carga hidráulica por ciclo, capacidad de infiltración del suelo, ciclos de inundación, secado y permeabilidad del subsuelo.

La tasa potencial de infiltración es aquélla a la cual se esperaría que el agua residual se infiltre en el suelo durante un determinado periodo. Para calcularla, es necesario considerar la naturaleza cíclica de las cargas hidráulicas en el

sistema, la variabilidad normal de las condiciones del sitio y las limitaciones de las pruebas de campo, sobre todo a pequeña escala. Un pequeño porcentaje de la tasa potencial de infiltración se usa para propósitos de diseño y para calcular la tasa de carga hidráulica anual.

Si se llevan a cabo pruebas de infiltración en las cuencas, el factor de seguridad para la carga hidráulica puede estar en el rango de 7 a 15 por ciento. Se utilizan los valores de 7 a 10 por ciento cuando las características del sitio y los resultados de las pruebas presentan variaciones; cuando éstas son pocas, el rango recomendado es de 10 a 15 por ciento. La selección de un factor específico depende del número y tipo de medidas de campo, así como de la variabilidad o uniformidad de las condiciones del suelo. Cuando se realiza un gran número de pruebas de campo, los resultados no varían ampliamente y las condiciones del sitio son uniformes, se pueden utilizar mayores factores de seguridad.

En general, la carga hidráulica media es de 0.02 a 0.3 m³/(día m²) dependiendo de las características del suelo, que equivale a requerimientos de terreno de 288 a 4 320 m² por cada L/s de gasto medio.

2.2.9.4 Tasa de carga orgánica

La carga orgánica se encuentra en el rango de 2.2 a 11.2 g DBO/(día m²). Para aguas residuales municipales esta limitación de carga orgánica reduce en la práctica la aplicación de carga hidráulica a un rango de 0.02 a 0.08 m³/(día m²) equivalentes a requerimientos de área de 1 080 a 4 320 m² por cada L/s de gasto medio. En el caso de efluentes secundarios, la restricción

de carga orgánica resulta en requerimientos de terreno de 200 a 400 m² por cada L/s de gasto medio.

Las experiencias con aguas residuales de industrias vinícolas han mostrado que las tasas de carga de DBO superiores a 670 kg/ha pueden presentar problemas de olores. Un efluente primario con aplicación de 8 cm/día y con un nivel de DBO de 150 mg/L, puede generar 120 kg/(ha d) de carga de DBO, que no crea problemas de olores.

2.2.10 EJEMPLO DE DISEÑO

El objetivo es determinar las tasas de carga hidráulica y de aplicación para un sistema de infiltración rápida que utiliza un efluente primario. El diseño pretende maximizar la tasa de infiltración. De las pruebas de inundación en la cuenca se obtuvo una tasa de 4 cm/hora.

1. Si el perfil del suelo fuera uniforme y no existieran condiciones de taponamiento, esta sería la tasa potencial de infiltración anual a la cual el agua puede infiltrarse continuamente durante todo un año en una cuenca. Debido a que esto no ocurre, es necesario utilizar un factor de seguridad para el diseño.

$$\frac{\left(4 \frac{cm}{h}\right)\left(24 \frac{h}{d}\right)\left(365 \frac{d}{año}\right)}{(100cm/m)} = 350.4 \frac{m}{año}$$

2. Cálculo de la tasa de aplicación anual para el diseño. Como los resultados de las pruebas fueron variables, el rango apropiado para el factor de seguridad es de 7 a 10 por ciento. Se selecciona el

punto medio del rango como valor para el cálculo, esto es 8.5 por ciento.

$$L_w = (0.085) \left(350.4 \frac{m}{año} \right) = 29.78 \frac{m}{año}$$

Este valor es la cantidad de agua que se puede aplicar al sitio durante un año si no hay restricciones estacionales, de mantenimiento, o ciclos especiales que incluyan inundaciones muy cortas seguidas por periodos de secado muy largos. Si las cuencas no operan durante todo el año es necesario reducir proporcionalmente la tasa de aplicación anual

3. Determinación de la tasa de aplicación. Como se pretende maximizar la tasa de infiltración, se selecciona un ciclo de carga de dos días de inundación y 12 días de secado, correspondientes a las condiciones de invierno (Tabla 2.5)

$$\frac{\text{Tasa de aplicación por ciclo}}{\text{ciclos por año}} = \frac{\text{tasa de aplicación anual para el diseño}}{\text{ciclos por año}}$$

$$\text{ciclos por año} = \frac{365 \frac{d}{año}}{14 \frac{d}{ciclo}} = 26 \frac{ciclos}{año}$$

Tasa de aplicación diaria:

$$\frac{29.78 \frac{m}{año}}{26 \frac{ciclos}{año}} = 1.145 \frac{m}{ciclo}$$

Tasa de aplicación diaria:

$$\frac{1.145 \frac{m}{ciclo}}{2 \frac{d}{ciclo}} = 0.572 \frac{m}{d}$$

El valor de 0.572 m/día es el promedio de aplicación diaria durante los dos días de inundación

al comienzo de cada ciclo. Esta tasa es menor que la proporcionada por las pruebas:

$$\frac{4 \frac{cm}{h} \left(24 \frac{h}{d} \right)}{100 \frac{cm}{m}} = 0.96 \frac{m}{d}$$

Lo que quiere decir que el agua aplicada se infiltrará tan pronto como se completen los dos días de inundación, dejando los 12 días de secado para que se restablezcan las condiciones del suelo. Después de un largo periodo de operación se puede presentar obstrucción en los poros del suelo y eventualmente se requerirá mantenimiento. Suponiendo que durante el segundo día de aplicación la tasa de infiltración medida (0.96 m/día) se reduzca en 25 por ciento, se calcula el tiempo total requerido para que se infiltre el agua aplicada.

Si el tiempo total del ciclo es de 14 días (dos de inundación y 12 de secado), el tiempo calculado permite tener 11 días para el secado del suelo.

2.2.11 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los sistemas de infiltración rápida instalados en climas fríos pueden operar alrededor de un año en forma exitosa. Es esencial la protección térmica adecuada para la tubería, válvulas y estaciones de bombeo. La formación de hielo dentro o sobre la superficie del suelo constituye el principal problema a evitar. Las precauciones que se deben tomar son las siguientes:

- Se deben combinar una aplicación superficial entre crestas, surcos y una delgada película de hielo “flotante” que proporciona protección térmica al suelo y descansa so-

bre la parte superior de las crestas a medida que el agua residual se infiltra en los surcos

- Incorporar “cerchas” de nieve en las cuencas, seguidas por la inundación abajo de la capa de nieve
- Diseñar una o más cuencas para carga continua durante condiciones extremas. Estas cuencas deben tener un largo periodo de descanso durante el siguiente verano
- Retener el calor disponible en el agua residual usando un tratamiento de preaplicación

En estos climas se recomienda tratar de anticipar las disminuciones bruscas de temperatura y evitar que haya residuos de agua en el suelo justo cuando desciende la temperatura. Si esto no es posible, es mejor continuar con la aplicación para mantener condiciones húmedas. La capa de hielo que se forme flotará y proporcionará algo de aislamiento que prevendrá una pérdida excesiva de calor del agua residual que está entrando. La calidad del percolado se deteriora durante los periodos fríos, pero no en forma crítica; si este deterioro no es aceptable, se necesitará almacenamiento para el agua residual. Los requerimientos de volumen se relacionan con la frecuencia y duración de dichos periodos. Es esencial que las cuencas sean operadas de ma-

nera intermitente. La longitud de secado para cada una de ellas debe registrarse en cada ciclo. Un incremento en el tiempo requerido para el secado puede ser un indicador de la necesidad de mantenimiento.

Si la superficie de infiltración se mantiene sin vegetación será necesario que antes de cada aplicación se remueva y afloje la tierra para evitar taponamiento de los poros, dispersar los sólidos y evitar que se forme una capa impermeable. El movimiento de equipo dentro de las cuencas debe ser mínimo y de ser necesario, solamente se hará cuando el suelo esté seco. Se debe remover cualquier capa gruesa de desecho o material orgánico que se encuentre sobre la superficie. Si existe vegetación en la cuenca, deber ser cortada al menos una vez por año, preferentemente antes del invierno. Se debe llevar a cabo un monitoreo que proporcione datos para el manejo o ajuste del sistema y al mismo tiempo comprobar cumplimiento de los requerimientos regulatorios. El monitoreo debe abarcar tanto el agua residual aplicada como la calidad y niveles del agua subterránea. La mejor localización para obtener muestras representativas usualmente se determina a partir de los datos colectados durante la investigación del sitio (Sherwood, 1995).



3

SISTEMAS DE APLICACIÓN SUBSUPERFICIAL AL TERRENO

En los sistemas de aplicación subsuperficial, el agua a tratar se somete a un tratamiento previo, normalmente en una fosa séptica o tanque Imhoff, para posteriormente aplicarla al terreno por debajo de su superficie. Se pretende lograr el tratamiento de las aguas residuales mediante el conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren mientras las aguas discurren a través del terreno. Su campo habitual de aplicación es el tratamiento de las aguas residuales generadas en aglomeraciones urbanas de tamaño muy reducido. La capacidad de infiltración del terreno es el parámetro clave para dimensionar este tipo de sistemas de tratamiento. Se descartan aquéllos suelos de naturaleza excesivamente permeable o impermeable. Como tratamiento previo, las aguas pueden someterse a un cribado y sedimentación, dependiendo el caso.

La aplicación del agua residual al suelo se realiza de forma intermitente para permitir la necesaria aireación del terreno, imprescindible para la degradación bacteriana vía aerobia.

Dentro de los sistemas de tratamiento mediante aplicación subsuperficial de las aguas residuales destacan las zanjas filtrantes, los lechos filtrantes y los pozos filtrantes. Dentro de estos

sistemas también están los filtros intermitentes de arena de los cuales se habló en el capítulo uno.

En el tratamiento de las aguas residuales mediante aplicación subsuperficial, confluyen operaciones de separación física de contaminantes, así como procesos de degradación de la materia orgánica, conjuntamente con la conversión de componentes inorgánicos (nutrientes).

Aunque no es una regla, un esquema de tratamiento puede estar compuesto de las siguientes unidades: rejillas, fosa séptica y el propio sistema de aplicación subsuperficial. Dependiendo el caso, un tanque Imhoff o hasta un reactor anaerobio de flujo ascendente pudiera sustituir a la fosa séptica.

3.1 ZANJAS FILTRANTES

El agua a tratar se distribuye subterráneamente a través de tuberías de drenaje, que se disponen en zanjas de profundidad inferior a 1 m y de anchura comprendida entre 0.4 a 0.8 metros; las tuberías de reparto se recubren con grava y en la parte inferior se dispone un lecho de arena

(Ilustración 3.1). La superficie de infiltración está constituida por el fondo de las zanjas, pero ante posibles obstrucciones, también las paredes verticales pueden contribuir a la infiltración de las aguas a tratar.

$$A = \frac{Q_a}{T_i} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

- A = Superficie de infiltración (m²)
- Q_a = Gasto de aporte, en L/d
- T_i = Tasa de infiltración, en L/(m² d)

3.1.1 DISEÑO HIDRÁULICO

3.1.1.1 Consideraciones iniciales

En suelos relativamente impermeables con tiempos de infiltración mayores a 5 cm/hora, de descenso del nivel de agua o tasa de infiltración menor a 37 L/(m² d).

Cuando las aguas residuales domésticas contienen residuos orgánicos provenientes de cocinas y lavado de ropa, será necesario ampliar la superficie de infiltración en un 20 por ciento por cada uno de los tipos de descargas.

3.1.1.2 Estimación de la superficie de infiltración

En el caso de aguas residuales domésticas que no incluyen residuos de cocina ni aguas grises, la superficie de infiltración se calcula para la tasa de infiltración y el gasto de descarga.

3.1.1.3 Material filtrante

El material de filtración estará compuesto por arena limpia de tamaño efectivo entre 0.4 a 0.6 mm y coeficiente de uniformidad no mayor a cuatro. En casos donde la tasa de infiltración sea menor a 50 L/(m² d) deberá emplearse arena de tamaño efectivo no menor a 0.25 milímetros.

Ilustración 3.1 Esquema de una zanja filtrante

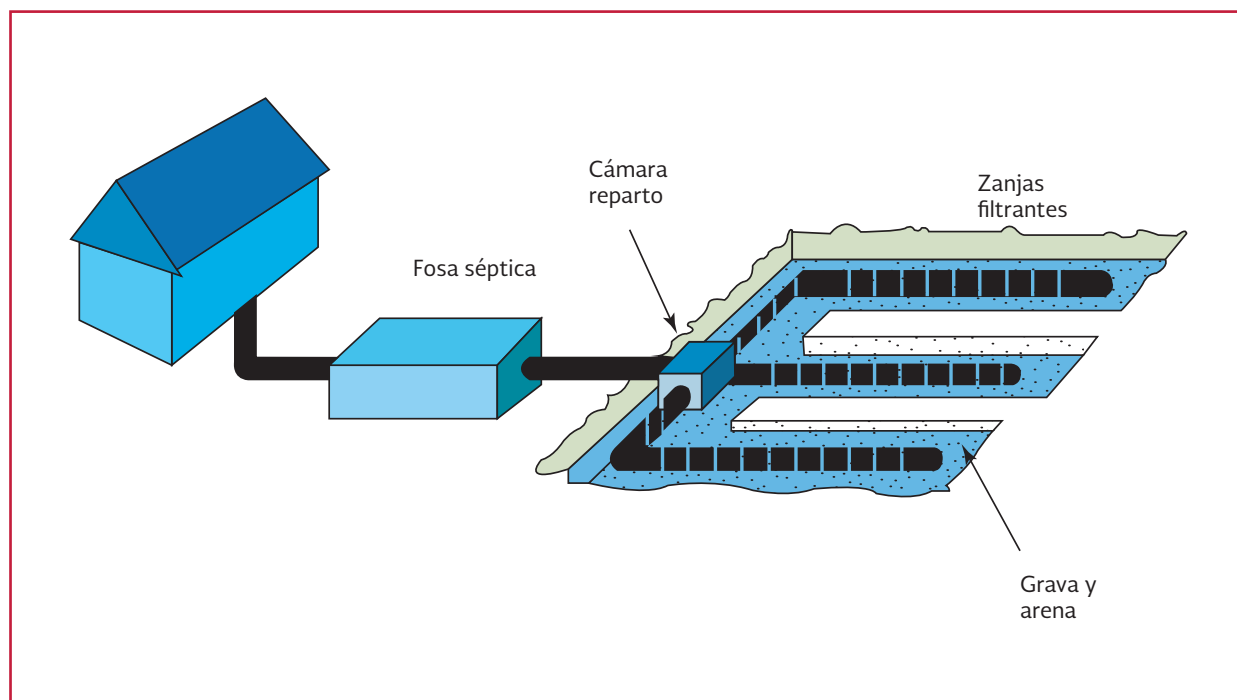


Tabla 3.1 Distancia mínima desde la zanja

Instalación	Distancia mínima (m)
Viviendas	5.00
Tuberías de agua potable	15.00
Pozos de abastecimiento	30.00
Cauces superficiales de agua (ríos, arroyos, etc)	15.00
Arboles	3.00

3.1.1.4 Dimensiones de la zanja

La Tabla 3.1 es una referencia de la distancia mínima entre la zanja y otras instalaciones.

