

MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: HUMEDALES ARTIFICIALES

30



MANUAL DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO

DISEÑO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES: HUMEDALES ARTIFICIALES

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA

Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento
Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Humedales Artificiales

ISBN: 978-607-626-010-4

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

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

Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento

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

CONTENIDO

Presentación	V
Objetivo general	VII
Introducción a Diseño de Humedales Artificiales	IX
1. Aspectos generales	1
1.1. Perspectiva histórica	1
1.2. Clasificación	1
1.3. Mecanismos de reducción de contaminantes	3
1.4. Macrófitas	8
2. Diseño	17
2.1. Principios	17
2.2. Aspectos físicos y constructivos	23
2.2.1. Selección del sitio	23
2.2.2. Aspectos topográficos y geotécnicos	24
2.2.3. Selección de materiales	30
2.2.4. Rejillas y desarenadores	30
2.2.5. Canales y tuberías	33
2.2.6. Derivación de caudal	34
2.2.7. Bordos	35
2.2.8. Protección de las instalaciones	38
2.2.9. Geometría	39
2.2.10. Impermeabilización	40
2.2.11. Recirculación	43
2.3. Humedal de flujo subsuperficial	49
2.3.1. Profundidad de los lechos	49
2.3.2. Material de empaque	51
2.3.3. Siembra de especies	52
2.3.4. Recomendaciones de diseño	54
2.3.5. Aspectos hidráulicos	56
2.3.6. Ejercicios de diseño	58
2.4. Humedales de flujo superficial	64
2.4.1. Profundidad	64
2.4.2. Vegetación utilizada y siembra de especies	65
2.4.3. Criterios de diseño	65
2.4.4. Arranque del sistema	74
2.4.5. Consideraciones hidráulicas	75

3. Consideraciones de planeación	79
3.1. Ventajas y desventajas	79
3.2. Aspectos técnicos	82
3.3. Aspectos ambientales	83
3.4. Aspectos económicos	83
Conclusiones	85
Anexos	
A. Operación y mantenimiento	87
Bibliografía	95
Glosario	101
Simbología	105
Tabla de conversiones de unidades de medida	107
Ilustraciones	117
Tablas	119

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 DISEÑO DE HUMEDALES ARTIFICIALES

La falta de recursos económicos limita la construcción, operación y mantenimiento de sistemas que utilizan energía eléctrica para su funcionamiento y requieren de equipos electromecánicos costosos (Lahe-
ra, 2010; Rojas, 2012). El problema se incrementa si se consideran los costos de tratamiento, estabilización y disposición de lodos y los correspondientes al tratamiento avanzado para la remoción de nutrientes (N y P). La calidad del agua de los cuerpos receptores es susceptible de deterioro, entre otras causas, por el aumento de la población, mayor producción de aguas residuales domésticas e industriales y las generadas en el sector agropecuario.

En México existen un gran número de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales municipales; sin embargo, evaluar el dimensionamiento es complejo, por las condiciones particulares de cada lugar, así como de los modelos desarrollados por tal fin. En los humedales artificiales como en los naturales hay una compleja interacción entre sus diferentes componentes (especies vegetales, medio de soporte, bacterias, agua) de tal forma que tienen la capacidad de remover contaminantes a través de diversos procesos físicos, químicos y biológicos (Bernal *et al.* 2003).

En los humedales artificiales se emulan los procesos de autopurificación existentes en los naturales (Kadlec y Knight, 1996), al reducir las deficiencias hidráulicas y considerar las cinéticas de remoción de contaminantes para su diseño, los costos de tratamiento son sustancialmente menores que los sistemas mecanizados y resisten variaciones de carga hidráulica y orgánica, razones por las que se considera como una alternativa tecnológica para su aplicación en zonas donde la disponibilidad de terreno no es inconveniente. Cabe destacar que cuando la topografía del terreno lo permite, es posible su combinación con otros sistemas de tratamiento previo, como son los reactores anaerobios de flujo ascendente o los filtros rociadores.

Los humedales artificiales tienen como ventaja en comparación con los sistemas intensivos, una menor emisión de malos olores y ruido, requieren de una sencilla operación y mantenimiento, son estéticos y demandan menores costos de tratamiento al no requerir de energía eléctrica para su funcionamiento.

Para el diseño de los humedales artificiales es más frecuente el uso de modelos no mecanísticos (aquellos que no consideran el análisis de incertidumbre estadística). Los más utilizados son los de la Environmental Protection Agency (1998) y el modelo k-C* de Kadlec y Knight (1996). La mayor variabilidad en los diseños se da por el uso de las constantes cinéticas, las cuales deberían ser obtenidas para cada zona geográfica en particular, ya que las reportadas en bibliografía generalmente fueron obtenidas bajo condiciones particulares de clima y condiciones hidráulicas particulares, por lo que es necesario tener sus reservas en el uso de estos valores. Ahora bien, en los humedales la remoción de nutrientes es limitada, pero es posible el diseño para este propósito; para tal caso es necesario evaluar el costo-beneficio, ya que es posible que la remoción del nutriente no sea significativa comparada con la demanda de área, es entonces cuando se debe evaluar la combinación con otros procesos, como los filtros rociadores. Por ejemplo, la remoción de nitrógeno pudiera ser significativa, siempre y cuando en el afluente del humedal el nitrógeno se encuentre en forma de nitrato.

Actualmente los humedales artificiales son utilizados ya sea de manera individual o de manera combinada con otros procesos. De acuerdo con el *Inventario Nacional de Plantas de Tratamiento* (CONAGUA, 2014) existen en México 2 337 plantas en operación, de las cuales 211 (11.08 por ciento del total) corresponden a humedales artificiales, lo que indica la importancia del desarrollo de esta alternativa de tratamiento de aguas residuales, tanto en áreas rurales, así como en ciudades con caudales hasta de 120 litros por segundo. Los menores costos de operación corresponden a los sistemas extensivos de tratamiento por sus mínimos requerimientos de energía eléctrica para su funcionamiento y por su operación simple (Mena *et al.*, 2008). En contraste, la principal desventaja de estos sistemas es que demandan áreas mucho mayores que los sistemas intensivos (como lodos activados) (García *et al.*, 2004).

Los humedales artificiales se consideran un tratamiento de tipo extensivo, o sistema de tratamiento natural, por lograr la degradación de contaminantes de las aguas residuales a través de mecanismos y procesos naturales, los cuales no requieren de aditivos químicos ni de energía externa (Arias y Brix, 2003). Estos sistemas pueden ser utilizados en ambientes con climas fríos (Jenssen *et al.*, 2005), y constituyen una alternativa para la remoción de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y potasio, en combinación con otros procesos extensivos o procesos intensivos (Agniezka, 2011).

Los humedales reciben varios nombres en español, como humedales construidos (Kadlec y Knight, 1996), humedales creados, humedales artificiales, pantanos artificiales, lechos de plantas, lechos de hidrófitas, filtro de plantas, lechos de raíces.

En este libro se presenta una breve reseña histórica del desarrollo y uso de los humedales artificiales, su clasificación, estructura, funcionalidad, mecanismos de remoción, especies vegetales, aplicaciones frecuentes, ventajas, desventajas, diseño y algunos aspectos relacionados con la operación y mantenimiento.

El objetivo es proporcionar una referencia para los diseñadores, evaluadores, y tomadores de decisiones en relación al uso de los humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales de tipo municipal; su estructura, funcionalidad, diseño, ventajas y desventajas, aplicaciones, las labores rutinarias de operación y mantenimiento. Sin embargo, no se debe considerar como una estandarización, garantía o referencia absoluta para algún documento legal, ya que cada caso debe ser analizado bajo condiciones particulares.



1

ASPECTOS GENERALES

1.1. PERSPECTIVA HISTÓRICA

Los humedales naturales, aparte de ser un gran ecosistema y un importante hábitat para muchos seres vivos intensivos, actúan como filtros naturales de agua, esto se debe a que las plantas hidrófitas, que conforman al humedal, en sus tejidos almacenan y liberan agua, y de esta forma comienzan con el proceso de filtración. Antiguamente los humedales eran drenados por ser considerados una simple inundación de los terrenos, pero hoy en día se sabe que los humedales representan un gran ecosistema y se los valora más.

Sin embargo, por descuido o desconocimiento, también han sido receptores de descargas de agua residuales desde hace más de un siglo (Wallace y Knight, 2006; Vymazal y Kröpfelová, 2008). La observación de la mejora en la calidad del agua en estos humedales naturales, dio lugar al desarrollo de humedales artificiales, donde se emulan los procesos de purificación existentes en los primeros (EPA, 2000a). El inicio fue en Alemania a comienzos de los años sesenta donde se crearon pequeños prototipos.

Los humedales artificiales inicialmente fueron utilizados para la depuración de descargas con baja concentración de materiales orgánicos, o bien para el tratamiento de aguas grises, sin embargo, a partir de los años ochenta comenzaron a utilizarse en sistemas de mayor capacidad, es

decir para mayores caudales. Durante los años noventa fueron diseñados para una diversidad de aplicaciones entre las que se incluyen el tratamiento de las aguas residuales municipales, aguas de retorno agrícola y las relacionadas con algunas industrias generadoras de aguas residuales de tipo orgánico. Para el año 2000 se habían formado un sin número de agrupaciones científicas involucradas con el desarrollo y mejoramiento de la tecnología, con importantes avances en el conocimiento de los mecanismos físicos, químicos, biológicos e hidráulicos (Vymazal y Kröpfelová, 2008; Rodríguez, 2003).

Actualmente, en México se han construido humedales de flujo subsuperficial y se ha reportado una alta remoción de sólidos suspendidos (SST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), nitrógeno (N) y patógenos. No obstante el desarrollo importante de la tecnología y de la acumulación de nuevo conocimiento se tienen aún grandes vacíos de los fenómenos que intervienen en la depuración del agua mediante estos sistemas, de tal manera que se presenta la enorme oportunidad para realizar nuevos estudios que permitan obtener mejores y más eficientes diseños (Kadlec y Wallace, 2009).