Cuando se dispongan de dos o más zanjas filtrantes en paralelo, se deberá garantizar que la fosa séptica distribuya de forma uniforme el caudal a cada tubería de distribución.

La longitud de la zanja filtro se determinará mediante la división de la superficie de infiltración calculada con la Ecuación 3.1 entre el ancho disponible para la instalación.

La longitud máxima deseable de cada zanja filtrante será de 20 metros; en casos justificados se permiten longitudes hasta de 30 metros.

La tubería de distribución y recolección está conformada por tubos de PVC, asbesto cemento de al menos 100 mm (4") de diámetro, 20 m de longitud y espaciados entre ellos 2.5 metros como máximo. Complementariamente se deben perforar barrenos (drenos) de 13 mm de diámetro espaciados 0.10 m en cada tubo (ver Ilustración 3.2).

En el fondo de la zanja se acomoda una capa de grava limpia de 0.05 m de espesor constituida

Ilustración 3.2 Tubería con barrenos para zanjas



por material con granulometría entre 2.0 y 5.0 centímetros. Sobre ella se ubica la tubería de distribución y se le cubre totalmente con la misma grava. Encima de la grava gruesa se coloca una capa de grava fina de 0.10 m de espesor y granulometría de 0.5 a 2.0 centímetros. La Ilustración 3.3 muestra una vista de la zanja totalmente cubierta.

Sobre la capa de grava fina se acomoda el material filtrante (arena limpia) en una capa de 0.75 m de espesor. Sobre la capa de arena se coloca nuevamente una capa de grava fina de 0.10 m de espesor y granulometría de 0.5 a 2.0 centímetros. A continuación se acomoda la tubería de distribución del agua residual proveniente del tanque séptico y se le cubre totalmente con grava fina hasta 0.05 m por encima de ella. Sobre la última capa de grava fina y a fin de evitar la alteración de la capacidad filtrante del mismo, se coloca una capa de material permeable que facilite la evapotranspiración del agua residual aplicada en la zanja.

Sobre este material se coloca el material de relleno hasta alcanzar el nivel natural del suelo; se debe evitar compactar este material para no afectar la cama de grava y considerar la formación de un camellón para compensar el hundimiento del terreno causado por el asentamiento natural del mismo. La profundidad de las zanjas esta en función de la topografía del terreno y no debe ser menor a 1.5 metros.

El ancho de las zanjas puede variar entre un mínimo de 0.45 m y un máximo de 1.50 metros.

La pendiente mínima de las tuberías de distribución y recolección será de 1.5 por ciento con un valor máximo de 3.0 por ciento. En ningún caso debe exceder el 4.5 por ciento.

La Tabla 3.2 presenta un resumen de las recomendaciones para el diseño de las zanjas filtrantes y la Ilustración 3.4 muestra sus características básicas.

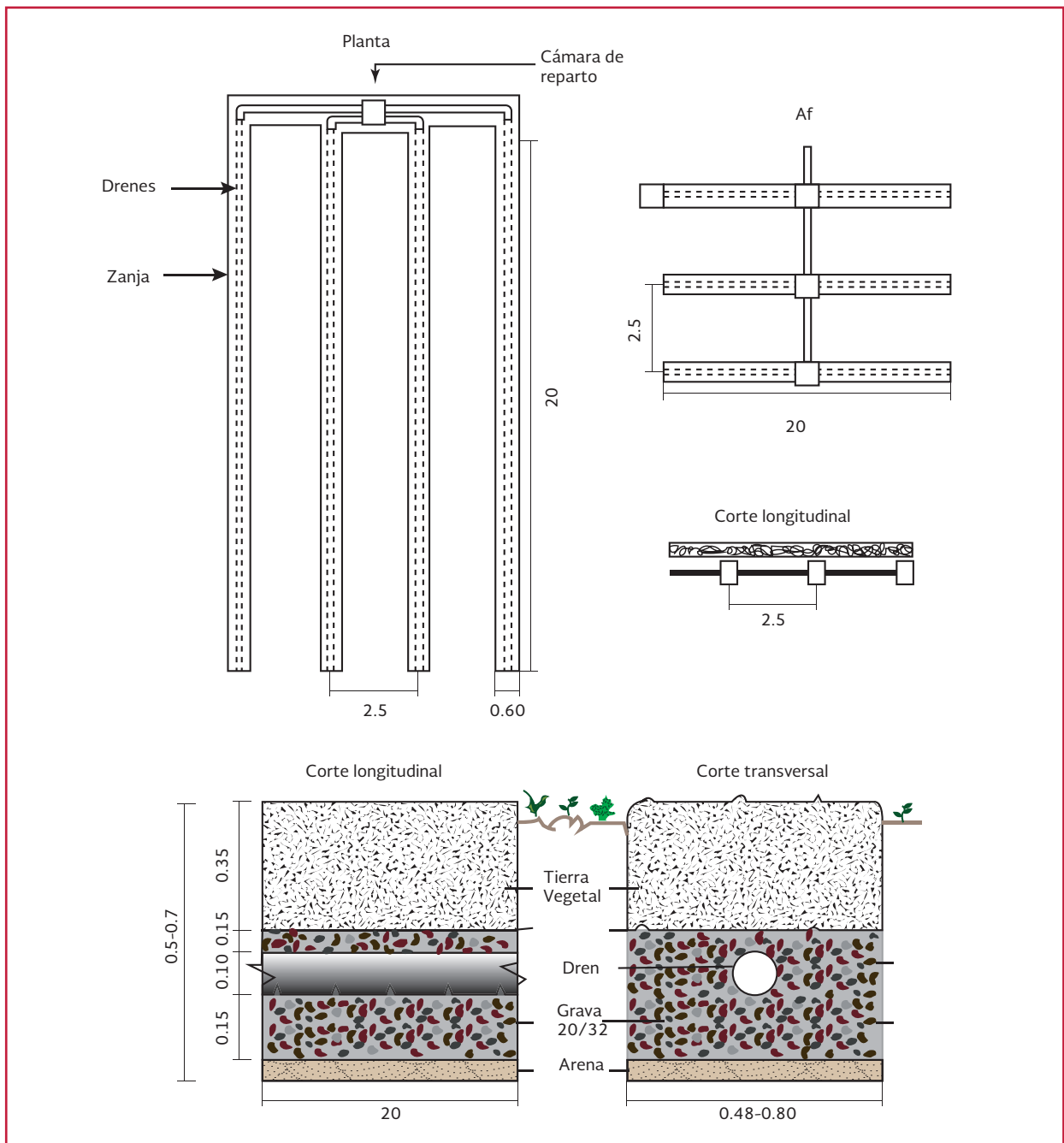
Ilustración 3.3 Ejemplo de zanjas filtrantes



Tabla 3.2 Recomendaciones para el diseño de las zanjas y lechos filtrantes

Parámetro	Unidades	Valor recomendado
Carga hidráulica	m ³ /(m ² d)	0.02 a 0.05
Profundidad de las zanjas	m	0.50 a 1.50
Ancho de las zanjas	m	0.45 a 1.50
Largo de la zanja	m	< 20
Separación entre ejes de zanjas	m	1.0 a 2.5
Separación del fondo al nivel freático	m	> 0.60
Espesor de la cobertura	m	> 0.15

Ilustración 3.4 Características constructivas de las zanjas filtrantes (acotaciones en metros)



3.2 LECHOS FILTRANTES

En este caso la superficie de filtración es más ancha (0.9 a 2 m) y da lugar a lechos de grava que se alimentan mediante varias tuberías perforadas (Ilustración 3.5). Con esta disposición la superficie filtrante está constituida únicamente por el fondo del lecho y si bien estas zanjas pueden ser más sensibles a las obstrucciones que las filtrantes, presentan la ventaja de una menor necesidad de superficie para su implantación.

Dentro de la modalidad de los lechos filtrantes pueden englobarse los sistemas de riego subterráneo, en los que se emplean tuberías enterradas (aproximadamente unos 20 cm), que cuentan con goteros especiales para minimizar los problemas de obstrucción (Ilustración 3.6). En el medio urbano puede implementarse un lecho filtrante para el tratamiento de aguas residuales de unidades habitacionales o centros comerciales (Ilustración 3.7), siempre y cuando las descargas cumplan con las especificaciones presentadas en el apartado 3.1.1.4 y lo permitan las características del suelo.

3.2.1 DISEÑO HIDRÁULICO

El diseño hidráulico se realiza de forma similar al de una zanja filtrante, es decir, el gasto de descarga se calcula por medio de la Ecuación 3.1, respetando las dimensiones mínimas del lecho a otras instalaciones, tomando en consideración las recomendaciones de la Tabla 3.2 así como las características del material filtrante.

3.2.1.1 Dimensiones del lecho

La longitud máxima deseable del lecho filtrante será de 30 metros. Las especificaciones del apartado 3.1.1.4 para la tubería de distribución y recolección también son aplicables a lechos filtrantes.

En el fondo del lecho se acomoda una capa de grava limpia de 0.05 m de espesor constituida por material con granulometría entre 2.0 a 5.0 centímetros. Sobre ella se acomoda el material filtrante (arena limpia) en una capa de 0.75 m de espesor. Sobre la última capa de grava fina y a fin de evitar la alteración de la capacidad filtrante del mismo, se coloca una capa de material permeable que facilite la evapotranspiración del agua residual.

Sobre este material se coloca el material de relleno hasta alcanzar el nivel natural del suelo. Se debe evitar compactar el material de relleno para no afectar la cama de grava y considerar la formación de un camellón para compensar el hundimiento del terreno causado por el asentamiento natural del mismo. La profundidad del lecho estará en función de la topografía del terreno y no deberán ser menor a 0.70 metros. El ancho de los lechos deberá ser mayor a 2.50 metros. La pendiente mínima de las tuberías de distribución y recolección será de 1.5 por ciento con un valor máximo de 3.0 por ciento. En ningún caso debe exceder el 4.5 por ciento. La Tabla 3.3 presenta el resumen de las recomendaciones para el diseño de lechos filtrantes y la Ilustración 3.8 muestra sus características básicas.

Ilustración 3.5 Esquema de un lecho filtrante

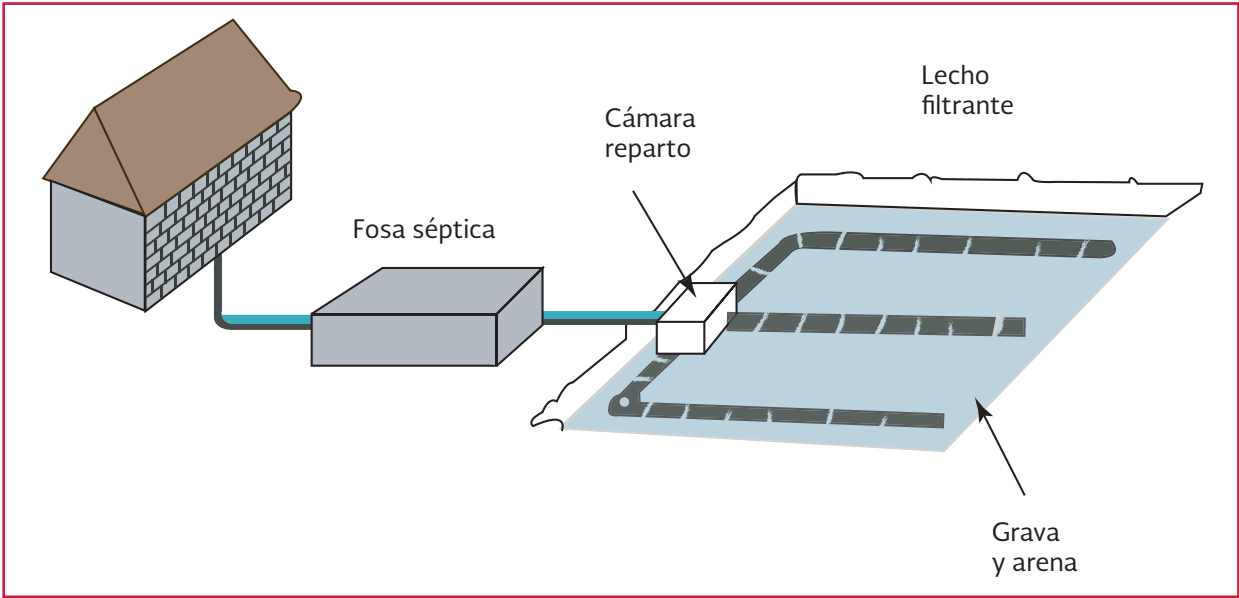


Ilustración 3.6 Ejemplo de un sistema de riego subterráneo



Ilustración 3.7 Ejemplo de lecho filtrante en el medio urbano

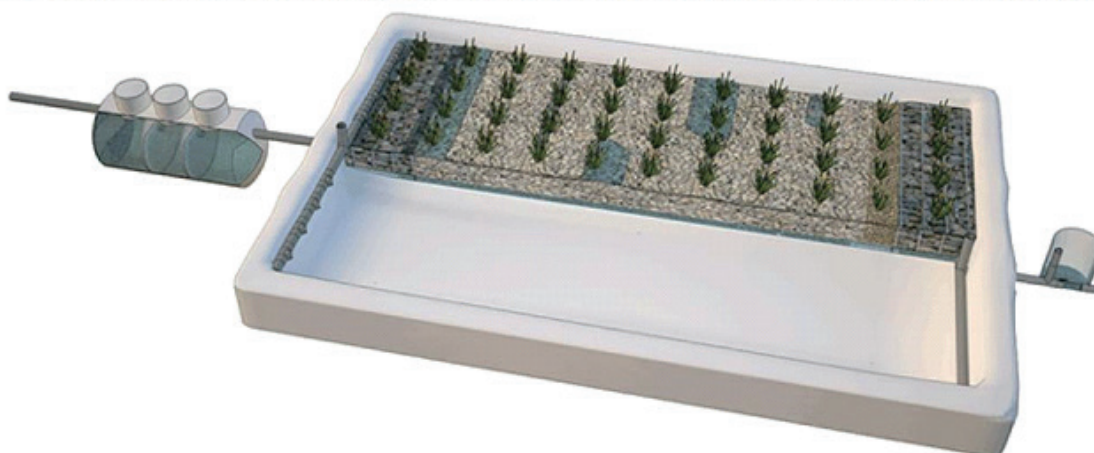
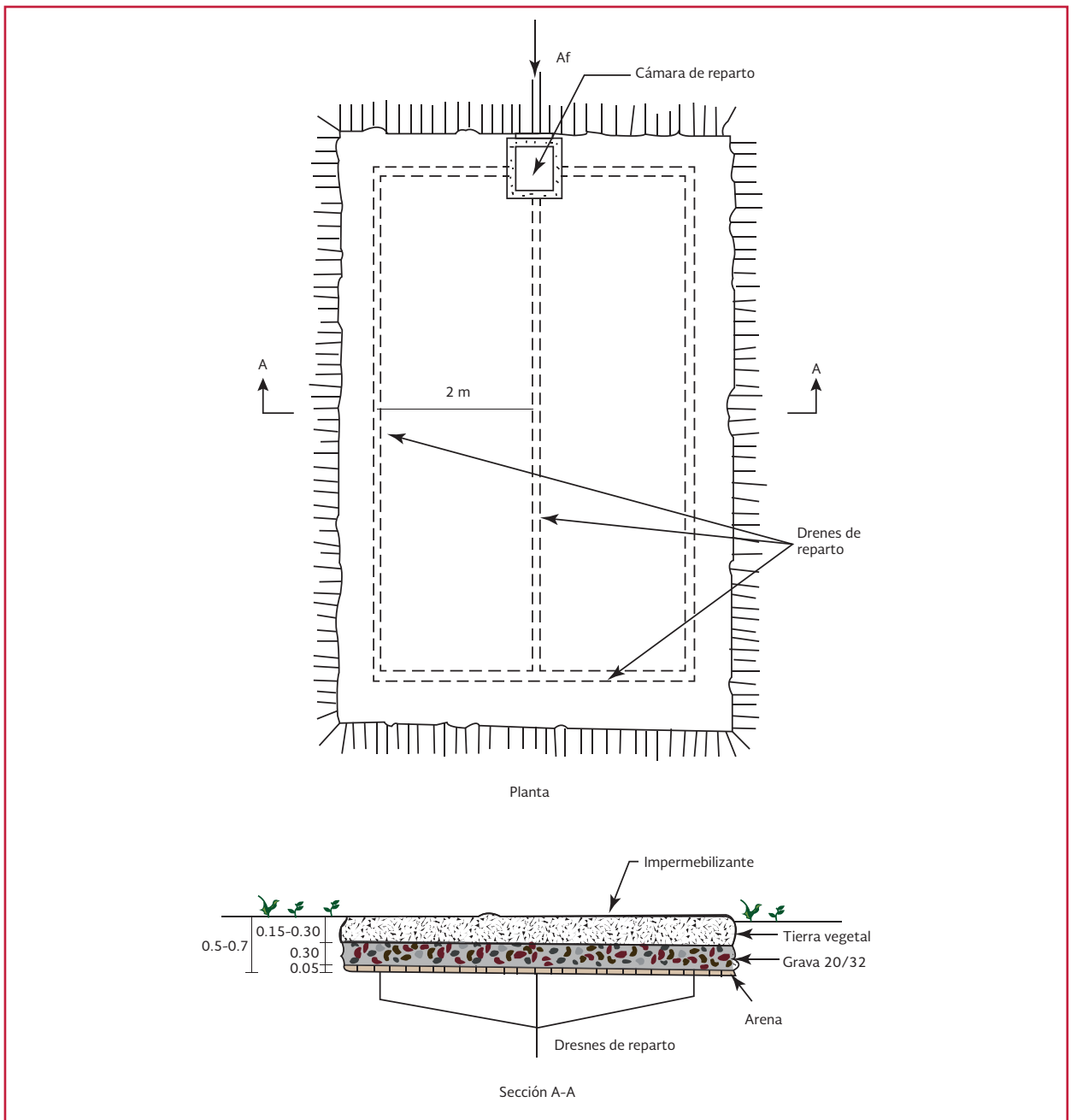


Tabla 3.3 Recomendaciones para el diseño de lechos filtrantes

Parámetro	Unidades	Valor recomendado
Carga hidráulica	$m^3/(m^2 d)$	0.02 a 0.05
Profundidad del lecho	m	0.50 a 0.70
Ancho del lecho	m	> 2.50
Largo del lecho	m	< 30
Numero de tuberías por lecho	número	> 2
Separación del fondo al nivel freático	m	> 0.60
Espesor de la cobertura	m	> 0.15

Ilustración 3.8 Características constructivas de un lecho filtrante



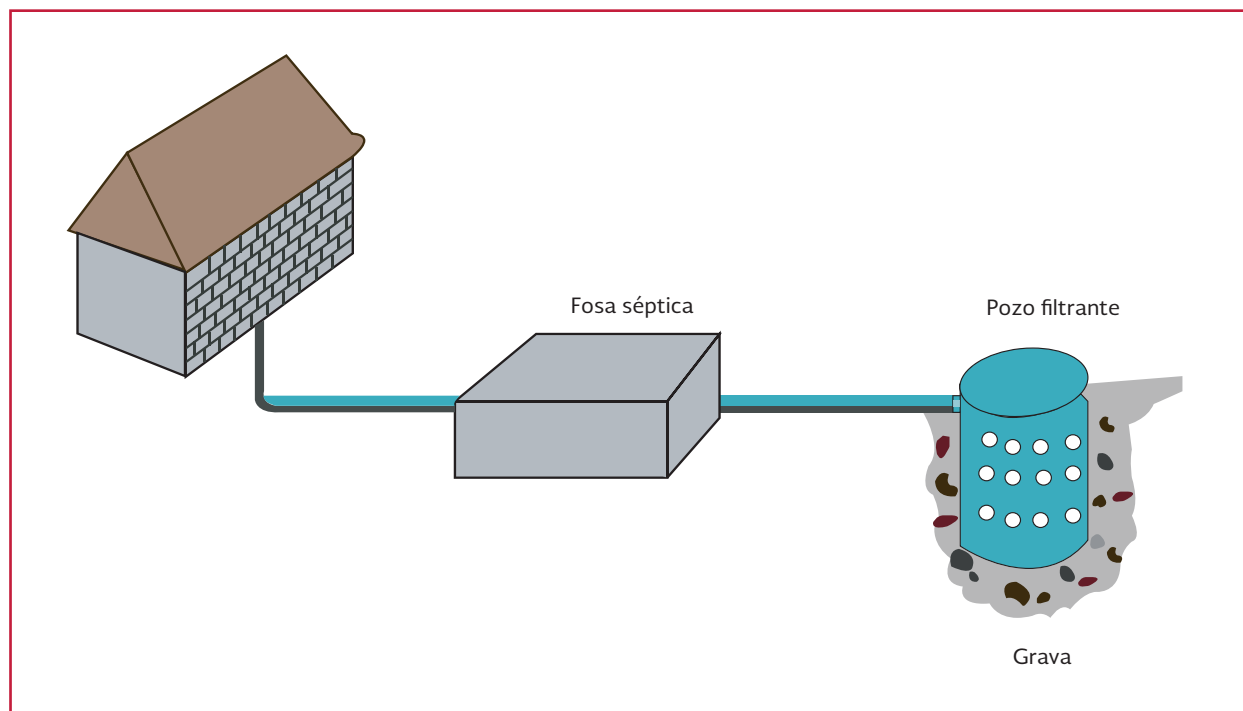
3.3 POZOS FILTRANTES

Cuando el nivel freático es profundo (mayor a 4 metros), es factible la construcción de pozos, que tiene la peculiaridad de que la superficie vertical filtrante es mucho mayor que la horizontal, por tanto este tipo de sistema precisa una menor superficie para su implantación con respecto a las zanjas y a los lechos filtrantes (ver Ilustración 3.9).

3.3.1 DISEÑO HIDRÁULICO

El pozo filtrante se construye a base de anillos de concreto (Ilustración 3.10) y fondo expuesto a el terreno natural. Debido a condiciones de estabilidad estructural, no se recomienda construirlos con mampostería, ya que los empujes del suelo podrían poner en riesgo la integridad de los pozos.

Ilustración 3.9 Esquema de un pozo filtrante



3.3.1.1 Material filtrante

En el apartado 3.1.1.3, se presentan las características que debe cumplir el material de filtración.

3.3.1.2 Dimensiones del pozo

La Tabla 3.4 especifica la distancia mínima del pozo a otras instalaciones. Debido a la profundidad que puede alcanzar un pozo, el diámetro puede estar sujeto a las dimensiones de los anillos prefabricados que existen en el mercado, y que van desde 1 hasta 2.5 metros. El cálculo depende de la tasa de infiltración y el volumen que puede almacenar el pozo y que a su vez está en función de la profundidad máxima del mismo. En el fondo del pozo se acomodará una capa de grava limpia de 0.30 m de espesor constituida por material con gra-

Ilustración 3.10 Anillos de concreto para pozos



nulometría entre 2.0 a 5.0 centímetros. Sobre ella se acomoda el material filtrante (arena limpia) en una capa de 0.75 m de espesor. La profundidad del lecho estará en función de la topografía del terreno y del nivel freático, en la parte superior, se coloca una tapa para evitar

accidentes, presencia de malos olores y proliferación de plagas.

La Tabla 3.5 presenta las principales recomendaciones para el diseño de pozos filtrantes. y la Ilustración 3.11 muestra sus características básicas.

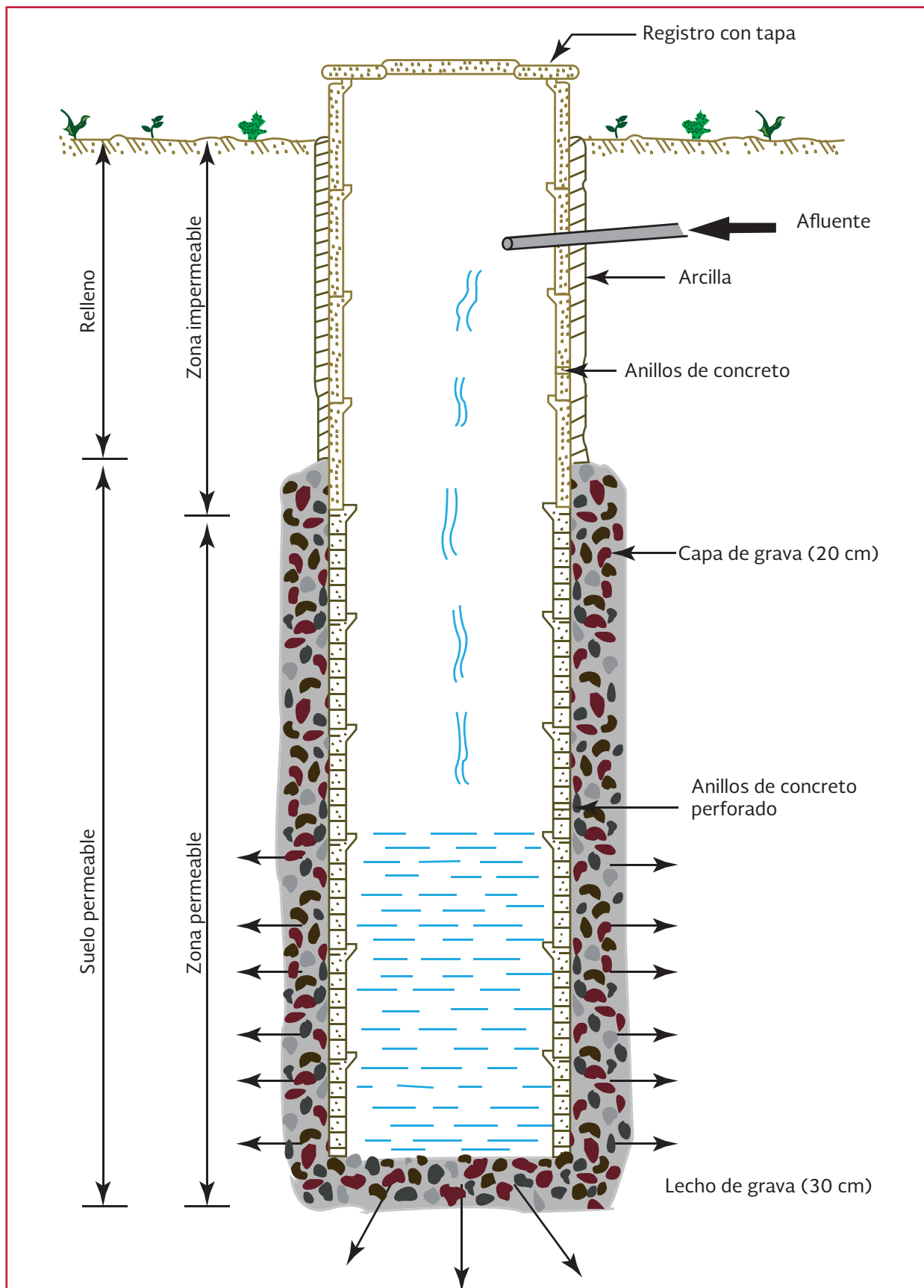
Tabla 3.4 Distancia mínima desde el pozo