1.2. CLASIFICACIÓN

Los humedales artificiales son concebidos como sistemas de depuración de aguas residuales en los que se incorporan elementos de ingeniería, diseñados, construidos y operados con propósi-

tos específicos para una calidad de agua esperada, en función de un requerimiento de reúso o normativo. Mediante la remoción de materia orgánica permite mejorar considerablemente la calidad del agua (Kadlec y Knight, 1996). Lo anterior se logra mediante el control hipotético de los mecanismos de purificación existentes en los sistemas naturales. Los humedales artificiales se clasifican en:

- Humedales de flujo subsuperficial (HFSS)

Los sistemas de flujo subsuperficial, se caracterizan por que la circulación del agua en los mismos se realiza a través de un medio granular, con una profundidad que depende de la profundidad que pueden alcanzar las raíces de las plantas. La vegetación se planta en este medio granular y el agua está en contacto con los rizomas y raíces de las plantas. En función de su configuración hidráulica, pueden ser de flujo horizontal o flujo vertical

Los sistemas verticales con flujo subsuperficial son cargados intermitentemente. De esta forma, las condiciones de saturación con agua en la cama matriz son seguidas por períodos de insaturación, estimulando el suministro de oxígeno. Hay muchas posibilidades de variar la distribución de intervalos, la composición de la cama, matriz y los resultados que se han obtenido son prometedores. Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arenas, gravas) y se recogen en una red de drenaje situada en el fondo del humedal. La aplicación de agua se efectúa de forma intermitente, para preservar y estimular al máximo las condiciones aerobias. La vegetación emergente se planta también

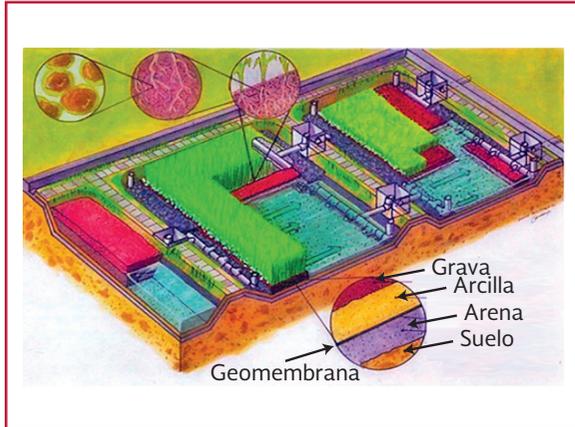
en este medio granular. Adicionalmente, para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías cribadas con salidas al exterior. A diferencia del humedal subsuperficial de flujo horizontal, el sustrato está constituido por varias capas, encontrándose las más finas en la parte superior, aumentando el diámetro de la grava hacia abajo

- Humedales de flujo superficial (HFS).

Los sistemas de flujo superficial son aquellos donde el agua circula preferentemente a través de los tallos de las plantas y está expuesta directamente a la atmósfera. Este tipo de humedales es una modificación al sistema de lagunas convencionales. A diferencia de éstas, tienen menor profundidad (no más de 0.6 m) y tienen plantas. Estos sistemas requieren más área que los de tipo subsuperficial y son una alternativa para cuando se requiere la remoción de nutrientes, en específico del fósforo

Para el caso de los HFSS, Lara (1999) cita que debido al lecho filtrante existente se obtienen mayores tasas de reacción y por lo tanto se requerirá de una menor área superficial que los HFS; comenta además, que debido a que el agua fluye por debajo de la superficie del medio granular, se evitan posibles problemas de mosquitos, cosa que no sucede con los sistemas de flujo superficial, en donde estos insectos depositan sus huevecillos directamente sobre la superficie del agua. Igualmente se evitan problemas en climas fríos, ya que esta capa superficial no inundada constituye una mayor protección térmica. En la Ilustración 1.1 se observa un humedal de flujo subterráneo con sus principales componentes.

Ilustración 1.1 Componentes principales de un humedal de flujo subsuperficial



Por otro lado, los humedales de flujo superficial están constituidos básicamente por un estanque de poca profundidad, aislado por una geomembrana para evitar infiltraciones o bien se construyen en terrenos con baja permeabilidad hidráulica; incluyen en su superficie macrófitas flotantes o bien plantas emergentes enraizadas en el fondo (Fernández *et al.*, 2004). La superficie de agua está expuesta a la atmósfera. El líquido se mueve a través del humedal a bajas velocidades de manera quiescente. El humedal necesita ser drenado, por lo que la parte inferior debe tener una pendiente de uno por ciento o menos (EPA, 2000a). Para el diseño de los humedales artificiales, se sugiere una pendiente de 0.05 por ciento. En la Ilustración 1.2 se observa

detalle de un corte transversal (a) y el aspecto general de un humedal de flujo superficial (b).

1.3. MECANISMOS DE REDUCCIÓN DE CONTAMINANTES

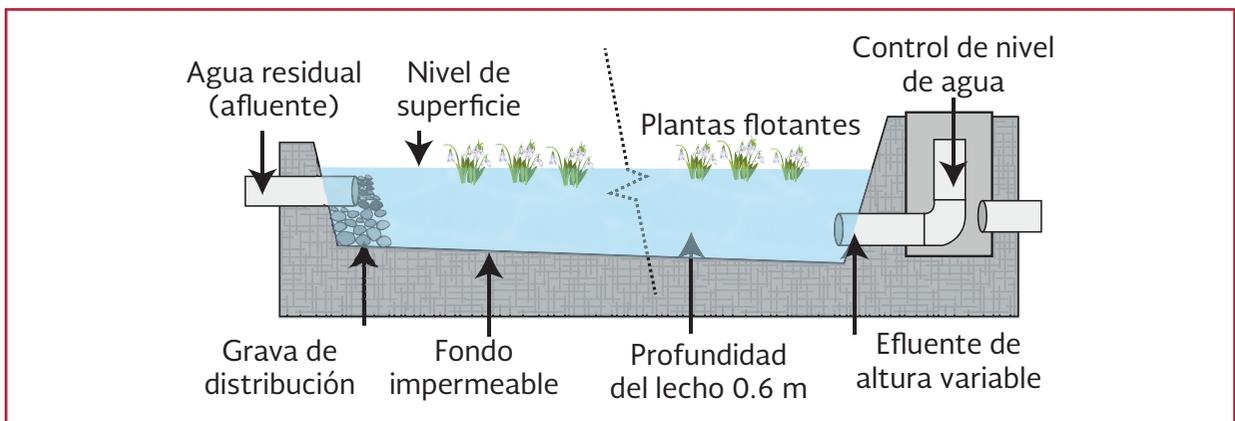
De acuerdo con Arias y Brix (2003), los procesos que intervienen en la remoción de contaminantes mediante los humedales artificiales se clasifican en:

- Físicos (filtración, sedimentación y fisiorción)
- Químicos (precipitación, quimisorción, hidrólisis, oxidación y reducción)
- Biológicos (interacción de especies vegetales, microorganismos adheridos a las raíces de las plantas)

Las especies vegetales, los microorganismos y el medio filtrante, son aspectos que tienen una influencia directa sobre estos procesos fisicoquímicos y biológicos (CONAGUA, 2007 a).

Los productos metabólicos obtenidos por la degradación de la materia orgánica, compuestos nitrogenados, fósforo, potasio y otros minerales, son utilizados por las especies vegetales, las que

Ilustración 1.2 Bosquejo de corte transversal de un humedal de flujo superficial



a su vez proporcionan a los microorganismos el oxígeno que se requiere como aceptor de electrones, conduciéndolo vascularmente, desde las hojas hasta las raíces (Fernández *et al.*, 2004).

El medio filtrante provee el soporte y la superficie para el desarrollo de los microorganismos, los cuales reducen anaerobiamente (y/o anóxicamente, si el nitrato está presente) a los contaminantes orgánicos en dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄); igualmente actúa como un simple filtro para la retención de sólidos suspendidos (Conagua, 2007a); el lecho también da soporte a las especies vegetales que sobre él se siembran e intervienen en el tratamiento del agua residual (Cooper *et al.*, 1996; Vymazal y Kröpfelová, 2008).

Los humedales tienen tres funciones básicas que les confieren atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento (Lara, 1999). Constituyen «fitosistemas», porque emplean la energía solar a través de la fotosíntesis. Básicamente, se trata de captar la luz solar y transformarla en energía química, que es usada en su metabolismo para realizar funciones vitales y como consecuencia indirecta se remueven contaminantes de las aguas (Delgadillo *et al.*, 2010).

Adicionalmente las especies vegetales liberan metabolitos que los microorganismos aprovechan como alimento. Las superficies de raíces, tallos y hojas ofrecen protección y hospedaje a los microorganismos. El resultado es una gran velocidad de degradación y remoción de conta-

minantes (Fernández *et al.*, 2004). A continuación se puntualizan algunos aspectos relevantes que se presentan en los humedales artificiales.

- La remoción física de DBO se logra rápidamente mediante la sedimentación de materia orgánica particulada en los espacios vacíos del medio de empaque. La materia orgánica soluble, sin embargo, se remueve a partir de la utilización como sustrato para los microorganismos que crecen en la superficie del medio o que se encuentran adheridos en las raíces y rizomas de las plantas que penetran el medio. Se esperan mínimas concentraciones de oxígeno disuelto sobre la superficie de las raíces de las plantas, pero en el resto del lecho se espera que las condiciones sean predominantemente anaerobias
- El mecanismo de remoción de nitrógeno en los humedales es la nitrificación-desnitrificación. El oxígeno requerido para la nitrificación se obtiene a partir de la atmósfera y a través de la transferencia de los rizomas, por tanto, la concentración de oxígeno disuelto es el factor limitante para llevar a cabo la nitrificación dentro del humedal. Aunque depende del diseño y operación, en humedales de flujo subsuperficial se espera una remoción máxima de entre 20 y 30 por ciento
- La remoción de fósforo en los humedales es consecuencia de procesos como asimilación, formación de complejos, reacciones químicas que generen compuestos precipitables, precipitación y por acumulación de materia orgánica. Los humedales de flujo superficial generalmente son diseñados para la remoción de este contaminante, por la

- remoción que pueden ser alcanzadas
- La función más importante de las macrófitas con respecto del tratamiento del agua residual está relacionado con los aspectos

Tabla 1.1 Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales de flujo subsuperficial

Contaminante	Mecanismo
Materia orgánica (medida como DBO, DQO o COT*)	La materia orgánica particulada es eliminada por la sedimentación y filtración, luego convertidas a DBO soluble. La materia orgánica soluble es fijada y asimilada por la biopelícula y degradadas por las bacterias adheridas en esta.
Sólidos suspendidos totales	Sedimentación y filtración. Descomposición durante los largos tiempos de retención por bacterias especializadas en el lecho de arena.
Nitrógeno	Nitrificación-desnitrificación en la biopelícula. Asimilación de las especies vegetales (influencia limitada).
Fósforo	Retención en el lecho de arena. Precipitación con aluminio, hierro y calcio. Asimilación de las especies vegetales (influencia limitada).
Patógenos	Sedimentación y filtración. Asimilación en la biopelícula. Depredación por protozoarios.
Metales pesados	Precipitación y Asimilación. Asimilación de las especies vegetales (influencia limitada).
Contaminantes orgánicos	Asimilación por la biopelícula y partículas de arena. Descomposición debido a lo largo del tiempo de retención hidráulica y a las bacterias especializadas del suelo (no calculable).

*Carbono orgánico total

físicos del lecho. Las macrófitas estabilizan la superficie del medio de empaque, proveen condiciones adecuadas de filtración, aíslan la superficie del humedal durante las temporadas frías y provee una enorme área superficial de adherencia para el crecimiento de microorganismos. Contrariamente a lo que se cree, el crecimiento de las plantas no incrementa la conductividad hidráulica del medio (Brix, H., 1997) y finalmente provee de oxígeno disuelto a través de los rizomas

En la Tabla 1.1, se presenta un resumen de los mecanismos de remoción que intervienen en la eliminación de contaminantes en los humedales de flujo subsuperficial (Hoffman y Platzer, 2011).

En humedales de flujo superficial, Wallace y Knight (2006) clasifican los mecanismos de remoción en físicos, químicos y biológicos, los cuales se presentan en la Tabla 1.2. Un contaminante específico se puede remover por uno o más mecanismos de manera simultánea o secuencialmente.

En los humedales artificiales de flujo superficial el mecanismo principal de remoción de sólidos suspendidos es la sedimentación (Sherwood *et al.*, 1995) y en un sistema de flujo subterrá-

Tabla 1.2 Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales de flujo superficial

Parámetro	Mecanismo		
	Físico	Químico	Biológico
Sólidos suspendidos	Sedimentación	No aplica	Degradación microbiana
DBO	Sedimentación	Radiación UV	Degradación microbiana
DQO	Sedimentación	Radiación UV	Degradación microbiana
Compuestos de nitrógeno (N orgánico, NH ₃ , NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻)	Sedimentación	Asimilación, volatilización (amonio)	Asimilación por especies vegetales y microorganismos
Fósforo orgánico e inorgánico	Sedimentación	Precipitación, Asimilación	Asimilación por especies vegetales y microorganismos
Patógenos (bacterias, virus, protozoarios, helmintos)	Sedimentación	Radiación UV	Mortandad, depredación microbiana

neo además de la sedimentación se presenta la filtración a través del medio formado por el sustrato y las raíces de las especies vegetales (García *et al.*, 2004). Las variaciones fuertes de caudal y concentración de SS pueden afectar la eficiencia del sistema, especialmente si no se cuenta con pretratamiento (desarenador y rejillas), el cual es necesario que se instale si se presentan altas concentraciones de carga orgánica y de sólidos, de lo contrario los humedales se colmatan, y las tuberías y canales se obstruyen o desgastan.

Las aguas residuales industriales y municipales contienen concentraciones variables de compuestos orgánicos sintéticos. Entre 1960 y 1970 los investigadores se percataron de la tendencia de algunos contaminantes orgánicos para resistir la remoción en tratamientos de aguas residuales convencionales y su permanencia en el ambiente por muy largos periodos. Además observaron que permanecían en la cadena alimenticia, ya que muchos de sus compuestos tóxicos aparecían en ella. Como esto es perjudicial se implementaron diversos métodos, entre ellos los humedales artificiales y se observó que la Asimilación de trazas orgánicas por materia orgánica y partículas de arcilla presentes en el sistema de tratamiento pasó a ser el mecanismo fisicoquímico esencial para remoción de compuestos refractarios en humedales artificiales (Lara, 1999).

Los metales pesados son otros contaminantes ambientales producidos como resultado de actividades industriales, comerciales y domésticas (Sherwood *et al.*, 1995). El objetivo del tratamiento para metales pesados es remover los metales del sitio contaminado y de las cadenas

alimenticias, principalmente las de los ríos y océanos.

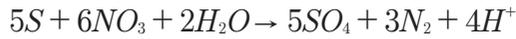
Para la remoción de metales pesados los principales métodos son: precipitación química, electrólisis, ósmosis inversa e intercambio iónico (Fernández *et al.*, 2004), pero tienen la desventaja de que son procesos de gran inversión y costos de operación y mantenimiento elevados, además de un incremento en los costos de energía eléctrica. Los metales pesados se pueden depositar en tierras acondicionadas o humedales artificiales, dependiendo los metales que se quieran remover.

Por otro lado, las bacterias patógenas y virus son removidos en los humedales artificiales por depredación, sedimentación, asimilación, radiación UV, y temperaturas no óptimas para el desarrollo de microorganismos (Kadlec y Knight, 1996; Dinges, 1982). Un experimento realizado fue el de medir la velocidad de inactivación de bacterias coliformes en bolsas selladas con incubación *in situ* bajo la superficie de la grava en un sistema de flujo subterráneo. El resultado obtenido fue que la velocidad de descomposición en el humedal fue dos veces mayor que la velocidad de descomposición *in situ* en las bolsas, las cuales no estaban en contacto con la vegetación incluyendo asimilación bacteriana por la superficie de las raíces y biopelícula de sustrato.

Las reacciones que se presentan de manera más frecuente en el área del tratamiento (Dinges, 1982) son de tres tipos: a) anaerobias no fotosintéticas, b) bacterianas aerobias no fotosintéticas y c) fotosintéticas.

a) Reacciones anaerobias no fotosintéticas
(ausencia de oxígeno molecular)

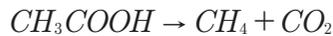
1. Reducción de nitrato (desnitrificación)



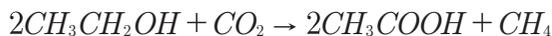
2. Reducción del sulfato



3. Reducción del carbono orgánico (fermentación)

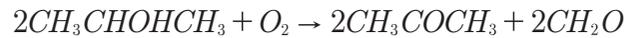
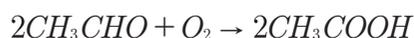
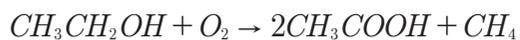


4. Reducción del dióxido de carbono

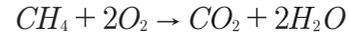
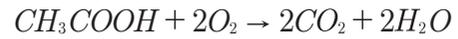
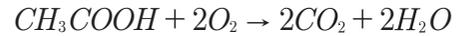


b) Reacciones bacterianas aerobias no fotosintéticas

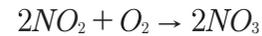
1. Sistema limitado de oxígeno



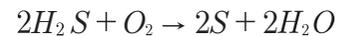
2. Oxidación completa



3. Nitrificación



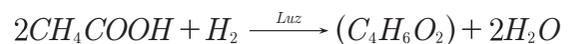
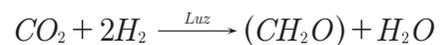
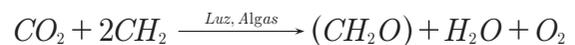
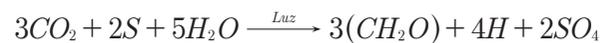
4. Oxidación del azufre



5. Fijación del nitrógeno



c) Reacciones fotosintéticas



En resumen puede decirse que son varios los procesos que intervienen en la depuración del agua, los que se presentan de manera simultánea tanto en la depuración natural, como en las plantas de tratamiento, solamente que en estas últimas los fenómenos y reacciones se desarrollan de una manera controlada, por lo que la velocidad de remoción de contaminantes es mayor.

En los sistemas de tratamiento se tiene una mayor demanda de energía, la que debe suministrarse por medios mecánicos o biológicos, sin embargo, se puede ejercer un control sobre diversas variables como son cantidad y calidad de alimento, tipo de microorganismos (aerobios o anaerobios), tiempos de retención hidráulica, concentración de oxígeno y combinación de procesos.

1.4. MACRÓFITAS

Las especies vegetales que crecen en los humedales naturales son usualmente denominadas macrófitas, la presencia o ausencia de las macrófitas en los humedales es uno de los aspectos importantes en la definición de los humedales, por lo que son un componente indispensable en estos ecosistemas. Las macrófitas, tal y como ocurre en otros organismos fotoautótrofos, usan la energía solar para simular el carbono inorgánico de la atmósfera para producir materia orgánica, lo cual subsecuentemente es la fuente de energía para los heterótrofos.

Los movimientos de las plantas como consecuencia del viento, mantiene abierta la superficie del medio, además el crecimiento de las raíces dentro del medio ayuda a disminuir la colmatación del medio. Las plantas también permiten atenuar la luz solar, por lo tanto se previene la formación de algas.

Como consecuencia del decaimiento o degradación de las raíces y rizomas, éstas se degradan formando canales tubulares también llamados «macroporos», lo cual a decir de algunos autores incrementan y estabilizan la conductividad hidráulica del suelo. En la Tabla 1.3, se presenta un resumen con la importancia de las plantas en los humedales artificiales.

Tabla 1.3 Importancia de los componentes de las macrófitas en los humedales artificiales

Propiedad	Importancia para el proceso
Tejido aéreo de la planta	Atenuación de la luz.- Reduce el crecimiento de algas. Influencia en el microclima.- Aislamiento en el invierno. Minimiza el impacto de la velocidad del viento.- Reduce el riesgo de resuspensión. Almacenamiento de nutrientes.
Tejido de la planta en contacto con el agua	Efecto de filtración. Reduce la velocidad de la corriente y el incremento de esta forma la tasa de sedimentación. Incrementa el área superficial disponible para el crecimiento de biopelícula. Excreción de oxígeno fotosintético que permite la degradación aerobia de contaminantes. Asimilación de nutrientes.
Raíces y rizomas	Previene la obstrucción del medio, principalmente en humedales de flujo vertical. Liberación de oxígeno que permita la degradación en condiciones aerobias. Estabilizan la superficie de los humedales, disminuyendo el fenómeno de erosión.

Existe una gran diversidad de especies vegetales que pueden utilizarse en los humedales artificiales, que además pueden aprovecharse en otras actividades como son:

- Materia prima para la manufactura de artesanías, como ejemplo la macrófita conocida comúnmente como tule (*Thypha sp*) es factible de utilizarse para la elaboración de petates, moisés para bebés, sopladores manuales, entre otros

- Especies vegetales de ornato, el alcatraz o cala (*Zantedeschia aethiopica*)
- Las hojas del carrizo se aprovechan como forraje y su tallo para la elaboración de muebles, puertas, cortinas
- La lechuga de agua (*Pistia stratiotes*) tiene un valor comercial, tanto como especie de ornato, como por su aprovechamiento como forraje, alimento para peces por su alto valor nutritivo (Rodríguez *et al.*, 2000), o con fines medicinales, ya que es una macrófita con propiedades terapéuticas y preventivas

Las especies vegetales remueven los contaminantes mediante:

- Asimilación directa dentro de sus tejidos
- Estabilización de la conductividad hidráulica del suelo, en donde se depositan el fósforo y metales pesados.
- Proporcionan un medio ambiente adecuado para la actividad microbiana a través del transporte de oxígeno a la rizósfera, por lo que estimulan la degradación aeróbica de la materia orgánica y el crecimiento de bac-

terias nitrificantes (Brix, 1987; Brix, 1994)

- En los humedales de flujo superficial, las porciones sumergidas de las hojas y tallos muertos se degradan y se convierten en restos de vegetación, que sirven como medio para el crecimiento de la biopelícula microbiana, que es la responsable de gran parte del tratamiento (Lara, 1999)

En la Tabla 1.4 se muestran las especies vegetales que se utilizan con mayor frecuencia a nivel internacional, así como su aplicación en función del tipo de humedal (Kadlec y Knight, 1996; EPA, 1988, 2000a).