Instalación	Distancia mínima (m)
Viviendas	5.00
Tuberías de agua potable	15.00
Pozos de abastecimiento	50.00
Cauces superficiales de agua (ríos, arroyos, etc)	15.00
Árboles	3.00

Tabla 3.5 Recomendaciones para el diseño de pozos filtrantes

Parámetro	Unidades	Valor recomendado
Carga hidráulica	m ³ /(m ² d)	0.025 a 0.05
Profundidad del pozo	m	3.0 a 6.0
Diámetro del pozo	m	1 a 3.5
Separación del fondo al nivel freático	m	> 1.20
Separación entre ejes de pozos	m	> 4 φ

Ilustración 3.11 Características constructivas de un pozo filtrante



4

DISPOSICIÓN DE AGUA TRATADA

4.1 RIEGO SUPERFICIAL

4.1.1 INTRODUCCIÓN

El riego superficial es el uso más extendido, además de que se considera como un tratamiento adicional del agua, ya que el suelo es un medio de tratamiento de alta eficacia. A medida que el agua se infiltra en el terreno, se inicia un proceso de tratamiento natural que fue discutido en capítulos anteriores.

A continuación se presenta las diferencias entre un agua residual y un agua "no contaminada":

- Agua residual: aporta abundantes cantidades de nutrientes, pero conlleva riesgos sanitarios, con posible contaminación de acuíferos
- Agua no contaminada: No representa ningún riesgo sanitario a la población ni al ambiente, además el aporte de nutrientes es escaso

Los efluentes utilizados para riego proceden de colectividades urbanas e incluyen aguas domésticas y procedentes de industrias que se han sometido a tratamiento conforme a la normatividad aplicable. Las aguas residuales brutas no suelen utilizarse para riego de especies de con-

sumo, aunque sí para riego de especies arbóreas con finalidad de producción forestal.

Se entiende por reúso agrícola directo, al riego con aguas residuales tratadas para cultivos destinados a consumo humano. El reúso indirecto es aquel en el que se obtienen productos que posteriormente serán procesados de manera industrial, como el azúcar o los productos textiles de origen vegetal.

4.1.2 CRITERIOS DE CALIDAD PARA EL AGUA DE RIEGO

Los parámetros de calidad, que se presentan en la Tabla 4.1, son suficientes para evaluar la idoneidad de un agua de riego, así como para estimar la posibilidad de que el agua pueda causar algún problema general tanto al suelo como a la planta, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud.

4.1.2.1 Características físicas

Las características físicas incluyen la totalidad de los sólidos en suspensión y las sustancias orgánicas disueltas. Esas sustancias pueden taponar los poros del suelo, revestir la superficie del terreno y reducir la aireación y penetración del

Tabla 4.1 Parámetros de calidad

Parámetros	Unidades	Ninguno	Moderado	Severo
Conductividad	μs/cm	700	3 000	>3 000
Sodio (Na)	mg/L	70	>70	
SAR		3	9	>9
Cloruros (Cl)	mg/L	100	>100	
		140	350	>350
Bicarbonatos (CaCO ₃)	mg/L	90	500	>500
Sulfatos	mg/L SO ₄	200	400	>400
pH		6.5-8.4	4.5-9	4.5-9>
SS	mg/L	15	>15	
		20	120	>120
Cloro residual (Cl)	mg/L	1	5	>5
DBO	mg/L	15	>15	
		20	60	>60
DQO	mg/L	120	300	>300
Nitrógeno total (N)	mg/L	5	30	>30
Boro (B)	mg/L	0.7	3	>3
Aluminio (Al)	mg/L	5	20	>20
Arsénico (As)	mg/L	0.1	2	>2
Berilio (Be)	mg/L	0.1	0.5	>0.5
Cadmio (Cd)	mg/L	0.01	0.05	>0.05
Cobalto (Co)	mg/L	0.05	5	>5
Cromo (Cr)	mg/L	0.1	1	>1
Cobre (Cu)	mg/L	0.2	5	>5
Fluoruros	mg/L	1	15	>15
Hierro (Fe)	mg/L	5	20	>20
Litio (Li)	mg/L	0.05	2.5	>2.5
Manganeso (Mn)	mg/L	0.02	10	>10
Molibdeno (Mo)	mg/L	0.01	0.05	>0.05
Níquel (Ni)	mg/L	0.02	2	>2
Plomo (Pb)	mg/L	5	10	>10
Selenio (Se)	mg/L	0.02	0.02	>0.02
Vanadio (V)	mg/L	0.01	1	>1
Zinc (Zn)	mg/L	2	10	>10

Ninguno = agua de buena calidad para cualquier suelo y planta; riego continuo en todo tipo de suelo.

Moderado = agua para plantas tolerantes y suelo de textura fina; su contenido en tóxicos potenciales obliga a riego discontinuo y uso por un periodo de hasta 20 años en suelos neutros o alcalinos de textura fina.

Severo = agua de mala calidad, sólo para plantas muy tolerantes y suelos de textura fina muy bien drenados. Riego discontinuo con muchas precauciones.

La NOM-001-SEMARNAT-1996 establece los límites máximos permisibles de contaminantes básicos para uso agrícola. Los valores se muestran en la Tabla 4.2 y Tabla 4.3.

Tabla 4.2 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos (NOM-001-SEMARNAT-1996)

Parámetro	Ríos				Embalses naturales y artificiales				Aguas costeras				Suelo										
	Uso en riego agrícola		Uso público urbano		Protección de la vida acuática		Uso en riego agrícola		Uso público urbano		Explotación pesquera, náutica, recreación y otros usos		Recreación		Estuarios		Uso en riego agrícola		Humedales naturales				
	a	b	b	c	c	b	b	c	c	a	a	b	a	a	b	a	a	a	a	b			
Temperatura °C (1)	N.A.	N.A.	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40		
Grasas y aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	15	25	
Materia flotante (3)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Sólidos sedimentables (mL/L)	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2	
Sólidos suspendidos totales	150	200	75	125	40	60	75	125	40	60	75	125	40	60	75	125	75	125	N.A.	N.A.	75	125	
Demanda bioquímica de oxígeno ₅	150	200	75	150	30	60	75	150	30	60	75	150	30	60	75	150	75	150	N.A.	N.A.	75	150	
Nitrógeno total	40	60	40	60	15	25	40	60	15	25	40	60	15	25	40	60	15	25	N.A.	N.A.	15	25	
Fósforo total	20	30	20	30	5	10	20	30	5	10	20	30	5	10	20	30	5	10	N.A.	N.A.	5	10	

(1) Instantáneo

(2) Muestra simple promedio ponderado

(3) Ausente según el método de prueba definido en la NMX-AA-006

P.D.= Promedio diario; P.M. = Promedio mensual; N.A. = No es aplicable

(a), (b) y (c): Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua

(*) = Ausente

Tabla 4.3 Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros

Parámetros (*)	(*)Ríos						Embalses naturales y artificiales						Aguas costeras						Suelo			
	Uso en riego agrícola		Uso público urbano		Protección de la vida acuática		Uso en riego agrícola		Uso público urbano		Explotación pesquera, navegación y otros usos		Recreación		Estuarios		Uso en riego agrícola		Humedales naturales			
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.		
mg/L	a	b	c	b	c	c	b	b	c	a	a	b	b	a	a	a	a	a	b	b		
Arsénico	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	
Cadmio	0.2	0.4	0.1	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2	0.4	0.1	0.2	0.2	0.4	0.2	0.4	0.1	0.2	0.5	0.1	0.1	0.2	
Cianuros	1.0	3	1	2	1	2	2	2	3	1	2	1	1	1	3	1	2	2	3	1	2	
Cobre	4	6	4	6	4	6	4	4	6	4	6	4	4	6	4	6	4	4	6	4	6	
Cromo	1	1.5	0.5	1	0.5	1	1	1	1.5	0.5	1	0.5	1	1	1.5	0.5	1	0.5	1	0.5	1	
Mercurio	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	0.01	0.01	0.02	0.005	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.005	0.01	0.005	0.01	
Níquel	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	2	4	4	
Plomo	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	0.2	0.4	0.5	1	0.2	0.4	5	10	0.2	0.2	0.4	
Zinc	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20	10	20

(*) Medidos de manera total

P.D. = Promedio diario; P.M. = Promedio mensual; N.A. = No es aplicable

(a), (b) y (c): Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua

agua, así como obstruir el sistema de riego. Con el tratamiento natural del agua residual por acción del suelo, se mejora también el contenido de minerales y otros compuestos de beneficio.

4.1.2.2 Características químicas

Los límites máximos permisibles de contaminantes en el agua residual tratada para fines de riego se puede encontrar en la NOM-001-SEMARNAT-1996 (Tabla 4.2).

4.1.2.3 Salinidad

Una de las características importantes del agua de riego es el contenido en sales que contiene. En los sistemas convencionales de riego, no toda el agua infiltrada en el suelo es consumida por evapotranspiración, sino que una fracción del agua rebasa la máxima profundidad de la zona radicular de las plantas.

Esta fracción que drena produce un lavado de sales y disminuye el proceso de acumulación de sales en el espesor del suelo explorado por las raíces. Sin embargo, siempre que el balance entre las sales acumuladas en el suelo y las eliminadas por las aguas de drenaje sea positivo, el suelo acabará salinizándose y en consecuencia será improductivo.

Las solubilidad de muchas de las sales contenidas en el agua de riego, tales como cloruros, sulfato de sodio, magnesio y potasio, cloruro cálcico, bicarbonatos de sodio y potasio, son superiores a las cifras límites de tolerancia a la salinidad de la mayor parte de las plantas no halófilas. Las bajas solubilidades del carbonato cálcico, magnesio y del sulfato cálcico, limita su acumulación en la

solución del suelo a niveles inferiores a los perjudiciales para las plantas.

El agua de riego rara vez contiene suficiente cantidad de sales como para causar un daño inmediato a los cultivos. Cuando no se produce un lavado de sales adecuado, las sales se disolverán en el agua del suelo hasta que se alcance una concentración tal que se exceda el producto de solubilidad de cada una de ellas. De forma general, en aquellos casos en que los valores de la fracción de lavado sean menores del 10 por ciento, la precipitación de las sales menos solubles puede ser importante. Los problemas de salinidad ocurrirán más frecuentemente durante los periodos cálidos, debido a la frecuencia de los riegos y al mayor consumo de agua por parte de las plantas.

Cálculo de la salinidad

El efecto de la salinidad es fundamentalmente de naturaleza osmótica, origina una disminución del potencial total del agua en el suelo, y por lo tanto afecta negativamente el rendimiento de los cultivos.

El contenido de sales suele ser peligroso cuando su concentración se encuentra por encima de 100 mg/L. La salinidad del agua de riego se determina midiendo su conductividad eléctrica (CE), concentración de boro, cloruro, bicarbonatos, Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} .

La conductividad eléctrica es una de las determinaciones que se utiliza con mayor frecuencia e indica la facilidad con que una corriente eléctrica pasa a través del agua, de forma que cuanto mayor sea el contenido de sales solubles ioniza-

das, mayor será el valor de aquélla. Para medirla se emplea el conductímetro.

Como la mayoría de las sales de interés son muy solubles o ionizables, se ha comprobado que se cumple con la siguiente relación:

$$ST = CE(k) \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde:

ST = Concentración en sales totales, en mg/L

CE = Conductividad eléctrica a 25° C, en dS/m

k = Constante de proporcionalidad, que es 0.64 si está expresado en $\mu\text{m}/\text{cm}$ o 640 si está en mm/cm

En la Tabla 4.4 se presenta la clasificación de la salinidad con base en la conductividad eléctrica y sus efectos sobre las plantas.

Solución de los problemas de salinidad

Un adecuado lavado de sales, la lixiviación y el cambio de un cultivo por otro más tolerante a la salinidad, son prácticas que buscan evitar el impacto de una acumulación de sales a largo plazo. Sin embargo, también se deben considerar las prácticas para tratar la salinidad temporal, por ejemplo, lavar las sales aplicando a la zona radicular más agua, que la que necesitan los cultivos durante su periodo de crecimiento. Esta canti-

dad extra de agua percola por debajo de la zona radicular, desplazando por lo menos una parte de las sales acumuladas en ella.

Los factores críticos en el control de las sales son la cantidad de agua necesaria para la lixiviación y el momento oportuno para su aplicación.