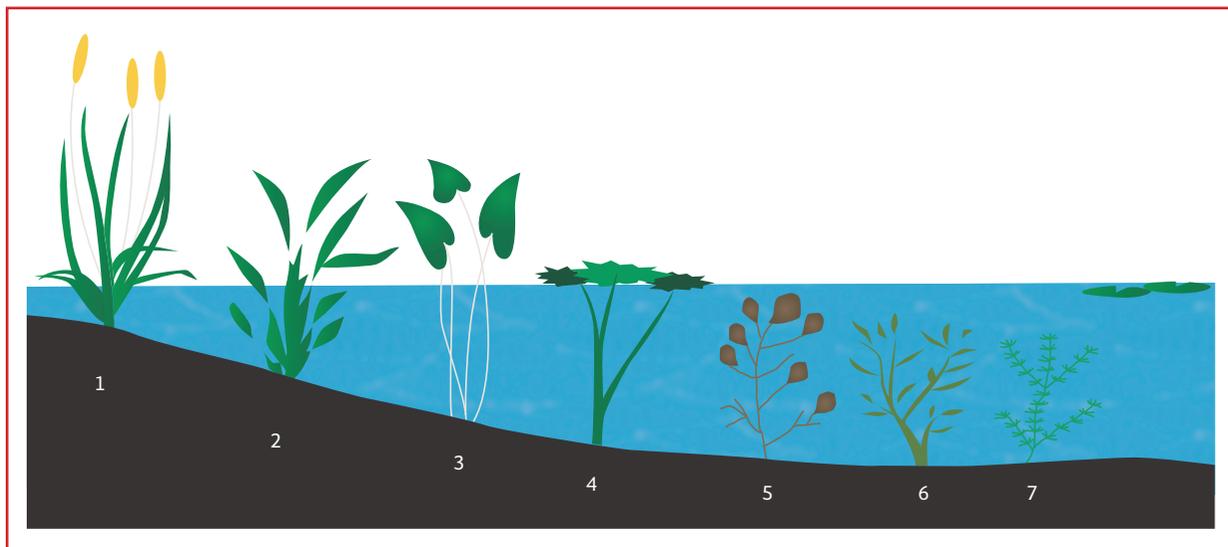
De acuerdo con Fernández *et al.* (2004), dependiendo del lugar donde se desarrollen (Ilustración 1.3) dentro del cuerpo de agua, las macrófitas se clasifican en:

- Flotantes: Que son especies vegetales que viven en la superficie del agua, tales como *Eichornia crassipes* (“lirio acuático”) y *Lemna sp* (“Lenteja de agua”), entre las más usadas

Tabla 1.4 Especies vegetales utilizadas en los humedales artificiales

Sistemas de flujo superficial (especies flotantes o sumergidas)		Sistemas de flujo subsuperficial (especies emergentes)	
Nombre científico	Nombre común	Nombre científico	Nombre común
<i>Eichornia crassipes</i>	Jacinto o lirio acuático	<i>Typha angustifolia</i>	Tule
<i>Lemna sp</i>	Lenteja de agua	<i>Typha latifolia</i>	Tule, espadaña
<i>Wolffia sp</i>		<i>Scirpus sp</i>	Tule, Junco
<i>Pistia stratiotes</i>	Lechuga de agua	<i>Carex sp</i>	Junco
<i>Elodea canadensis</i>		<i>Eleocharis sp</i>	Junco
<i>Hydrilla verticillata</i>		<i>Juncus sp.</i>	Junco
<i>Limnobium stoloniferum</i>	Cucharita, Chilicastle tostón	<i>Arundo donax</i>	Caña
<i>Lemna gibba</i>	Lenteja de agua	<i>Pragmites communis</i>	Carrizo
		<i>Phragmites australis</i>	
		<i>Schoenoplectus californicus</i>	Junco
		<i>Cyperus papyrus</i>	Papiro
		<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Alcatraz o cala

Ilustración 1.3 Clasificación de macrófitas: Emergentes (1-4), sumergidas (5-7), flotantes (8) (Odum, 1972)



- Emergentes: Fijan sus raíces al fondo pero crecen lo suficiente para que sus hojas aprovechen la luz fuera del agua, como la *Typha sp* (“tule”) y *Juncus sp* (“junco”). Las macrófitas emergentes tienen la capacidad de crecer en un amplio intervalo de sustratos y en diferentes aguas residuales
- Sumergidas: Se desarrollan exclusivamente dentro del agua como la *Elodea canadensis* (“elodea”) y la *potamogeton sp* (“espiga de agua”, “pasto de agua” o “lila de agua”)

Estrada (2010), menciona que la selección de macrófitas está en función del tipo de humedal artificial:

- Humedal de flujo superficial: utilizar macrófitas sumergidas, flotantes y/o emergentes
- Humedal de flujo subsuperficial: utiliza macrófitas emergentes

En los HFSS se desarrollan macrófitas de tipo emergente, que utilizan como soporte el lecho

filtrante; la raíz crece dentro del área inundada (Iowa DNR, 2007).

Lara (1999), Seoáñez y Gutiérrez (1999), mencionan que para la selección de macrófitas a utilizarse se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tipo de humedal
- Profundidad de la instalación
- Utilizar especies locales
- Tolerancia a condiciones climáticas adversas
- Velocidad fotosintética alta
- Eficiente transporte de oxígeno
- Las especies deben tolerar y asimilar altas cargas de contaminantes
- Resistencia a insectos y enfermedades
- Facilidad de control

La Tabla 1.5 muestra una serie de especies vegetales comúnmente utilizadas en humedales artificiales, presentando su eficiencia de transporte de oxígeno, así como la tolerancia a cargas de diferentes contaminantes.

Tabla 1.5 Eficiencia de transporte de oxígeno y tolerancia a cargas orgánicas de diferentes macrófitas

Nombre científico	Nombre común	Eficiencia de transporte de Oxígeno (mg O ₂ /g h)	Tolerancia a cargas de contaminantes
<i>Cyperus haspensis</i>	Papiro enano	-	Tolerante a la exposición de lixiviados (Aulestia, 2012).
<i>Cyperus papyrus</i>	Papiro Egipto	-	Tolerante a cargas orgánicas de los efluentes de aguas residuales (Pérez <i>et al.</i> , 2012)
<i>Eichhornia crassipes</i>	Lirio acuático, Jacinto, huachinango, oreja de ratón	1.29+-1.18 1.27+-0.61 0.31+-0.11 0.12+-0.14	Puede tolerar fluctuaciones grandes con respecto a altura de la capa de agua, velocidad del flujo, disponibilidad de nutrientes, pH, contaminación y salinidad (Fernández <i>et al.</i> , 2004).
<i>Elodea canadensis</i>	-	-	Acumulan grandes cantidades de Hg en las hojas y tallos cuando este metal está en forma orgánica (Celis <i>et al.</i> , 2005).
<i>Heliconia sp.</i>	Ave del paraíso		Tolerantes a la exposición de lixiviados (Aulestia, 2012).
<i>Hydrocotyle umbellata</i>	-	3.95+-1.86 2.49+-1.05	-
<i>Juncus sp</i>	Tulillo	-	Tolerante a N y P.
<i>Lemna sp</i>	Lenteja de agua	-	Tolerantes a aguas residuales con concentraciones de Fe, Zn y Al (Celis <i>et al.</i> , 2005). En Estados Unidos se han llevado a cabo eficazmente instalaciones de tratamiento de afluentes de alta carga contaminante (420 mg L ⁻¹ de DBO y 364 mg L ⁻¹ de sólidos en suspensión) con Lemnaceae. (Fernández <i>et al.</i> , 2004).
<i>Phragmites communis</i>	Carrizo	-	Tolera soluciones de Zn y Pb presentes en aguas residuales contaminadas con metales pesados (Celis <i>et al.</i> , 2005). Se desarrolla bien en aguas alteradas de naturaleza orgánica, alcalina o salina (Fernández <i>et al.</i> , 2004).
<i>Pistia stratiotes</i>	Lechuga de agua	0.30+-0.13	Tolerancia y remoción de cadmio en agua residual (Celis <i>et al.</i> , 2005).
<i>Salvinia rotundifolia</i>	Salvina	-	Resistente a metales pesados (cromo, plomo, cadmio y arsénico) (Celis <i>et al.</i> , 2005).
<i>Scirpus sp</i>	Totora	0.23 Peña <i>et al.</i> , 2003	Aguas subterráneas contaminadas con petróleo y nitrato. (Celis <i>et al.</i> , 2005).
<i>Typha sp</i>	Espadaña de hoja ancha o tule	1.39+-1.49 0.19+-0.15	Las especies del género Tifáceas toleran bajos pH y son capaces de acumular en sus tejidos altas concentraciones de metales pesados (Celis <i>et al.</i> , 2005).
<i>Zantedeschia sp</i>	Calas, alcatraces o cartuchos	-	Tolerante a aguas jabonosas o residuales domésticas y su efectividad en el tratamiento de las aguas residuales porcícolas (Figuroa, 2002).

En la Tabla 1.6 se muestran los tipos de fitorremediación, y se indica la zona de la macrófita en donde ocurre el proceso, así como los procesos utilizados por las macrófitas para asimilar contaminantes.

El uso más común que han tenido los humedales artificiales ha sido el tratamiento de aguas residuales de tipo municipal, sin embargo existen otros usos; de acuerdo a varios autores (Kadlec y Wallace, 2009; Sherwood *et al.*, 1995; García *et al.*, 2004), los que se enlistan continuación:

- Aguas residuales domésticas y urbanas
- Industrial (particularmente para industrias con residuos del tipo orgánico como son ingenios azucareros, hidrocarburos y procesadoras de alimentos, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos destilerías, fábricas de pulpa y papel y granjas de ganado estabulado)
- Tratamiento de aguas ácidas (por ejemplo las generadas en el drenaje de minas)
- Remoción de fierro y manganeso y de otros metales pesados

Tabla 1.6 Tipos de fitorremediación (Frers, 2001)

Tipo	Proceso Involucrado	Contaminación Tratada
Fitoextracción	Las macrófitas se usan para concentrar metales pesados en las partes cosechables (hojas y raíces).	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc.
Rizofiltración	Las raíces de las macrófitas se usan para absorber, precipitar y concentrar metales pesados a partir de efluentes líquidos contaminados y degradar compuestos orgánicos.	Cadmio, cobalto, cromo, níquel, mercurio, plomo, plomo selenio, zinc isótopos radioactivos, compuestos fenólicos.
Fitoestabilización	Las macrófitas tolerantes a metales se usan para reducir la movilidad de los mismos y evitar el pasaje a napas subterráneas o al aire.	Lagunas de desecho de yacimientos mineros. Propuesto para fenólicos y compuestos clorados.
Fitoestimulación	Se usan los exudados radiculares para promover el desarrollo de microorganismos degradativos (bacterias y hongos).	Hidrocarburos derivados del petróleo y poliaromáticos, benceno, tolueno, atrazina, entre otros.
Fitovolatilización	Las macrófitas captan y modifican metales pesados o compuestos orgánicos y los liberan a la atmósfera con la transpiración.	Mercurio, selenio y solventes clorados (tetraclorometano y triclorometano).
Fitodegradación	Las macrófitas acuáticas y terrestres captan, almacenan y degradan compuestos orgánicos para dar subproductos menos tóxicos o no tóxicos.	Municiones (TNT, DNT, RDX, nitrobenzeno, nitrotolueno), atrazina, solventes clorados, DDT, pesticidas fosfatados, fenoles y nitrilos, entre otros.

- Reducción de nutrientes (nitrógeno y fósforo)
- Aguas de escorrentía agrícola o urbana
- Mejoramiento de la calidad del agua directamente de ríos y lagos
- Pulimento de efluentes obtenidos mediante otras alternativas tecnológicas, como son los sistemas anaerobios o los sistemas electromecánicos
- Humedales unifamiliares o multifamiliares en áreas rurales con alta dispersión de población, con el objeto de eliminar la construcción de sistemas de drenaje y alcantarillado.
- Tratamiento de aguas grises
- Debido a que son sistemas descentralizados, y dependiendo de la disponibilidad de terrenos, puede fraccionarse el agua residual en localidades cuya topografía dificulte la recolección del agua residual hacia un solo sitio de tratamiento
- Los humedales artificiales también encuentran aplicación para la producción de flores de ornato (Ilustración 1.4),

materiales forrajeros, o bien como áreas específicas para la protección de la vida silvestre

En la Tabla 1.7, se presenta las condiciones de clima y temperatura en la cual se desarrollan las diferentes macrófitas, los cuales se deben de considerar para la selección de las mismas. Tal como se indica en la tabla, la temperatura y la altitud son los aspectos más importantes para la selección de las especies. Pero, de manera adicional, es indispensable seleccionar una especie vegetal que se encuentre en abundancia en la zona, como un requisito indispensable para ser tomado en cuenta en los proyectos que incluya este sistema de tratamiento.

Para minimizar la incertidumbre de la funcionalidad de la macrófita en el proyecto, se debe conocer los datos básicos y vaciarlos en una ficha, como las que se presentan, en la Tabla 1.7, para el carrizo común (*Phragmites australis*), los aspectos más importantes.

Ilustración 1.4 Desarrollo de especies vegetales en humedales artificiales



Tabla 1.7 Características de especies vegetales

Nombre científico	Nombre común	Clima	Temperatura ambiental óptima para su desarrollo
Sistemas de flujo subsuperficial (especies emergentes)			
<i>Arundo donax</i>	Caña	Calido, templado	Tolera temperaturas en el rango de 5°C y 35°C, aunque prefiere temperaturas entre los 9°C y 28,5°C.
<i>Cyperus albobstriatus</i>	Papiro paragüita	Cálido	Tolera temperaturas de 20 a 33 °C.
<i>Glyceria máximos</i>	Gramínea gliceria acuática	Frío	-
<i>Iris pseudacorus</i>	Lirio amarillo	Frío	Puede soportar heladas, aunque no es recomendable que tengan temperaturas inferiores a -8°C.
<i>Scirpus sp.</i>	Junco	Templado	16°C-27°C.2
<i>Phragmites australis</i>	Carrizo	Frío	12-23 °C, tolera hasta -5 °C.
<i>Typha angustifolia</i>	Totora, espadaña	Templado, templado-frío ¹	10°C - 30°C, existiendo diferencias entre especies.2
<i>Typha latifolia</i>	Totora, espadaña		
<i>Zantedeschia aethiopica</i>	Alcatraz o cala	Cálidos y templados	Tolera hasta -5°C.
Sistemas de flujo superficial (especies flotantes o sumergidas)			
<i>Eichornia crassipes</i>	Lirio acuático	Tropical y subtropical ²	22.5 °C-35 °C.2
<i>Lemna spp.</i>	Lenteja de agua	Se adapta a todos los climas, menos a lo muy fríos.	8°C – 20°C, tolera hasta 0 °C
<i>Pistia stratiotes</i>	Lechuga de agua	Tropical y subtropical	Su temperatura mínima de crecimiento es de 15°C y la óptima de crecimiento es de 22 a 30°C.

Tabla 1.7 Características de especies vegetales (continuación)

Carrizo común	
Nombre científico	<i>Phragmites australis</i>
Nombre común	Caña, caña brava, caña hueca, caña borda, caña borde, caña de río, cañafifla, cañavera, cañeta, cañete, cañilga, cañita, cañiza, cañota, cañote, cañuela de céspedes, carricillo, carriza, carrizo, carrizo común, jiscas, manchega.
Familia	GRAMINEAE (POACEAE)
Género	<i>Phragmites</i>
Sinónimos	<i>Phragmites communis</i>
Tallo	De un largo de 8-400 cm y de 0.5- 2 cm de diámetro, generalmente no ramificada, con vainas lisas, glabras, cubriendo los nudos y la lígula formada por una línea de pelos.
Hojas	De 50 cm de largo por 5 cm de ancho, verde grisáceas, aplanadas, que se adelgazan progresivamente hacia él un largo ápice.
Flor	Espiguillas comprimidas lateralmente, de 10 a 16 mm, con 2-10 flores, la mayoría hermafroditas pero las inferiores masculinas o estériles. Glumas lanceoladas tan largas como las flores, membranosas y con 3-5 venas
Raíz	Provisto de un gran rizoma leñoso cubierto con vainas coriáceas semejantes a escamas, que puede crecer hasta los 50 cm de largo.
Distribución	Cosmopolita, presente en todo el mundo.
Crecimiento	Acelerado, presenta comportamiento invasivo.
Época de floración	De junio a diciembre.
Formas vitales	Geófito por rizomas rastrero.
Hábitat	Vive en marisma, lagunas y bordes de ríos formando densas poblaciones, desde el nivel del mar hasta los 1000 m de altitud. Se encuentra en comunidades de cañaverales y espadañales de aguas más o menos profundas, propia de márgenes de lagunas o cursos de aguas lentas.
Temperaturas	Calos moderado, a estas plantas no les afectan el frío, pero no resisten heladas. Cuando las temperaturas mínimas sean muy bajas, podemos proveer a proteger los arbustos más sensibles, cubriendo las raíces con hojas secas o paja.
Luz	Luz solar directa, aunque soporta la sombra.
Humedad	Suelos encharcados.
Acidez	Suelos débilmente ácidos, pH 4.5-7.5.
Suelo	Suelos encharcados hasta profundidades de 50 cm.
Nitrógeno	Principalmente suelo ricos en nutrientes.
Uso en humedal	Humedal subsuperficial
Principal plaga	Hongo <i>Mollisia retincola</i> (se observan tallos muertos húmedos)
Cuidado	Con el aumento de las temperaturas diurnas, a inicios de la primavera, está bien practicar un tratamiento con un insecticida de amplio espectro, usándolo en la época de no hay floración. También es aconsejable practicar un tratamiento anti fúngico de amplio espectro, para prevenir el desarrollo de enfermedades de hongos, la cual se presenta cuando el terreno tiene elevada humedad ambiental.

Tabla 1.7 Características de especies vegetales (continuación)

Lenteja de agua	
Nombre científico	<i>Lemna sp.</i>
Nombre común	Lenteja de agua
Familia	<i>Lemnaceae</i>
Género	<i>Lemna</i>
Hojas	Recuerda a una lenteja, de 1.5-5 mm, flotante, opaca. Tiene una estructura modificada llamada "fronde", que es una especie de fusión entre el tallo y las hojas, con forma casi asimétrica, de elíptica a estrechamente ovada u obocada, con el ápice redondeado y plana por ambas caras, habiendo en la inferior 10-20 celdillas de 0.1-0.25 mm y 3 nervios.
Flor	Tiene dos bolsas laterales donde aparecen las flores, que están formadas por 2 estambres y un ovario unicelular globoso, con el estilo corto, encerrados en una vaina y ésta a su vez en la bolsa.
Raíz	Simple delgada de color blanco.
Distribución	Cosmopolita
Crecimiento	En condiciones óptimas, esta planta puede duplicar su población en apenas dos días
Reproducción	Aunque pueden poseer órganos florales muy simples y de tamaño reducido, la forma habitual de reproducción es la vegetativa por gemación que, en síntesis, puede explicarse muy burdamente como la formación de brotes diminutos semejantes a la planta madre que se separan, originando reproducciones perfectas del vegetal primitivo, llegando a formar espesas alfombras verdes.
Hábitat	Vive en aguas estancadas y remansos de ríos, desde el nivel del mar a los 600 m de altitud.
Temperaturas	Temperatura ideal 15-18 °C, no soporta heladas, ni temperaturas extremas.
Luz	Crece a plena luz, aunque soporta sombra.
Humedad	Suelos encharcados.
Acidez	Suelos débilmente ácidos, pH 4.5-7.5
Suelo	Suelos moderadamente pobres o ligeramente ricos, no están presentes en suelos muy fertilizados. El intervalo óptimo de salinidad en la que se desarrolla la planta es de 0.8 a 4.0%.
Nitrógeno	Requiere de nitrógeno en forma de amonio, de aguas quietas, a fin de poder reproducirse.
Uso en humedal	Superficial
Principal plaga	No presenta plagas considerables.
Cuidado	Requieren superficies tranquilas, con poco movimiento y nunca "corrientes". En los estanques al aire libre suelen desarrollarse con suma rapidez, 'cerrando' la superficie libre por lo que deben ser periódicamente eliminadas.



2

DISEÑO

2.1. PRINCIPIOS

Los humedales artificiales, como sistemas de tratamiento extensivos, han tenido gran éxito debido a sus bajos costos de operación y mantenimiento; sin embargo, en países tropicales como México, la documentación a cerca del funcionamiento de estos sistemas no ha sido suficiente como para generar información y criterios de diseño específicos.

Cuando existen concentraciones altas de carga orgánica y de sólidos, se utiliza un proceso de tratamiento previo, generalmente de tipo anaerobio, como el RAFA, de tal manera que reduzca dicha concentración y los requerimientos de área sean mínimos y su operación tienda a lo óptimo (Hunt y Poach, 2001; García *et al.*, 2004). Por tanto, se pueden encontrar en combinación con otros procesos biológicos, como el RAFA o con lagunas de maduración para la desinfección del efluente.