Las prácticas que pueden aumentar la eficacia del lavado son:

- Lavar las sales preferentemente durante las estaciones frías. Ello aumenta la eficacia y facilita la lixiviación ya que la evapotranspiración es más baja
- Utilizar los cultivos de mayor tolerancia a la salinidad, lo que implica una fracción de lavado menor y permite un ahorro de agua
- Labrar el suelo para disminuir la escorrentía y destruir las grietas que dejan pasar el agua a través de poros grandes y otras resquebrajaduras, disminuyendo la eficacia de lavado
- Riegos con aspersión con intensidades de aplicación superiores a la velocidad de infiltración. La lixiviación por aspersión requiere mayor tiempo y menor agua que la lixiviación por inundación continua
- Alternar periodos de inundación con periodos secos y evitar la práctica de inundación continua

Tabla 4.4 Clasificación de salinidad (IMTA, 2010)

Conductividad eléctrica (dS/m)	Clasificación	Efectos sobre las plantas
< 0.75	Libre de sales	No hay restricción para ningún cultivo
0.75 - 1.15	Muy bajo en sales	No hay restricción para ningún cultivo
1.10 - 2.0	Muy ligeramente salino	Afecta el rendimiento a cultivos muy sensibles
2.0 - 4.0	Ligeramente salino	Afecta el rendimiento a cultivos sensibles
4.0 - 8.0	Medianamente salino	Afecta el rendimiento de casi todos los cultivos
8.0 - 12.0	Fuertemente salino	Pueden crecer cultivos tolerantes a la salinidad
12.0 - 16.0	Muy fuertemente salino	Pueden crecer cultivos muy tolerantes a la salinidad
> 16.0	Extremadamente salino	Ningún cultivo agrícola crece rentablemente

- Programar los lavados durante los periodos en que los cultivos requieren menor consumo de agua. En caso contrario, proponer los lavados para después de la campaña de cultivo
- En los casos de suelos de lenta infiltración, se debe prever el riego de presiembra o la lixiviación fuera de la campaña de cultivo para evitar aplicaciones excesivas de agua durante el periodo de crecimiento
- Regar antes de la llegada de las lluvias, cuando se prevea que éstas serán insuficientes para completar la lixiviación

Tolerancia de los cultivos a la salinidad

No todos los cultivos responden de igual manera a la salinidad, algunos producen rendimientos aceptables a niveles de alta salinidad y otros son sensibles a niveles relativamente bajos. Esta diferencia se debe a la mejor capacidad de adaptación osmótica que tienen algunos cultivos, lo que permite absorber, bajo condiciones de salinidad, una mayor cantidad de agua. Las plantas sensibles a la salinidad gastan mucha energía en captar esa agua, por lo que su desarrollo se ve afectado.

4.1.2.4 Sodicidad

Las partículas del suelo adsorben y retienen cationes como consecuencia de las cargas eléctricas que existen en la superficie. Una vez que los cationes adsorbidos se han cambiado químicamente con las partículas del suelo, pueden ser reemplazadas por otros cationes que se encuentran en la solución del suelo. Esta reacción recibe el nombre de intercambio de cationes. Los más fácilmente intercambiables son los cationes Na, Ca y Magnesio.

Se entiende por sodicidad al fenómeno derivado de la composición del agua de riego, que tiende a elevar el porcentaje de sodio intercambiable. Este aumento depende, entre otros factores, de la relación del sodio soluble a los cationes divalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+}) y del nivel de iones bicarbonatos en el agua de riego.

El sodio es uno de los iones que más favorece la degradación del suelo; sustituye al calcio en los suelos áridos, y produce problemas de filtración en los mismos. Esta situación da lugar a una dispersión de los agregados y a una pérdida de la estructura, que dificulta la circulación del aire y agua, por lo que el suelo adquiere un aspecto polvoriento y amorfo, y pierde rápidamente su permeabilidad.

Está demostrado que aguas con alto contenido en sodio y baja salinidad conducen al hinchamiento y dispersión de las partículas del suelo, con el consecuente efecto negativo sobre las propiedades físicas del mismo.

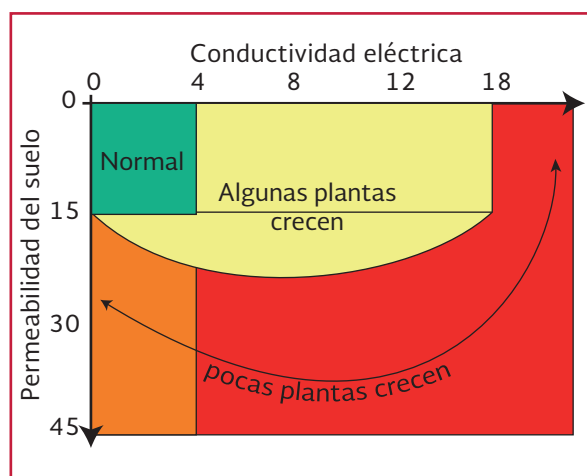
La infiltración, en general, aumenta con la salinidad y disminuye cuando se reduce la salinidad o aumenta el contenido de sodio, en relación al calcio y al magnesio.

Un agua con cierta salinidad ($CE < 0.5$ o < 0.2 dS/m) tiende a lixiviar las sales y minerales solubles, incluyendo el calcio y reduce su influencia sobre la estabilidad de las agregadas y estructura del suelo. Las partículas más pequeñas del suelo así dispersado, obstruyen el espacio poroso y sellan la superficie, reduciendo notablemente la infiltración. En la Tabla 4.5 y la Ilustración 4.1 se muestran los efectos sobre la permeabilidad del suelo que pueden presentarse con diferentes concentraciones de salinidad y sodio.

Tabla 4.5 Clasificación de los suelos salinos (IMTA, 2010)

Suelo	Conductividad eléctrica (dS/m)	Permeabilidad del suelo	pH	Observaciones
Normal	< 4	< 15	6.5 - 7.5	Buena permeabilidad, aireación y buena estructura
Salino	> 4	< 15	7.0 - 8.5	Presencia de costras blancas en su superficie
Salino-sódico	> 4	> 15	< 8.5	Si contiene calcio, se disuelve y reemplaza al sodio intercambiable, el cual es eliminado en forma simultánea con el exceso de sales
Sódico	< 4	> 15	8.2 - 10.0	Mala permeabilidad, difícil de trabajar y alta defloculación de sus partículas

Ilustración 4.1 Salinidad del suelo (IMTA, 2010)



Además, un alto contenido en sodio es fitotóxico para muchas plantas, produce quemaduras en las hojas, clorosis y muerte de las ramas pequeñas.

4.1.2.5 Toxicidad

La toxicidad se produce dentro de la misma planta y es el resultado de la absorción y acumulación de ciertos constituyentes existentes en el agua de riego, llamados microelementos. Se trata de elementos indispensables para la vida de las plantas, pero se encuentran presentes en proporciones muy pequeñas en los tejidos biológicos.

Los microelementos que actualmente son reconocidos como esenciales para las plantas superiores son el hierro, el manganeso, el zinc, el cobre, el boro y el molibdeno. Otros elementos

pueden tener un papel útil para ciertas plantas como el cloro, el silicio y el cobalto.

El sodio representa un papel de microelemento para ciertas plantas y es útil sobre todo para las plantas halófilas. Existen otros elementos conocidos como metales pesados no esenciales (cadmio, mercurio, plomo, entre otros) cuya presencia superior a una concentración límite resulta totalmente tóxica tanto para los cultivos como para la fauna y flora acuáticas (Tabla 4.6).

La concentración máxima se basa en una tasa de riego acorde con buenas prácticas agronómicas, es decir, 12 000 m³/(ha año). Si la tasa de riego excede este valor, la concentración máxima debe disminuir de forma proporcional.

No debe efectuarse ningún ajuste cuando las tasas de riego sean inferiores a la indicada. Los valores recomendados corresponden a la fuente de abastecimiento de agua utilizada para regar de forma continuada en un mismo lugar.

Los microelementos esenciales participan en el metabolismo de la planta y son necesarios para las enzimas, ya sea como activadores o como constituyentes específicos de sistemas enzimáticos.

Pequeñas cantidades de microelementos esenciales permiten obtener el crecimiento óptimo de la planta, pero rápidamente se llega del ópti-

Tabla 4.6 Concentraciones máximas de micro elementos recomendadas en aguas de riego

Microelemento	Concentración máxima recomendada	Observaciones
	(mg/L)	
Aluminio	5.0	Puede provocar una falta de productividad en suelos ácidos pH< 5.5, aunque suelos más alcalinos precipitarán el ion y eliminarán cualquier toxicidad.
Arsénico	0.10	Su fitotoxicidad varía ampliamente entre 12 mg/L para la hierba del Sudán y hasta menos de 0.5 mg/L para el arroz.
Berilio	0.1	Su fitotoxicidad varía ampliamente entre 5 ppm para la col rizada y 0.5 para las judías verdes.
Cadmio	0.01	Es tóxico para las judías, el betabel y los nabos a concentraciones tan bajas como 0.1 mg/L en disolución. Los límites recomendados son conservadores debido a su capacidad para acumularse en el suelo y en las plantas hasta concentraciones que pueden ser perjudiciales para las personas.
Cobalto	0.05	Es tóxico para la planta del tomate a una concentración de 0.1 mg/L en disolución. Suele ser inactivado por suelos neutros o alcalinos.
Cromo	0.1	No está considerado como un elemento esencial para el crecimiento. Los límites recomendados son conservadores debido a los escasos conocimientos sobre su fitotoxicidad.
Cobre	0.2	Es tóxico para diversas plantas a concentraciones entre 0.1 y 1.0 mg/L en disolución.
Fluoruros	1.0	Es inactivado por suelos neutros o alcalinos.
Hierro	5.0	No es tóxico para las plantas en suelos aireados, pero puede contribuir a la acidificación del suelo y a la disminución del fósforo y molibdeno, elementos esenciales para las plantas. El riego por aspersión elevado puede dar lugar a depósitos desagradables en las plantas, los equipos y los edificios.
Litio	2.5	Es tolerado por la mayoría de los cultivos hasta 5 mg/L; es un elemento móvil en el suelo. Es tóxico para los cítricos a concentraciones superiores a 0.075 mg/L Actúa en forma similar al boro.
Manganeso	0.2	Es tóxico para diversas plantas a concentraciones entre unas décimas y unos miligramos por litro, aunque principalmente en suelos ácidos.
Molibdeno	0.01	No es tóxico para las plantas en las concentraciones normalmente presentes en el suelo y en el agua. Puede ser tóxico para el ganado cuando el forraje se cultiva en suelos con elevadas concentraciones de molibdeno disponible.
Níquel	0.2	Es tóxico para diversas plantas a concentraciones entre 0.5 y 1.0 mg/L; su toxicidad disminuye a pH neutro o alcalino.
Plomo	5.0	Puede inhibir el crecimiento de las células vegetales a concentraciones muy elevadas.
Selenio	0.02	Es tóxico para las plantas a concentraciones tan pequeñas como 0.025 mg/L, y para el ganado cuando el forraje se cultiva en suelos con niveles relativamente altos de selenio añadido. Es un elemento esencial para el crecimiento de los animales, pero en concentraciones muy pequeñas.
Estaño		Las plantas lo rechazan de forma eficaz; su tolerancia específica es desconocida.
Titanio		Las plantas lo rechazan de forma eficaz; su tolerancia específica es desconocida.
Tungsteno		Las plantas lo rechazan de forma eficaz; su tolerancia específica es desconocida.
Vanadio	0.1	Es tóxico para muchas plantas a concentraciones relativamente bajas.
Zinc	2,0	Es tóxico para muchas plantas a concentraciones muy variables; su toxicidad disminuye el pH>6,0 en suelos con textura fina o de carácter orgánico.

mo al exceso, con cantidades mínimas (ocurre a pH ácido o muy ácido). No ocurre así en el caso de los macroelementos.

El orden de abundancia en suelos irrigados con este tipo de aguas es Fe > Zn > Cu > Pb > Cr > Ni > Cadmio. Tras un tratamiento biológico los efluentes presentan concentraciones similares a las de las aguas naturales, excepto para el Zn, más abundante en aguas residuales urbanas. Estos últimos elementos son considerados como los más peligrosos, junto con el mercurio.

La mayoría de los microelementos tienden a acumularse en el suelo, por lo que el contenido de éstos en suelos regados con agua residual regenerada, puede aumentar considerablemente si el riego se prolonga durante un largo periodo.

Ensayos realizados en California demuestran que se puede regar con agua residual de composición típica durante casi 100 años, antes de que la concentración debida a la acumulación de microelementos en el suelo alcance el límite máximo.

El agua y el suelo deben analizarse periódicamente a fin de estimar la velocidad de acumulación de elementos en el suelo.

4.1.2.6 Nitrógeno total

Los rendimientos de los cultivos sensibles al nitrógeno (remolacha azucarera, vid, albaricoque, cítricos) pueden verse afectados por concentraciones de nitrógeno total que excedan de 5 mg/Litro. Cuando la concentración excede los 20 mg/L puede ocasionar problemas graves en estos cultivos. Para cultivos no sensibles puede ser adecuada una concentración mayor a 30 mg/Litro; lo que evita el aporte de abonos nitrogenados. Las concentra-

ciones menores a 5 mg/L no tienen ningún efecto ni siquiera en cultivos sensibles al nitrógeno.

El nitrógeno no puede ser absorbido por la planta, previamente hay que transformarlo a nitrógeno mineral. Cuando se necesita un efecto rápido sobre el cultivo se emplea el nitrógeno nítrico y, para un efecto más lento, el amoniacal. Las plantas absorben nitrógeno desde el principio hasta el final de su desarrollo, pero hay etapas en las que las necesidades de nitrógeno son más intensas. En los cereales, las mayores necesidades coinciden con el ahijado, encañado y floración; en los frutales coinciden con la floración y el cuajado de frutos.

4.1.2.7 Índice de acidez (pH)

El pH representa la medida de la acidez o alcalinidad del agua. El intervalo normal de pH para agua de riego oscila entre 6.5 y ocho. El agua residual urbana, ya sea bruta o tratada, sin vertidos industriales en condiciones normales, se encuentra en un intervalo ideal para su uso para riego. Cuando se encuentra fuera de este rango, el pH indica que ocurre algo anormal relacionado con la calidad del agua o con la presencia de algún ión tóxico. En este último caso, el pH sirve como advertencia para realizar un análisis riguroso del agua y hacer las correcciones necesarias.