Con la evaluación de las condiciones cinéticas se obtiene el área requerida para la degradación de los parámetros objetivos, sin embargo, las condiciones hidrodinámicas de las unidades de tratamiento también es relevante, ya que impacta de manera significativa en la remoción de contaminantes.

Para el diseño de los humedales es necesario considerar y/o determinar la topografía, los

módulos, operación en serie o paralelo, profundidad, así como las estructuras de entrada y salida. Es importante considerar también las actividades de operación y mantenimiento, ya que por ejemplo es más fácil dar limpieza a los tubos de distribución de caudal armados con codos a 45°, en comparación con codos de 90 grados. El diseño hidráulico debe evitar la formación de zonas muertas y flujos preferenciales, tanto como sea posible. El flujo del agua en el interior del humedal debe romper las resistencias creadas por la vegetación, capa de sedimentos, raíces y sólidos acumulados en los humedales (Delgadillo *et al.*, 2010).

Conjuntamente con la información y requisitos necesarios para seleccionar el sitio donde se implementará el humedal de tratamiento, el diseño conceptual contribuye a definir el tren de tratamiento, se genera un diseño preliminar, de tal modo que constituye una herramienta para ir determinando los requerimientos del proyecto conforme estos se van presentando, permite además aclarar y definir la problemática que se va desarrollando, por ejemplo, es de gran importancia establecer la ubicación de las estructuras de entrada y salida, de tal modo que se reduzcan al máximo los flujos preferenciales, los que afectan disminuyendo la remoción de contaminantes. El diseño conceptual se planteará con base en restricciones como la disponibilidad de terreno, ubicación del sistema, actividades de operación y mantenimiento, objetivos de trata-

miento, entre otros. Durante esta etapa se visualiza el tren de tratamiento, su arreglo, acceso al sitio donde se ubicará el sistema, la factibilidad de construcción en el sitio seleccionado y de una manera general el costo estimado de la planta de tratamiento.

Para el diseño de humedales artificiales se considera la temperatura ambiental máxima y mínima y la temperatura promedio del agua, estacionalidad y velocidad, factores que determinan el valor de las constantes de remoción, el periodo de estiaje y el lluvioso (avenidas, dilución del agua a tratar, riesgo de lavado del sistema); los parámetros de diseño normalmente utilizados son: caudal, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, nitrógeno total, fósforo total y coliformes fecales (EPA, 2000b).

Los humedales artificiales generalmente se utilizan como único proceso de tratamiento (Ilustración 2.1); sin embargo, dependiendo de los requerimientos de calidad del efluente, la carga orgánica del afluente y disponibilidad de terreno, se puede considerar otros procesos biológicos.

Entonces, la determinación del tren de tratamiento, dependerá de las condiciones antes expuestas, por tanto, se recomienda hacer un ejercicio de diseño considerando al humedal como único proceso de tratamiento. Si el requerimiento de área es mayor al disponible, es cuando puede considerarse un proceso biológico previo, de tal manera que disminuya la carga orgánica y de esta forma disminuir las dimensiones del humedal necesarias para el cumpli-

Ilustración 2.1 Tren de tratamiento típico

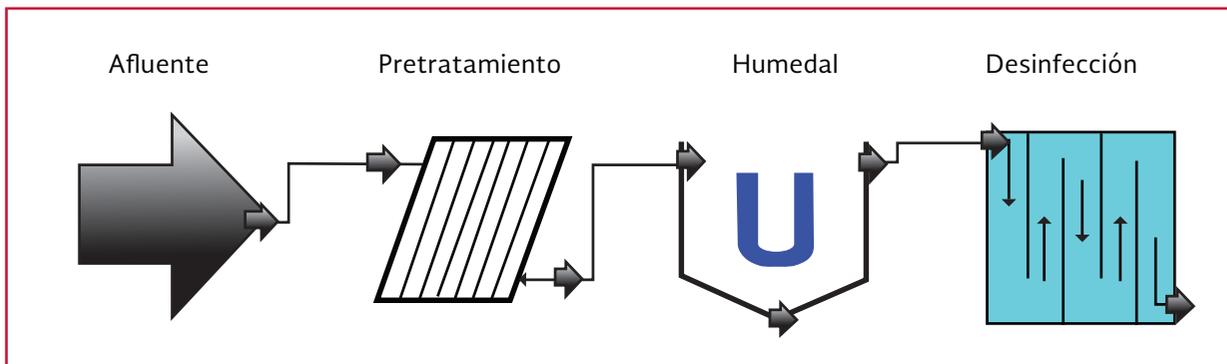


Ilustración 2.2 Ejemplo de combinación con otro proceso unitario

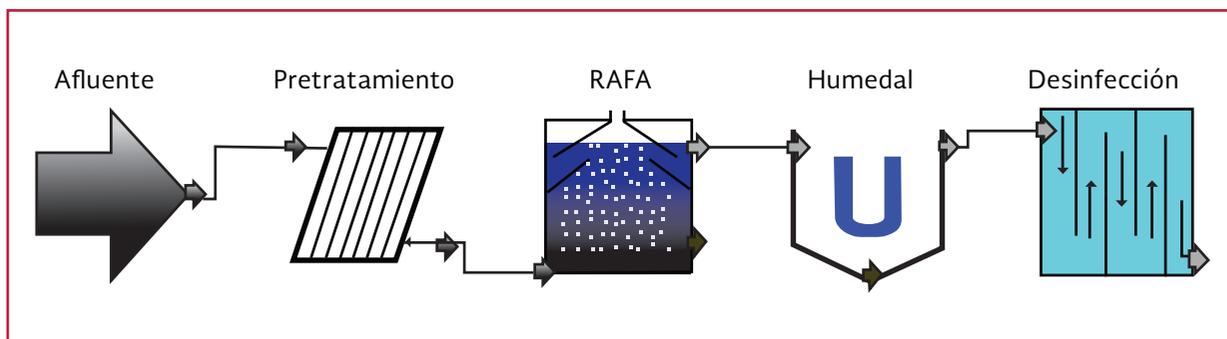
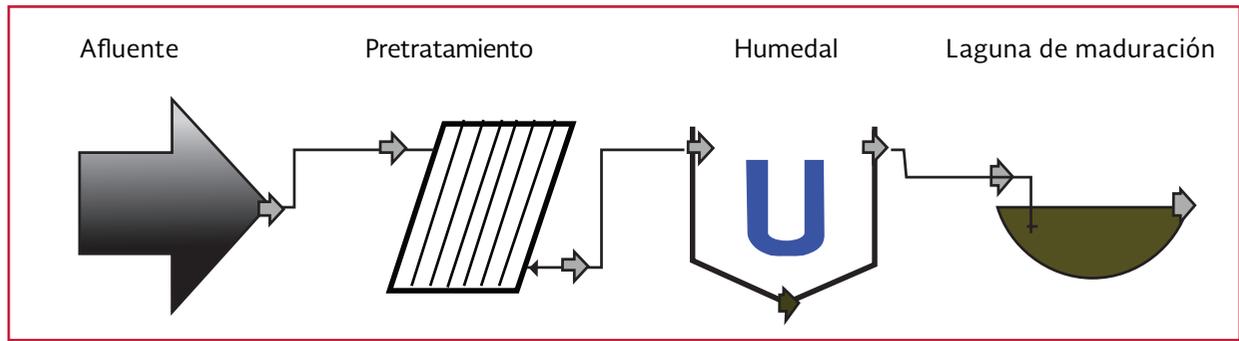


Ilustración 2.3 Combinación de humedal con laguna de maduración



miento de la calidad requerida. Se entiende que es preferible que este proceso adicional sea de bajo costo de operación y mantenimiento, por ejemplo un RAFA (Ilustración 2.2).

Por otro lado, es posible que la disponibilidad de terreno sea tal, que sea posible incluir una laguna de maduración como unidad de desinfección del agua residual, tal como se muestra en la Ilustración 2.3, con esto, se minimiza aún más el costo por metro cúbico de agua residual tratada.

Uno de los problemas más recurrentes durante la operación de los humedales de flujo subsuperficial horizontal consiste en que los espacios vacíos del medio filtrante son ocupados por los sólidos, básicamente tierra, arenas y arcilla, los que poco a poco van colmatando el lecho. Para reducir el riesgo de que esto suceda es necesario incluir el pretratamiento necesario según la caracterización representativa del afluente y en caso de que se requiera remover materia orgánica disuelta, el RAFA resulta una opción factible.

La ausencia de un tratamiento previo para la remoción de sólidos, permite el ingreso de sólidos a los estanques de tratamiento provocando taponamientos, flujos preferenciales, zonas hidráulicas sin flujo y una disminución del tiempo

de retención hidráulica, reduciendo la remoción de contaminantes (García *et al.*, 2004).

Para el dimensionamiento de los humedales artificiales de tipo subsuperficial, generalmente se utilizan modelos no mecánicos, los cuales se pueden agrupar de la siguiente manera:

1. **Reglas empíricas.** Se basan en recomendaciones y criterios propuestos por algunos autores como Wood (1995) y Kadlec and Knight (1996) (Tabla 2.1), sin embargo aunque es una alternativa rápida y robusta, desde el punto de vista de ingeniería no resulta en un diseño óptimo. Otro ejemplo, aún más simple, es la generalidad de que se requiere cinco m² de humedal/persona, propuesto por Cooper and Breen (1998). Estas

Tabla 2.1 Recomendaciones para el diseño empírico

Criterio	Rango	
	Wood, 1995	Kadlec and Knight, 1996
Tiempo de residencia hidráulica, d	2-7	2 - 4
Carga orgánica máxima, kg DBO/ha·d	75	No especificado
Carga hidráulica, cm/d	0.2 - 0.3	8 - 30
Requerimiento de área, ha·d/m ³	0.001 - 0.007	No especificado

«reglas» están basadas en observaciones de humedales de tratamiento con diferentes características de agua residual y condiciones climáticas; por tanto la incertidumbre es alta

2. Ecuaciones de regresión. Considerando que la mayoría de las investigaciones se enfocan en la remoción de parámetros, es decir, entradas y salidas, las ecuaciones de regresión obtenidas a partir de estos datos, han sido una herramienta útil para el diseño. Sin embargo, al ser un modelo de caja negra, se pierden aspectos como la relación largo-ancho, material de empaque y clima. Por tanto, tienen un grado de incertidumbre elevado si se llegarán a utilizar para el dimensionamiento

3. Modelos de primer orden. Las ecuaciones derivadas del modelo de cinética de primer orden son las más utilizadas para la modelación de humedales artificiales. Los más utilizados con frecuencia son los de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América (EPA, 1993a) y, el modelo de Kadlec and Knight (1996)

4. Modelos de orden variable. En 2001 Mitchell and McNevin identificaron la imposibilidad física del modelo de primer orden, en el sentido de que dicho modelo considera que las tasas de remoción se pueden incrementar indefinidamente hasta alcanzar remociones de 100 por ciento (teórico), sin embargo en la práctica esto no es posible debido a la aportación de materia orgánica del mismo humedal, por lo que proponen una combinación, un modelo de orden cero para cargas orgánicas altas

y un modelo de orden uno para cargas orgánicas bajas

En las constantes cinéticas recomendadas para algunos de los modelos más utilizados, se involucran aspectos climáticos, variedad de especies vegetales, diferentes tipos de medios filtrantes, tiempos de operación. Estas variantes deberían aplicar solo para condiciones ambientales, económicas y sociales similares.

Para un mejor entendimiento del funcionamiento de un humedal artificial, es necesario conocer el balance de agua el cual se puede expresar de la siguiente forma:

$$Q_i - Q_e + P - ET = \left[\frac{dV}{dt} \right] \quad \text{Ecuación 2.1}$$

donde:

Q_i	=	Afluente de agua residual (L/s)
Q_e	=	Caudal del efluente (L/s)
P	=	Precipitación (L/s)
ET	=	Evapotranspiración (L/s)
V	=	Volumen de agua
t	=	Tiempo

Por otro lado, la remoción de materia orgánica en un humedal puede ser descrito como un modelo cinético de primer orden (considerando un flujo pistón), como sigue:

$$\left[\frac{C_e}{C_o} \right] = \exp(-K_T \theta_H) \quad \text{Ecuación 2.2}$$

dónde:

C_o	=	Concentración materia orgánica afluente, mg/L
C_e	=	Concentración materia orgánica efluente, mg/L

K_T = Constante de reacción de primer orden y dependiente de la temperatura, d^{-1}
 θ_H = Tiempo de residencia hidráulica, h

Q = Caudal del afluente, L/s
 $K_{V,T}$ = Constante cinética de primer orden, d^{-1}
 D_M = Propuesta de profundidad de lecho, m
 n = Porosidad, fracción

El tiempo de residencia puede representarse con la siguiente ecuación:

$$\theta_H = \frac{LWD}{Q_i} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

dónde:

L = Largo, m
 W = Ancho, m
 D = Profundidad, m
 Q_i = Caudal medio, L/s

Modelo utilizado por la EPA

La ecuación utilizada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, 1993a) es una ecuación derivada del modelo de cinética de primer orden. La mayor remoción de materia orgánica se lleva a cabo en el fondo del humedal artificial, es decir, no es posible la remoción del cien por ciento de la DBO, por lo que permanece un remanente denominado concentración del fondo del lecho. En la ausencia de pruebas de tratabilidad, generalmente el valor asignado a los coeficientes es a criterio del diseñador y el valor seleccionado modifica sensiblemente el área resultante. La superficie está dada por la ecuación:

$$A_s = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_e)}{K_{V,T} D_M n} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

dónde:

A_s = Área superficial del humedal, m^2

La corrección por temperatura de la constante cinética de primer orden se realiza mediante la ecuación de Arrhenius de la siguiente forma:

$$K_{V,T} = K_{V,20} \theta^{T-20} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

dónde:

T = Temperatura promedio del agua, $^{\circ}C$
 θ = Coeficiente de Arrhenius

Para humedales de flujo subsuperficial: $K_{v,20}$ es igual a 1.104 d^{-1} , con θ igual a 1.06; para los humedales de flujo superficial, se utiliza el mismo valor de θ , con $K_{v,20}$ igual a 0.678 d^{-1} , Según Reed and Brown (1995).

La ecuación para la determinación el área superficial en los humedales de flujo superficial, es la misma; solamente no se toma en cuenta los valores de porosidad (n) y el valor de la constante K_{20} es diferente (Reed *et al.*, 1995).

Modelo de Kadlec y Knight

Kadlec y Knight (1996) proponen una ecuación derivada del modelo de cinética de primer orden para el cálculo del área necesaria, para el caso de condiciones constantes de caudal del afluente, concentraciones y comportamiento de flujo pistón, se deduce la siguiente ecuación:

$$\frac{dC}{dT} = -K_{v,T}C \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Considerando que: $C_0 = C(t=0)$, y $C_e = C(t=\theta_H)$

$$\frac{C_e - C^*}{C_0 - C^*} = \exp[-K_{v,T}\theta] \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Considerando las tres ecuaciones siguientes:

$$K_{A,T} = K_{v,T}nd \quad \text{Ecuación 2.8}$$

$$q = \frac{Q}{A_S} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$V = Q\theta_H = Adn \quad \text{Ecuación 2.10}$$

Se obtiene finalmente la expresión:

$$\frac{C_e - C^*}{C_0 - C^*} = \exp\left[-\frac{K_{A,T}}{q}\right] \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Equivalente a:

$$\ln\left[\frac{C_e - C^*}{C_0 - C^*}\right] = -\frac{K_{A,T}}{q} \quad \text{Ecuación 2.12}$$

dónde:

- C^* = Concentración en el fondo del humedal, mg/L
- $K_{A,T}$ = Constante cinética de primer orden, m/año
- q = Carga hidráulica, m/año

Es importante mencionar que en las ecuaciones anteriores consideran que la precipitación es igual a la evapotranspiración. En la Tabla 2.2 se presentan las consideraciones para el diseño, incluyendo la corrección por temperatura según la ecuación de Arrhenius, utilizando el modelo de Kadlec and Knight.

Según los datos presentados en la Tabla 2.2, específicamente para el coeficiente de Arrhenius (θ), a excepción del nitrógeno, la temperatura no tiene influencia en el dimensionamiento para los otros parámetros. La concentración esperada de un contaminante en el efluente se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} K_s &= 12600Dg^{1.9} = 12600\left(\frac{25}{10}\right)^{1.9} \\ &= 71\,855 \frac{m^3}{m^2d} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 2.13}$$

dónde:

- Dg = Diámetro de la grava
- 10 = Constante

Kadlec y Knight (1996), recomiendan que para caudales mayores de 3 786 m³/d se construyan módulos en paralelo.

Tabla 2.2 Constantes cinéticas, concentraciones en el fondo y factores θ

Parámetro	Flujo superficial			Flujo subsuperficial		
	$K_{A,20}$, m/año	C^* , mg/L	θ	$K_{A,20}$, m/año	C^* , mg/L	θ
DBO	34	3+	1.00	180	3+	1.00
SST	1 000	5+	1.00	3 000	7+	1.00
NT	22	1.5	1.05	27	1.5	1.05
PT	12	0.02	1.00	12	0.02	1.00
CF	75	50+	1.00	95	10+	1.00

2.2. ASPECTOS FÍSICOS Y CONSTRUCTIVOS

Durante el arreglo físico se consideran aspectos como son la geometría de los humedales (relación largo-ancho), profundidad de los lechos, ancho de los bordos, tipos de estructuras de entrada y salida (vertedores, válvula codos de nivelación), tuberías de distribución y recolección, tamaños y tipos de las perforaciones en las tuberías, y todos aquellos aspectos físicos y estructurales que deberán ajustarse al dimensionamiento teórico (obtención del área de tratamiento) y que además deberán ser tomados en cuenta para proyectar y facilitar las acciones de operación y mantenimiento, de todas las deficiencias que no sean contempladas desde el inicio, se traducirán en el incremento de las acciones de operación y mantenimiento, con los respectivos costos que esto implica. Por ejemplo si se determina un diámetro muy pequeño y una distribución inadecuada de las perforaciones de las tuberías de distribución, se propicia el riesgo de taponamientos, lo que afectaría el comportamiento hidráulico del humedal, se producirían flujos preferenciales, se reduciría la eficiencia de tratamiento, se afectaría el desarrollo de los microorganismos y las macrófitas, y se demandaría un mayor tiempo de labor de los operadores para su limpieza.

2.2.1. SELECCIÓN DEL SITIO

Según Tanaka *et al.* (2011), el sitio seleccionado para la construcción del humedal debe considerar al menos, que este quede ubicado cercano a la fuente del agua residual, por supuesto que se disponga de suficiente área, de preferencia que

tenga una ligera inclinación para facilitar el flujo hidráulico entre unidades de la planta y que no esté localizado en áreas inundables. Kadlec y Wallace (2009), señalan que los sitios con uno a tres por ciento de pendiente son a menudo los más fáciles de trabajar en términos de establecer un perfil hidráulico que fluye por gravedad, sin embargo, no se han realizado investigaciones para determinar una inclinación óptima, recomienda una pendiente de 0.5 a uno por ciento para un drenaje adecuado en los humedales artificiales (Chalk y Wheale, 1989).

Algunos aspectos que pudieran ser de gran interés para la selección del sitio donde se instalará el humedal artificial son los siguientes:

- El humedal debe quedar ubicado, preferentemente, a una distancia no muy cercana a la zona habitada. En algunos casos las plantas de tratamiento quedan ubicadas a distancias mayores de siete a diez km entre el último registro de aguas residuales de la localidad y la planta de tratamiento, lo que produce una disminución de la carga contaminante. Usualmente los humedales artificiales de flujo superficial presentan un mayor riesgo de formación de vectores que los de flujo subsuperficial, por lo que es recomendable se instalen lo más lejano posible de áreas habitadas
- No estar ubicado en zona inundable. Si el humedal está ubicado en un área inundable esto podría no representar mayor problema para su funcionamiento, considerando las obras de protección adecuadas, sin embargo, sí puede representar problemas para

el acceso a las instalaciones. También pueden verse afectadas actividades de operación y mantenimiento en el caso de daño de tuberías, como se muestra en la Ilustración 2.4a, o de azolve del pretratamiento (Ilustración 2.4b)

- Debe proveer suficiente terreno (Ilustración 2.5). Un aspecto importante a considerar durante el diseño físico es que se debe de contemplar un área suficiente para ampliar la capacidad de tratamiento en un futuro (preferentemente)

Una de las ventajas que presentan los humedales artificiales como proceso de tratamiento, suponiendo que el agua llegue por gravedad, es que no requieren de energía eléctrica para su funcionamiento, lo que representa una oportunidad para su uso en aquellas zonas en donde no se cuenta con este servicio. Los costos de construcción se ven directamente afectados por la forma del lugar, los movimientos de tierras necesarios para crear pendientes suaves en sitios inclinados resulta costoso (Metcalf & Eddy, 1996) (ITRC, 2003); sin embargo, existen casos en los que se debe de considerar el costo que representará el bombeo comparado con los costos que se generan si se conduce el agua residual por encima de la superficie del suelo con el fin de eliminar el bombeo.