El control de pH es necesario para que se evite dañar los cultivos, para el tratamiento biológico del agua residual, así como para evitar corrosión en tuberías y diferentes infraestructuras.

4.1.2.8 Bicarbonatos

La alcalinidad se debe a la presencia de bicarbonatos (HCO_3), carbonatos e hidróxidos. El bicar-

bonato causa la mayor parte de la alcalinidad natural en las aguas y es útil en las aguas residuales para resistir los cambios de pH porque proporciona un amortiguamiento. Pero con respecto al riego, aun en concentraciones muy bajas, puede ser un problema sobre todo si se trata de riego por aspersión de frutales o viveros durante periodos de baja humedad y gran evaporación. A medida que el agua de las hojas se evapora, las sales se concentran. Aunque ello no implica toxicidad, si el efecto de concentración es suficientemente grande, las sales menos solubles en el agua precipitan depositándose en el fruto y en las hojas.

4.1.3 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS

Estas características se relacionan con bacterias, virus y otros organismos causantes de enfermedades. Antes de ser tratadas, las aguas residuales contienen toda clase de microorganismos, muchos de los cuales son patógenos, es decir, causantes de enfermedades. El grado de desinfección depende del tratamiento empleado, la utilización que se prevé y los requisitos sanitarios. Algunos ejemplos son:

- *Pseudomonas fluorescens*
- *P. aeruginosa*, *Proteus vulgaris*
- *Bacillus cereus*
- *B. subtilis*
- *Aerobacter cloacae*
- *Zooglea ramigera*

La presencia de coliformes fecales es un indicador importante en la determinación de la calidad bacteriológica del agua que debe ser considerado en toda caracterización.

Las aguas residuales contienen también esporas e hifas de hongos tales como:

- *Leptomitius lacteus*
- *Fusarium aquaedutuum*

Las cuales proliferan en un amplio intervalo de pH (de 3 a 9).

Bacterias intestinales patógenas, como:

- *Salmonella typhi*
- *Salmonella paratyphi*

El agua residual también contiene microorganismos patógenos para los animales, como el de la *brucellosis* del ganado producida por bacterias del género *Brucella*.

Estas enfermedades se pueden transmitir a través del uso de estas aguas para riego agrícola. Por este motivo resulta imprescindible tratar el agua antes de reutilizarla en riego. El tratamiento dependerá del uso que se le vaya a dar (tipo de riego, cultivo, zona a regar) y por supuesto, de las condiciones sanitarias impuestas.

Se presenta en la Tabla 4.7 la propuesta de la OMS sobre la calidad de los parámetros microbiológicos para las aguas de riego. Adicionalmente se deben contemplar otros parámetros como pH, DBO y turbidez o sólidos suspendidos. Ya que el agua utilizada para riego puede representar un riesgo de salud para los habitantes, los animales y la flora de la región; es vital que se revisen los parámetros de calidad presentados en este capítulo.

Tabla 4.7 Parámetros microbiológicos requeridos para las aguas de riego

Parámetros microbiológicos	Unidades	Hortalizas y frutas crudas	Cereales y cultivos para conservas
Nematodos intestinales	(media aritmética huevos/L)	<1	<1
Coliformes fecales	(media geométrica/100 mL)	< 1 000	
Tratamiento orientativo		Estanques de estabilización o equivalente	Estanques de estabilización o equivalente
Grupo expuesto		Trabajador, consumidor	Trabajador

4.1.4 SISTEMAS DE RIEGO

4.1.4.1 Riego por aspersión

Consiste básicamente en aplicar agua a la superficie del terreno rociándola en forma de lluvia (Ilustración 4.2). Además de los problemas comunes como obstrucciones de goteros y contaminación por hongos, etcétera, pueden aparecer problemas especiales de toxicidad e incluso riesgo sanitario por otro contaminante. Como consecuencia, el sistema de distribución del agua mediante aspersores exige un agua de calidad superior a los demás tipos de riego. Los sistemas de riego por aspersión pueden ser de varios tipos:

- Fijos y colocados en la superficie o enterrados someramente
Los superficiales tienen la desventaja de verse afectados por la climatología, el ganado o los equipos de laboreo. La principal ventaja es su bajo costo y fácil mantenimiento. El material que se utiliza es el PVC
Las conducciones enterradas son de urilita o PVC que son más costosos pero más duraderos
- De tipo móvil (Ilustración 4.3)
Se usan aspersores múltiples, rodantes y de pivote central

Ilustración 4.2 Aspersores fijos



Toxicidad y riesgo sanitario

Debido al modo de dispersar el agua, con el riego por aspersión se produce una absorción foliar de micronutrientes y se acelera la velocidad de acumulación del ión tóxico en la planta, lo que puede ser la fuente principal de toxicidad. En general, pueden producirse daños por la concentración de sales acumuladas en la superficie externa de las hojas, debido a la pulverización de las sales. Para evitar esto existen varias soluciones, entre las que destacan:

- Riego nocturno, pues en general la humedad aumenta y disminuye el viento
- Aumento de la velocidad de rotación de los cabezales de los aspersores

Ilustración 4.3 Ejemplos de riego móvil



Uno de los problemas principales que se presentan con el uso de las aguas residuales para riego es el de posibles infecciones y propagación de microorganismos patógenos debido a los aerosoles que se forman. Por ello es necesario saber cómo y qué se va a regar. El riesgo mayor aparece cuando se usa el riego por aspersión para cultivos de consumo directo. Por este motivo, el Código de Agua de California (EE.UU.), distingue diferen-

tes tratamientos según el nivel de reducción de coliformes que se quiera obtener, que a su vez dependerá del tipo de riego y la utilización que se le dé. Como se observa en la Tabla 4.8, el riego superficial de viñedos y árboles frutales requiere un nivel de tratamiento menor y el riego por aspersión requiere cumplir una normatividad más estricta en cuanto a la reducción de coliformes totales.

Tabla 4.8 Parámetros complementarios requeridos para riego

Tipo de reutilización	Tratamiento	Calidad	Distancia de seguridad
Riegos de cultivos	Biológico	PH= 6-9	15 m a fuentes o pozos de agua potable
Comestibles no procesados	Filtración	<10 mg DBO/L	15 m a fuentes o pozos de agua potable
Comercialmente	Desinfección	<2 NTU	30 m a zonas permitidas al público
		0 CF/100 mL	
		1 mg CLO ₂ /L	
Riego de cultivos que se consumen procesados	Biológico	PH = 6-9	90 m a fuentes o pozos de agua potable
	Desinfección	<30 mg DBO/L <30 mg SS/L	30 m a zonas permitidas al público
		200 C.F./100 mL 1 mg CLO ₂ /L	
Riego de pastos de animales productores	Biológico	PH = 6-9	90 m a fuentes o pozos de agua potable
De leche y cultivos industriales	Desinfección	<30 mg DBO/L	30 m a zonas permitidas al público
		<30 mg SS/L	
		200 C.F./100 mL	
		1 mg CLO ₂ /L	

4.1.4.2 Riego superficial

Surcos o caballones

El efluente se aplica por gravedad y fluye a través de los surcos. El terreno debe ser llano, y el tamaño de los surcos o caballones dependen del volumen de vertido, tipo de vegetal y tipo de suelo (ver Ilustración 4.4). Se deben alternar periodos de inmersión de los surcos con periodos de secado para oxidar la materia orgánica y evitar colmatar los poros.

Inundación

Como su propio nombre lo indica, este sistema consiste en encharcar parcelas. La tierra tiene que estar nivelada con el fin de mantener una profundidad uniforme y se necesita un periodo de secado

para oxidar la materia orgánica y prevenir que los poros se colmaten (ver Ilustración 4.5).

Escorrentías

Este sistema se practica sobre pendientes con cubierta vegetal y consiste en la descarga controlada de un efluente por un terreno con una pendiente y longitud adecuadas, que se encuentra tapizado por pastizales o masas forestales. Los terrenos ideales son los que tienen baja permeabilidad y coeficiente de retención adecuados para proteger los acuíferos.

4.1.4.3 Riego localizado

Se ahorra mucha agua y se evita la proliferación de malas hierbas ya que la zona regada es muy puntual. Esta técnica exige una filtración

exhaustiva del agua residual para evitar una obturación de los goteros. Se aplica fundamentalmente en frutales y plantas hortícolas (ver Ilustración 4.6).

Toxicidad y riesgo sanitario

Cuando se riega con aguas salinas se aporta menor cantidad de agua y no se produce un lavado suficiente de sales, por lo que éstas se concentran en la zona radicular. Es el sistema de distribución considerado como perfecto para evitar el contacto operario-agua, ya que es un sistema totalmente cerrado que, además, no genera aerosoles.

Obturación

Las obturaciones ocurren tanto en el riego por aspersión como en el riego localizado, pero es

en este último en el que se presentan con mayor frecuencia. Entre las causas que las producen se pueden mencionar:

- Los sólidos en suspensión que lleva el agua residual y se reducen según el nivel de tratamiento
- La eutrofización, que consiste en el desarrollo de algas u otros vegetales indeseables dentro del agua. Se produce principalmente por el enriquecimiento de ciertos nutrientes como el nitrógeno y el fósforo. Este proceso puede taponar tuberías, válvulas, emisores, goteros, etcétera

La turbiedad del agua de riego debe ser muy baja para evitar la obturación de goteros. Por este motivo el riego localizado es el más restrictivo en cuanto a uso con agua residual tratada.

Ilustración 4.4 Riego por surcos



Ilustración 4.5 Ejemplo de riego por inundación



Ilustración 4.6 Riego localizado por goteo



CONCLUSIONES DEL LIBRO

Con el presente documento se proporcionan a los organismos operadores las recomendaciones para diseñar y seleccionar alternativas poco convencionales para la disposición de aguas residuales en zonas rurales o que por su accidentada topografía, no es viable la construcción de redes de alcantarillado sanitario que permitan llevar el agua residual a las plantas de tratamiento.

Los procedimientos alternativos presentados en este libro aprovechan las reacciones fisicoquímicas que tienen lugar en el suelo, la actividad de los microorganismos presentes en abundancia y la propia acción de la vegetación. Este conjunto de fenómenos permite el tratamiento de las aguas residuales, lo que promueve el aprovechamiento del agua vertida, así como de los subproductos que se pueden explotar de ella, como la madera y algunos productos agrícolas. Complementariamente, se busca mejorar el paisaje urbano-rural.

Dentro de estas tecnologías el proceso de filtración intermitente de arena se propone como una alternativa por ser un método de tratamiento del agua sencillo, eficiente y confiable. Sus costos, por lo general, están al alcance de los recursos de cualquier comunidad y las facilidades para el diseño de construcción, operación y mantenimiento se encuentran usualmente disponibles a nivel local o pueden adquirirse en forma relativamente fácil.

Se presentan además los sistemas de aplicación superficial al suelo entre los que destaca el filtro verde, ya que tiene uno de los mayores potenciales de tratamiento de todos los sistemas de aplicación al terreno, debido a la aplicación de cargas relativamente bajas sobre el suelo vegetado y a la existencia de un ecosistema muy activo en el suelo, a escasa distancia de la superficie. El tratamiento tiene lugar en niveles superiores del terreno, donde se encuentra una capa biológica activa.

Por otra parte se presentan los sistemas de infiltración rápida que pueden producir agua tratada de suficiente calidad para irrigación no restringida y recreación. Este sistema se puede aplicar en lugares donde las cuencas de infiltración rápida se localizan en sitios elevados y el agua tratada drena naturalmente hacia las corrientes

u otros cuerpos superficiales, desde donde se puede utilizar nuevamente. Estos sistemas también se usan en lugares donde se pretende reducir la contaminación de lagos o corrientes. En lugar de ser descargado directamente al cuerpo de agua superficial, el efluente se pasa primero a través del sistema de infiltración rápida para que eventualmente drene al acuífero como agua tratada.

Dentro del libro se aborda el riego superficial ya que su uso es muy extendido, además de que supone una etapa más en el tratamiento de aguas, ya que, como se mencionó, el suelo es medio de tratamiento eficaz. Debe tomarse en cuenta que el agua residual aporta abundantes concentraciones de nutrientes, pero conlleva riesgos sanitarios con posible contaminación de acuíferos, si no se toman las medidas adecuadas. El uso que se le da al agua residual por este proceso es para regar cultivos agrícolas destinados al consumo directo alimenticio humano, animal y consumo indirecto industrial (alimentos procesados como conservas y azúcar, y productos textiles de origen vegetal).

La tercera parte del libro presenta alternativas de tratamiento fundamentadas en el proceso de filtración, pero a un nivel doméstico. Estos sistemas presentan la ventaja de ser económicos, de fácil instalación y requieren poco mantenimiento. Sin embargo, se necesita un área relativamente grande y el sistema depende de las condiciones topográficas, la permeabilidad del suelo y el nivel freático de la región.

Dentro de los sistemas de tratamiento mediante aplicación subsuperficial de las aguas residuales, destacan las zanjas filtrantes, los lechos filtrantes y los pozos filtrantes.

Recuerde que los procedimientos, datos, modelos matemáticos y programas de cómputo presentados en este libro obedecen a la experiencia vertida a lo largo del tiempo por parte de los especialistas en la materia y de los proyectos en que se han trabajado. Sin embargo, en ningún caso debe considerarse esta información como reglamento o norma oficial; más bien debe ser considerada como una guía para el diseño de sistemas de tratamiento no convencionales.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez F. (Octubre de 2002). *Filtros verdes*. Un sistema de depuración ecológico. INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL, XXIII, 25-28.
- Centro panamericano de ingeniería sanitaria y ciencias del ambiente. (2003). *Especificaciones técnicas para el diseño de zanjas de filtro y filtros subsuperficiales de arena*. Lima, Perú.
- Ferruses, J. (2011). Actualizaciones de Acuamed para la mejora de la calidad de las aguas mediante fintros verdes en el entorno de la Albufera. Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Hilleboe, H. (1995). *Manual de tratamiento de aguas negras*. Lirtiusa.
- Hills, D., & Krone, R. (1971). *Hydraulically Ventilated underground Filter* (Vol. 97). J.Sanit. Eng. Div.
- INEGI. (2010). Banco de Información INEGI. Recuperado el 30 de julio de 2013, <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biinegi/default.aspx>
- IMTA, (2010). Salinidad del Suelo. Jiutepec, Morelos, SEMARNAT.
- Living, G., & Wahlberg, J. (1990). *Performance of lagoon intermittent sand filter systems*. Research Journal of the Water Pollution Control Federation, Vol.62, No.S.
- López, C., Concha, G., Francisco, A., & Herce, C. (1998). *Filtros Verdes: Una alternativa real en el tratamiento de aguas residuales en pequeños municipios*. Zaragoza, España: Universidad de Zaragoza.
- Merino, L. (2002). *La depuración de aguas residuales urbanas de pequeñas poblaciones mediante infiltración directa en el terreno*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España.
- Metcalf & Eddy (1998). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. 3ª Ed. 1485 p. McGraw-Hill. ISBN 84-481-1607-0.
- Metcalf & Eddy. (1991). *Wastewater Engineering. Treatment, Disposal and Reuse*. New York: McGraw Hill, Inc.
- Middlebrooks, E. (1995). *Upgrading pond effluents*. Wat. Sci. Tech.
- Perkins, R. (1990). *Onsite Wastewater Disposal*. Lewis Publishers.
- Rovirosa, N. (2004). *Tratamiento de Aguas residuales en zonas costeras mediante infiltración rápida en arenas*. Habana, Cuba: Centro de Hidrología y Calidad de las Aguas.
- Salas, J. (2010). *Tecnologías no convencionales para depuración de aguas residuales*. Montevideo, Uruguay: Centa.
- Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (2003). *Norma oficial mexicana NOM-001-SEMARNAT-1996*, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas y bienes nacionales. México, D.F.
- Secretariado Alianza por el Agua/Ecología y Desarrollo. (2008). *Manual de depuración de aguas residuales urbanas*. Madrid, España: Ideasmares.
- Sherwood, C., Ronald, W., & Middlebrooks, J. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. McGraw Hill, Inc.



TABLA DE CONVERSIONES DE UNIDADES DE MEDIDA

Sigla	Significado	Sigla	Significado
mg	miligramo	kg/m ³	kilogramo por metro cúbico
g	gramo	l/s	litros por segundo
kg	kilogramo	m ³ /d	metros cúbicos por día
mm	milímetro	Sm ³ /h	condiciones estándar de metro cúbico por hora
cm	centímetro	Scfm	condiciones estándar de pies cúbicos por minuto
m	metro	°C	grados Celsius
ml	mililitro	psia	libra-fuerza por pulgada cuadrada absoluta
l	litro	cm/s	centímetro por segundo
m ³	metro cúbico	m/s	metro por segundo
s	segundo	HP	caballo de fuerza (medida de energía)
h	hora	kW	kilowatt
d	día	UNT	unidades nefelométricas de turbiedad
mg/l	miligramo por litro		

Longitud

Sistema métrico	Sistema Inglés	Siglas
1 milímetro (mm)	0.03	in
1 centímetro (cm) = 10 mm	0.39	in
1 metro (m) = 100 cm	1.09	yd
1 kilómetro (km) = 1 000 m	0.62	mi
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 pulgada (in)	2.54	cm
1 pie (ft) = 12 pulgadas	0.30	m
1 yarda (yd) = 3 pies	0.91	m
1 milla (mi) = 1 760 yardas	1.60	km
1 milla náutica (nmi) = 2 025.4 yardas	1.85	km

Superficie

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm ² = 100 mm ²	0.15	in ²
1 m ² = 10 000 cm ²	1.19	yd ²
1 hectárea (ha) = 10 000 m ²	2.47	acres
1 km ² = 100 ha	0.38	mi ²
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in ²	6.45	cm ²
1 ft ² = 144 in ²	0.09	m ²
1 yd ² = 9 ft ²	0.83	m ²
1 acre = 4 840 yd ²	4 046.90	m ²
1 milla ² = 640 acres	2.59	km ²

Volumen/capacidad

Sistema métrico	Sistema inglés	Siglas
1 cm ³	0.06	in ³
1 dm ³ = 1 000 cm ³	0.03	ft ³
1 m ³ = 1 000 dm ³	1.30	yd ³
1 litro (L) = 1 dm ³	1.76	pintas
1 hectolitro (hL) = 100 L	21.99	galones
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 in ³	16.38	cm ³
1 ft ³ = 1 728 in ³	0.02	m ³
1 onza fluida EUA = 1.0408 onzas fluidas RU	29.57	mL
1 pinta (16 onzas fluidas) = 0.8327 pintas RU	0.47	L
1 galón EUA = 0.8327 galones RU	3.78	L

Masa/peso

Sistema métrico	Sistema inglés	
1 miligramo (mg)	0.0154	grano
1 gramo (g) = 1 000 mg	0.0353	onza
1 kilogramo (kg) = 1 000 g	2.2046	libras
1 tonelada (t) = 1000 kg	0.9842	toneladas larga
Sistema Inglés	Sistema métrico	
1 onza (oz) = 437.5 granos	28.35	g
1 libra (lb) = 16 oz	0.4536	kg
1 stone = 14 lb	6.3503	kg
1 hundredweight (cwt) = 112 lb	50.802	kg
1 tonelada larga = 20 cwt	1.016	t

Temperatura

$$^{\circ}C = \frac{5}{9}(^{\circ}F -$$

$$^{\circ}F = \frac{9}{5}(^{\circ}C) + 32$$

Otros sistemas de unidades		Multiplicado por	Sistema Internacional de Unidades (SI)	
Unidad	Símbolo	Factor de conversión	Se convierte a	
Longitud				
Pie	pie, ft.,'	0.30	metro	m
Pulgada	plg, in,"	25.40	milímetro	mm
Presión/esfuerzo				
Kilogramo fuerza/cm ²	kg _f /cm ²	98 066.50	pascal	Pa
Libra/pulgada ²	lb/ plg ² , PSI	6 894.76	pascal	Pa
atmósfera técnica	at	98 066.50	pascal	Pa
metro de agua	m H ₂ O (mca)	9 806.65	pascal	Pa
mm de mercurio	mm Hg	133.32	pascal	Pa
bar	bar	100 000.00	pascal	Pa
Fuerza/ peso				
kilogramo fuerza	kg _f	9.80	newton	N
Masa				
libra	lb	0.45	kilogramo	kg
onza	oz	28.30	gramo	g
Peso volumétrico				
kilogramo fuerza/m ³	kg _f /m ³	9.80	N/m ³	N/m ³
libra /ft ³	lb/ft ³	157.08	N/m ³	N/m ³
Potencia				
caballo de potencia	CP, HP	745.69	watt	W
caballo de vapor	CV	735.00	watt	W
Viscosidad dinámica				
poise	μ	0.01	pascal segundo	Pa s
Viscosidad cinemática				
viscosidad cinemática	v	1	stoke	m ² /s (St)
Energía/ Cantidad de calor				
caloría	cal	4.18	joule	J
unidad térmica británica	BTU	1 055.06	joule	J
Temperatura				
grado Celsius	°C	tk=tc + 273.15	grado Kelvin	K

Nota: El valor de la aceleración de la gravedad aceptado internacionalmente es de 9.80665 m/s²

Longitud								
de / a	mm	cm	m	km	mi	milla náutica (nmi)	ft	in
mm	1.000	0.100	0.001					
cm	10000	1.000	0.010				0.033	0.394
m	1 000.000	100.000	1.000	0.001			3.281	39.370
km			0.001	1.000	0.621	0.540	3 280.83	0.039
mi			1 609.347	1.609	1.000	0.869	5 280.000	
nmi			1 852.000	1.852	1.151	1.000	6 076.115	
ft		30.480	0.305				1.000	12.000
in	25.400	2.540	0.025				0.083	1.000

Superficie								
de / a	cm ²	m ²	km ²	ha	mi ²	acre	ft ²	in ²
cm ²	1.00						0.001	0.155
m ²	10 000.00	1.00					10.764	1 550.003
km ²			1.000	100.000	0.386	247.097		
ha		10 000.00	0.010	1.000	0.004	2.471		
mi ²			2.590	259.000	1.000	640.000		
acre		4 047.00	0.004	0.405	0.002	1.000		
ft ²	929.03	0.09					1.000	0.007
in ²	6.45						144.000	1.000

Volumen								
de / a	cm ³	m ³	L	ft ³	gal. EUA	acre-ft	in ³	yd ³
cm ³	1.000		0.001				0.061	
m ³		1.000	1 000.000	35.314	264.200			1.307
L	1 000.000	0.001	1.000	0.035	0.264		61.023	
ft ³		0.028	28.317	1.000	7.481			0.037
gal. EUA		0.004	3.785	0.134	1.000		230.974	
acre-ft		1 233.490				1.000		
in ³	16.387		0.016		0.004		1.000	
Yd ³		0.765		27.000				1.000

Gasto								
de / a	l/s	cm ³ /s	gal/día	gal/min	l/min	m ³ /día	m ³ /h	ft ³ /s
l/s	1.000	1 000.000		15.851	60.000	86.400	3.600	0.035
cm ³ /s	0.001	1.000	22.825	0.016	0.060	0.083		
gal/día		0.044	1.000			0.004		
gal/min	0.063	63.089	1 440.000	1.000	0.000	5.451	0.227	0.002
l/min	0.017	16.667	0.000	0.264	1.000	1.440	0.060	
m ³ /día	0.012	11.570	264.550	0.183	0.694	1.000	0.042	
m ³ /h	0.278		6 340.152	4.403	16.667	24.000	1.000	0.010
ft ³ /s	28.316			448.831	1 698.960	2 446.590	101.941	1.000

Eficiencia de pozo			
de	a	gal/min/pie	l/s/m
gal/min/pie		1.000	0.206
l/s/m		4.840	1.000

Permeabilidad							
de	a	cm/s	gal/día/Pie ²	millones gal/día/acre	m/día	pie/s	Darcy
cm/s		1.000	21 204.78		864.000	0.033	
gal/día/pie ²			1.000		0.041		0.055
millón gal/día/acre				1.000	0.935		
m/día		0.001	24.543	1.069	1.000		1.351
pie/s		30.480			26 334.72	1.000	
Darcy			18.200		0.740		1.000

Peso									
de	a	grano	gramo	kilogramo	libra	onza	tonelada corta	tonelada larga	tonelada métrica
Grano (gr)		1.000	0.065						
Gramo (g)		15.432	1.000	0.001	0.002				
Kilogramo (kg)			1 000.000	1.000	2.205	35.273			0.001
Libra (lb)			453.592	0.454	1.000	16.000			
Onza (oz)		437.500	28.350			1.000			
t corta				907.180	2 000.000		1.000		0.907
t larga				1 016.000	2 240.000		1.119	1.000	1.016
t métrica				1 000.000	2 205.000		1.101	0.986	1.000

Potencia									
de	a	CV	HP	kW	W	ft lb/s	kg m/s	BTU/s	kcal/s
CV		1.000	0.986	0.736	735.500	542.500	75.000	0.697	0.176
HP		1.014	1.000	0.746	745.700	550.000	76.040	0.706	0.178
kW		1.360	1.341	1.000	1 000.000	737.600	101.980	0.948	0.239
W				0.001	1.000	0.738	0.102		
ft lb/s					1.356	1.000	0.138	0.001	
kg m/s		0.013	0.013	0.009	9.806	7.233	1.000	0.009	0.002
BTU/s		1.434	1.415	1.055	1 055.000	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal/s		5.692	5.614	4.186	4 186.000	3 088.000	426.900	3.968	1.000

Presión								
de	a	atmósfera	Kg/cm ²	lb/in ²	mm de Hg	in de Hg	m de H ₂ O	ft de H ₂ O
atmósfera		1.000	1.033	14.696	760.000	29.921	10.330	33.899
kg/cm ²		0.968	1.000	14.220	735.560	28.970	10.000	32.810
lb/in ²		0.068	0.070	1.000	51.816	2.036	0.710	2.307
mm de Hg		0.001	0.001	0.019	1.000	0.039	0.013	0.044
in de Hg		0.033	0.035	0.491	25.400	1.000	0.345	1.133
m de agua		0.096	0.100	1.422	73.560	2.896	1.000	3.281
ft de agua		0.029	0.030	0.433	22.430	0.883	0.304	1.000

Energía									
de	a	CV hora	HP hora	kW hora	J	ft.lb	kgm	BTU	kcal
CV hora		1.000	0.986	0.736				2 510.000	632.500
HP hora		1.014	1.000	0.746				2 545.000	641.200
kW hora		1.360	1.341	1.000				3 413.000	860.000
J					1.000	0.738	0.102		
ft.lb					1.356	1.000	0.138		
kgm					9.806	7.233	1.000		
BTU					1 054.900	778.100	107.580	1.000	0.252
kcal					4 186.000	3 087.000	426.900	426.900	1.000

Transmisividad				
de	a	cm ² /s	gal/día/pie	m ² /día
cm ² /s		1.000	695.694	8.640
gal/día/ft		0.001	1.000	0.012
m ² /día		0.116	80.520	1.000

Conversión de pies y pulgadas, a metros												
ft, in/m	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	0.000	0.025	0.051	0.076	0.102	0.127	0.152	0.178	0.203	0.229	0.254	0.279
1	0.305	0.330	0.356	0.381	0.406	0.432	0.457	0.483	0.508	0.533	0.559	0.584
2	0.610	0.635	0.660	0.686	0.711	0.737	0.762	0.787	0.813	0.838	0.864	0.889
3	0.914	0.940	0.965	0.991	1.016	1.041	1.067	1.092	1.117	1.143	1.168	1.194
4	1.219	1.245	1.270	1.295	1.321	1.346	1.372	1.397	1.422	1.448	1.473	1.499
5	1.524	1.549	1.575	1.600	1.626	1.651	1.676	1.702	1.727	1.753	1.778	1.803
6	1.829	1.854	1.880	1.905	1.930	1.956	1.981	2.007	2.032	2.057	2.083	2.108
7	2.134	2.159	2.184	2.210	2.235	2.261	2.286	2.311	2.337	2.362	2.388	2.413
8	2.438	2.464	2.489	2.515	2.540	2.565	2.591	2.616	2.642	2.667	2.692	2.718
9	2.743	2.769	2.794	2.819	2.845	2.870	2.896	2.921	2.946	2.972	2.997	3.023
10	3.048	3.073	3.099	3.124	3.150	3.175	3.200	3.226	3.251	3.277	3.302	3.327
11	3.353	3.378	3.404	3.429	3.454	3.480	3.505	3.531	3.556	3.581	3.607	3.632
12	3.658	3.683	3.708	3.734	3.759	3.785	3.810	3.835	3.861	3.886	3.912	3.937
13	3.962	3.988	4.013	4.039	4.064	4.089	4.115	4.140	4.166	4.191	4.216	4.242
14	4.267	4.293	4.318	4.343	4.369	4.394	4.420	4.445	4.470	4.496	4.521	4.547
15	4.572	4.597	4.623	4.648	4.674	4.699	4.724	4.750	4.775	4.801	4.826	4.851
16	4.877	4.902	4.928	4.953	4.978	5.004	5.029	5.055	5.080	5.105	5.131	5.156
17	5.182	5.207	5.232	5.258	5.283	5.309	5.334	5.359	5.385	5.410	5.436	5.461
18	5.486	5.512	5.537	5.563	5.588	5.613	5.639	5.664	5.690	5.715	5.740	5.766
19	5.791	5.817	5.842	5.867	5.893	5.918	5.944	5.969	5.994	6.020	6.045	6.071
20	6.096	6.121	6.147	6.172	6.198	6.223	6.248	6.274	6.299	6.325	6.350	6.375
21	6.401	6.426	6.452	6.477	6.502	6.528	6.553	6.579	6.604	6.629	6.655	6.680
22	6.706	6.731	6.756	6.782	6.807	6.833	6.858	6.883	6.909	6.934	6.960	6.985
23	7.010	7.036	7.061	7.087	7.112	7.137	7.163	7.188	7.214	7.239	7.264	7.290
24	7.315	7.341	7.366	7.391	7.417	7.442	7.468	7.493	7.518	7.544	7.569	7.595
25	7.620	7.645	7.671	7.696	7.722	7.747	7.772	7.798	7.823	7.849	7.874	7.899
26	7.925	7.950	7.976	8.001	8.026	8.052	8.077	8.103	8.128	8.153	8.179	8.204
27	8.230	8.255	8.280	8.306	8.331	8.357	8.382	8.407	8.433	8.458	8.484	8.509
28	8.534	8.560	8.585	8.611	8.636	8.661	8.687	8.712	8.738	8.763	8.788	8.814
29	8.839	8.865	8.890	8.915	8.941	8.966	8.992	9.017	9.042	9.068	9.093	9.119
30	9.144	9.169	9.195	9.220	9.246	9.271	9.296	9.322	9.347	9.373	9.398	9.423
31	9.449	9.474	9.500	9.525	9.550	9.576	9.601	9.627	9.652	9.677	9.703	9.728
32	9.754	9.779	9.804	9.830	9.855	9.881	9.906	9.931	9.957	9.982	10.008	10.033
33	10.058	10.084	10.109	10.135	10.160	10.185	10.211	10.236	10.262	10.287	10.312	10.338
34	10.363	10.389	10.414	10.439	10.465	10.490	10.516	10.541	10.566	10.592	10.617	10.643
35	10.668	10.693	10.719	10.744	10.770	10.795	10.820	10.846	10.871	10.897	10.922	10.947

La segunda columna es la conversión de pies a metros; las siguientes columnas son la conversión de pulgadas a metros que se suman a la anterior conversión.

Tabla de conversión de pulgadas a milímetros								
Pulgadas	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8
0	0	3.175	6.35	9.525	12.7	15.875	19.05	22.225
1	25.4	28.575	31.75	34.925	38.1	41.275	44.45	47.625
2	50.8	53.975	57.15	60.325	63.5	66.675	69.85	73.025
3	76.2	79.375	82.55	85.725	88.9	92.075	95.25	98.425
4	101.6	104.775	107.95	111.125	114.3	117.475	120.65	123.825
5	127.0	130.175	133.35	136.525	139.7	142.875	146.05	149.225
6	152.4	155.575	158.75	161.925	165.1	168.275	171.45	174.625
7	177.8	180.975	184.15	187.325	190.5	193.675	196.85	200.025
8	203.2	206.375	209.55	212.725	215.9	219.075	222.25	225.425
9	228.6	231.775	234.95	238.125	241.3	244.475	247.65	250.825
10	254.0	257.175	260.35	263.525	266.7	269.875	273.05	276.225
11	279.4	282.575	285.75	288.925	292.1	295.275	298.45	301.625
12	304.8	307.975	311.15	314.325	317.5	320.675	323.85	327.025
13	330.2	333.375	336.55	339.725	342.9	346.075	349.25	352.425
14	355.6	358.775	361.95	365.125	368.3	371.475	374.65	377.825
15	381.0	384.175	387.35	390.525	393.7	396.875	400.05	403.225
16	406.4	409.575	412.75	415.925	419.1	422.275	425.45	428.625
17	431.8	434.975	438.15	441.325	444.5	447.675	450.85	454.025
18	457.2	460.375	463.55	466.725	469.9	473.075	476.25	479.425
19	482.6	485.775	488.95	492.125	495.3	498.475	501.65	504.825
20	508.0	511.175	514.35	517.525	520.7	523.875	527.05	530.225
21	533.4	536.575	539.75	542.925	546.1	549.275	552.45	555.625
22	558.8	561.975	565.15	568.325	571.5	574.675	577.85	581.025
23	584.2	587.375	590.55	593.725	596.9	600.075	603.25	606.425
24	609.6	612.775	615.95	619.125	622.3	625.475	628.65	631.825
25	635.0	638.175	641.35	644.525	647.7	650.875	654.05	657.225
26	660.4	663.575	666.75	669.925	673.1	676.275	679.45	682.625
27	685.8	688.975	692.15	695.325	698.5	701.675	704.85	708.025
28	711.2	714.375	717.55	720.725	723.9	727.075	730.25	733.425
29	736.6	739.775	742.95	746.125	749.3	752.475	755.65	758.825
30	762.0	765.175	768.35	771.525	774.7	777.875	781.05	784.225

Fórmulas generales para la conversión de los diferentes sistemas

Centígrados a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F} = 9/5^{\circ}\text{C} + 32$
Fahrenheit a Centígrados	$^{\circ}\text{C} = 5/9 (^{\circ}\text{F} - 32)$
Réaumur a Centígrados	$^{\circ}\text{C} = 5/4 ^{\circ}\text{R}$
Fahrenheit a Réaumur	$^{\circ}\text{R} = 4/9 (^{\circ}\text{F} - 32)$
Réaumur a Fahrenheit	$^{\circ}\text{F} = (9/4^{\circ}\text{R}) + 32$
Celsius a Kelvin	$^{\circ}\text{K} = 273.15 + ^{\circ}\text{C}$
Fahrenheit a Rankine	$^{\circ}\text{Ra} = 459.67 + ^{\circ}\text{F}$
Rankine a Kelvin	$^{\circ}\text{K} = 5/9^{\circ}\text{Ra}$

Factores químicos de conversión					
	A	B	C	D	E
Constituyentes	eppm a ppm	ppm a epm	eppm a gpg	gpg a epm	ppm a ppm CaCO ₃
calcio Ca ⁺²	20.04	0.04991	1.1719	0.8533	2.4970
hierro Fe ⁺²	27.92	0.03582	1.6327	0.6125	1.7923
magnesio Mg ⁺²	12.16	0.08224	0.7111	1.4063	4.1151
potasio K ⁺¹	39.10	0.02558	2.2865	0.4373	1.2798
sodio Na ⁺¹	23.00	0.04348	1.3450	0.7435	2.1756
bicarbonato (HCO ₃) ⁻¹	61.01	0.01639	3.5678	0.2803	0.8202
carbonato (CO ₃) ⁻²	30.00	0.03333	1.7544	0.5700	1.6680
cloro (Cl) ⁻¹	35.46	0.02820	2.0737	0.4822	1.4112
hidróxido (OH) ⁻¹	17.07	0.05879	0.9947	1.0053	2.9263
nitrito (NO ₂) ⁻¹	62.01	0.01613	3.6263	0.2758	0.8070
fosfato (PO ₄) ⁻³	31.67	0.03158	1.8520	0.5400	1.5800
sulfato (SO ₄) ⁻²	48.04	0.02082	2.8094	0.3559	1.0416
bicarbonato de calcio Ca(HCO ₃) ₂	805.00	0.01234	4.7398	0.2120	0.6174
carbonato de calcio (CaCO ₃)	50.04	0.01998	2.9263	0.3417	1.0000
cloruro de calcio (CaCl ₂)	55.50	0.01802	3.2456	0.3081	0.9016
hidróxido de calcio Ca(OH) ₂	37.05	0.02699	2.1667	0.4615	1.3506
sulfato de calcio (CaSO ₄)	68.07	0.01469	3.9807	0.2512	0.7351
bicarbonato férrico Fe(HCO ₃) ₃	88.93	0.01124	5.2006	0.1923	0.5627
carbonato férrico Fe ₂ (CO ₃) ₃	57.92	0.01727	3.3871	0.2951	0.8640
sulfato férrico Fe ₂ (CO ₄) ₃	75.96	0.01316	4.4421	0.2251	0.6588
bicarbonato magnésico Mg(HCO ₃) ₂	73.17	0.01367	4.2789	0.2337	0.6839
carbonato magnésico (MgCO ₃)	42.16	1.02372	2.4655	0.4056	1.1869
cloruro de magnesio (MgCl ₂)	47.62	0.02100	2.7848	0.3591	1.0508
hidróxido de magnesio Mg(OH) ₂	29.17	0.03428	1.7058	0.5862	1.7155
sulfato de magnesio (MgSO ₄)	60.20	0.01661	3.5202	0.2841	0.6312

eppm = equivalentes por millón

ppm = partes por millón

gpg = granos por galón

p.p.m. CaCO₃ = partes por millón de carbonato de calcio



ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Esquema de un filtro intermitente de arena, a) vista del plano, b) sección transversal del filtro	3
Ilustración 1.2 Instalación de filtro intermitente de arena	4
Ilustración 1.3 Esquema del sistema de distribución de un filtro intermitente de arena	5
Ilustración 1.4 Esquema general del filtro	11
Ilustración 1.5 Resultados del modelo matemático	12
Ilustración 1.6 Curva de bomba propuesta	14
Ilustración 1.7 Arreglo general del filtro	15
Ilustración 2.1 Ejemplo de un filtro verde	20
Ilustración 2.2 Sistemas de infiltración con recuperación de agua tratada	29
Ilustración 2.3 Infiltración rápida	32
Ilustración 3.1 Esquema de una zanja filtrante	44
Ilustración 3.2 Tubería con barrenos para zanjas	45
Ilustración 3.3 Ejemplo de zanjas filtrantes	46
Ilustración 3.4 Características constructivas de las zanjas filtrantes (acotaciones en metros)	47
Ilustración 3.5 Esquema de un lecho filtrante	49
Ilustración 3.6 Ejemplo de un sistema de riego subterráneo	49
Ilustración 3.7 Ejemplo de lecho filtrante en el medio urbano	50
Ilustración 3.8 Características constructivas de un lecho filtrante	51
Ilustración 3.9 Esquema de un pozo filtrante	52
Ilustración 3.10 Anillos de concreto para pozos	53
Ilustración 3.11 Características constructivas de un pozo filtrante	54
Ilustración 4.1 Salinidad del suelo (IMTA, 2010)	62
Ilustración 4.2 Aspersores fijos	66
Ilustración 4.3 Ejemplos de riego móvil	67
Ilustración 4.4 Riego por surcos	69
Ilustración 4.5 Ejemplo de riego por inundación	70
Ilustración 4.6 Riego localizado por goteo	70



TABLAS

Tabla 1.1 Criterios de diseño recomendados para filtros intermitentes de arena	9
Tabla 2.1 Datos para ejemplo	25
Tabla 2.2 Agua neta requerida por la vegetación	25
Tabla 2.3 Capacidad de asimilación hidráulica del sistema suelo – planta	26
Tabla 2.4 Comparación de resultados	26
Tabla 2.5 Ciclos de carga sugeridos para infiltración rápida	31
Tabla 2.6 Número mínimo de cuencas requeridas para un flujo continuo de agua residual y aplicación de un año (Sherwood1995)	33
Tabla 3.1 Distancia mínima desde la zanja	45
Tabla 3.2 Recomendaciones para el diseño de las zanjas y lechos filtrantes	47
Tabla 3.3 Recomendaciones para el diseño de lechos filtrantes	50
Tabla 3.4 Distancia mínima desde el pozo	53
Tabla 3.5 Recomendaciones para el diseño de pozos filtrantes	53
Tabla 4.1 Parámetros de calidad	56
Tabla 4.2 Límites máximos permisibles para contaminantes básicos (NOM-001-SEMARNAT-1996)	57
Tabla 4.3 Límites máximos permisibles para metales pesados y cianuros	58
Tabla 4.4 Clasificación de salinidad (IMTA, 2010)	60
Tabla 4.5 Clasificación de los suelos salinos (IMTA, 2010)	62
Tabla 4.6 Concentraciones máximas de micro elementos recomendadas en aguas de riego	63
Tabla 4.7 Parámetros microbiológicos requeridos para las aguas de riego	66
Tabla 4.8 Parámetros complementarios requeridos para riego	68