En la Ilustración 2.6a se muestra que fue necesario encofrar el tubo colector para protegerlo debido a que está expuesto a la superficie. En la Ilustración 2.6b se muestra que el agua residual llega hasta al pretratamiento por gravedad.

Es conveniente instalar una válvula (Ilustración 2.6c) o un accesorio (tubería de mediacaña, Ilus-

tración 2.6d) que permita regular la cantidad de agua que levantara el sistema, de hecho el humedal debería operarse para el caudal promedio para el cual fue diseñado. En el caso de la inexistencia de esta unidad de control, puede presentarse el riesgo de que ingrese un enorme caudal al sistema durante la temporada de lluvias, lo que afectaría el comportamiento hidráulico del sistema.

Debido a que los humedales artificiales atraen a la vida silvestre, por ejemplo aves migratorias, debe evitarse su uso en zonas cercanas a los aeropuertos (Ilustración 2.7b).

Cuando los humedales artificiales son rebasados en su capacidad de purificación suele desarrollarse la presencia de malos olores, por lo que previo al diseño, de existir la oportunidad, puede seleccionarse un sitio que se encuentra ubicado en sentido contrario a la dirección del viento hacia la comunidad. Claro está que en el transcurso del año cambia la dirección del viento, sin embargo se debe considerar la dirección predominante. En la Ilustración 2.8 se muestra un humedal de flujo subsuperficial en el que el medio filtrante ha sido colmatado, con lo que el agua residual fluye de manera superficial durante los primeros metros del lecho, produciéndose una zona de generación de malos olores.

2.2.2. ASPECTOS TOPOGRÁFICOS Y GEOTÉCNICOS

Una vez que fue seleccionado el sitio para la implementación de los humedales, es necesario realizar una campaña topográfica con objeto de representar fielmente el terreno. Mediante el estudio de topografía se determinan las curvas de nivel del terreno, las cuales se requieren para ubicar y distribuir las unidades de tratamiento,

Ilustración 2.4 a) Tuberías ubicadas en zonas inundables, b) Pretratamiento deficiente



Ilustración 2.5 Suficiente disponibilidad del terreno



además de reducir los movimientos de tierra, así como los costos que implica. Además, se determinan los perfiles longitudinales y transversales, a partir de los cuales se calculan los volúmenes de movimiento de tierra tanto del terreno como de los terraplenes que se construirán. La equidistancia entre las curvas de nivel dependerá del grado de inclinación del terreno, el cual si es plano requerirá un equidistancia de 10 a 20 cm, sin embargo cuando el terreno es muy inclinado podrían determinarse equidistancias entre 25 y 50 centímetros. Durante esta etapa se señala la poligonal que servirá como base para realizar este estudio.

La caracterización geológica y geotérmica del terreno debe ir encaminada a valorar la actitud del terreno existente para ser excavado con facilidad, sus características de compactación, la estabilidad de las excavaciones para evaluar los ángulos máximos de los taludes a ejecutar, y su potencial de reutilización dentro de las obras. También debe estudiarse la presencia del nivel freático, con objeto de poder prever su agotamiento durante la ejecución de las obras y diseñar los drenajes adecuados (García *et al.*, 2004).

El estudio de mecánica de suelos tiene como objetivo conocer las características del terreno donde se construirán los humedales, debiendo comprender desde una clasificación de los suelos, hasta las pruebas de laboratorio que definen parámetros de comportamiento y diseño. Los estudios de mecánica de suelos del predio propuesto deberán incluir los siguientes puntos:

- Localización de sondeos del predio propuesto
- Perfiles estratigráficos de los sondeos
- Pruebas en muestras alteradas de suelos
- Pruebas en muestras inalteradas de suelos

Ilustración 2.6 Tuberías de llegada y control de caudal en la entrada del humedal: a) Colector encofrado, b) Caja de llegada, c) válvula de control, d) tubería en mediacaña



Ilustración 2.7 Alejamiento de aeropuertos por la vida silvestre



Ilustración 2.8 Ubicación contraria a la dirección del viento



- Capacidad de carga del terreno
- Determinación de la permeabilidad del terreno
- Determinación de la estabilidad de taludes
- Grado de compactación de bordos

Flores (1996), refiere que en México no existe un reglamento que especifique los estudios de mecánica de suelos a realizar en el caso de las lagunas de estabilización, y de los humedales artificiales, sino que se han utilizado los conceptos empleados en la construcción de terraplenes para caminos, represas, pequeños diques de tierra y canales. Los procedimientos de diseño desde un punto de vista de geotecnia se remiten al buen juicio y experiencia del diseñador y supervisor del proyecto. Flores (1996), indican que los aspectos que deben ser considerados como parte de la geotecnia son: reconocimiento del terreno, exploración, muestreo de suelos, análisis de laboratorio, cálculo de estabilidad

taludes y conclusiones y recomendaciones, los cuales se describen en los siguientes párrafos:

1. **Reconocimiento del terreno.** El reconocimiento del terreno consiste en una clasificación visual de los suelos apreciando las condiciones generales del área de proyecto, accesibilidad del lugar, geología superficial y características de los suelos de la zona
2. **Exploración.** La exploración tiene como objeto conocer las propiedades de los suelos donde se construirá el humedal y puede realizarse por métodos directos o métodos indirectos. Entre los métodos directos, uno de los más empleados es el de “pozos a cielo abierto” en donde su número y localización depende del tamaño del humedal y de la uniformidad de las condiciones del subsuelo en el sitio
3. **Muestreo de suelos.** El muestreo de suelos implica la obtención de muestras al-

teradas e inalteradas de los estratos que conforman la exploración. Muestras alteradas. Se entiende por muestra alterada aquella muestra que al obtenerse se rompe la consistencia del suelo cambiando las condiciones en las que se encuentra "in situ". Este tipo de muestras es útil para identificar los suelos y se toman cuando menos a cada dos metros y en cada cambio de estrato. Las muestras inalteradas tienen por objeto determinar las características de resistencia y compresibilidad que el suelo tiene en el lugar que se estudia. El número y tipo de pruebas de laboratorio que se realizan con estas muestras, depende de la estratificación y del tipo de material encontrado. Las muestras inalteradas no deben mostrar distorsión en la estratigrafía, ni huecos o materiales remoldeados. La relación de recuperación de muestra debe ser no menor al 95 por ciento y la relación de área del espesor del tubo muestreador con respecto al área total correspondiente al diámetro exterior del muestreador, no debe ser mayor al 15 por ciento. En suelos arcillosos, los muestreadores deben cumplir con la norma ASTM 01587, tubos de pared delgada. Se debe cumplir, además, con las siguientes precauciones: a) si se prevén derrumbes o caídos dentro del sondeo, debe usarse un fluido de perforación; b) si se está por arriba del nivel freático, se debe procurar mantener el sondeo seco; c) si se está muestreando por abajo del nivel freático, se debe mantener el sondeo lleno de agua o de Lodo de perforación durante la limpieza del mismo, durante el muestreo y cuando se remueven las herramientas

4. **Análisis de laboratorio.** Propiedades índice. Las propiedades índice de los suelos permiten la evaluación de las relaciones volumétrico-gravimétricas y la clasificación del suelo

Relaciones volumétrico-gravimétricas. Contenido de agua. El conocimiento del contenido de agua es esencial para determinar los límites de consistencia y para evaluar las relaciones volumétrico-gravimétricas de un suelo

Granulometría. La distribución granulométrica del suelo es esencial como base para clasificación de los suelos gruesos, ya que solamente en suelos gruesos, cuya granulometría puede determinarse por mallas, la distribución por tamaños puede revelar algo de lo referente a las propiedades físicas del material; la experiencia indica que los suelos gruesos bien graduados, o sea con amplia gama de tamaños, tienen comportamiento ingenieril más favorable que los suelos de granulometría muy uniforme de mayor espacio disponible en los tamaños finos y muy finos, mientras que en escala natural dicho espacio resulta muy comprimido. La metodología para efectuar la prueba de granulometría consiste básicamente en hacer pasar el suelo por tamices de distintos tamaños de aberturas que se seleccionan previamente de acuerdo al estudio por realizar

Propiedades hidráulicas. La permeabilidad de los suelos es quizás la más importante que se debe determinar en el diseño de un humedal, pues a través de ella se puede estimar la cantidad de agua que se puede infiltrar a través de la cimentación o los bordos de conten-

ción. El parámetro que define a esta propiedad se le denomina coeficiente de permeabilidad

Propiedades mecánicas. Compresibilidad y consolidación. Dos aspectos del fenómeno de consolidación son de interés de la mecánica de suelos: la magnitud de las compresiones totales que pueden representarse bajo distintas cargas y la evolución con el tiempo de la compresión sufrida por un suelo bajo una carga determinada. Las pruebas de consolidación se realizan con objeto de tener información sobre los dos aspectos anteriores. La relación entre la reducción de vacíos y presiones efectivas aplicadas, obtenidas de la prueba, permite estimar los asentamientos totales que puedan esperarse. Los incrementos de esfuerzos verticales producidos por el peso propio del terraplén son los que producen asentamientos y esto debe de analizarse en las condiciones más desfavorables, por lo que se tienen que tomar las máximas dimensiones del bordo

Análisis de esfuerzos. Cálculo de la capacidad de sustento del terreno de cimentación, expansiones por efecto de las excavaciones, asentamientos por efecto de los terraplenes y estructuras, estabilidad y corrimiento lateral de los taludes, y la permeabilidad de los suelos en el área de los estanques. En el caso de estar en una zona sísmica y tener estratos no coercitivos en estado saturado, se debe evaluar la susceptibilidad al fenómeno de la licuación de arenas. Respecto a la resistencia al esfuerzo cortante, se tiene que el método más comúnmente empleado es mediante pruebas triaxiales. La prueba de compresión triaxial se

usa para determinar la resistencia de un suelo bajo distintas condiciones de drenaje

Compactación. La compactación tiene como objetivos: a) Reducir la relación de vacíos, por tanto la permeabilidad del suelo b) Incrementar la resistencia al corte y la capacidad de carga y c) lograr que el suelo sea menos susceptible a cambios de volumen, como pudieran ser asentamientos bajo cargas o por la influencia de vibraciones

Pruebas Proctor por impactos. La prueba consiste en compactar un suelo en tres capas, dando 25 golpes por capa, repartidos en el área del cilindro, con el pisón correspondiente

5. **Cálculo de la estabilidad de taludes.** Los terraplenes del humedal, cuando están cubiertos de pasto deben tener por lo menos taludes 2:1 (horizontal: vertical), uniformes en sus partes secas y sumergidas, y protegidos para evitar la erosión. En los terraplenes cubiertos de arcilla, los taludes no deben tener pendientes mayores de 3:1, tomando además las precauciones necesarias para evitar problemas relacionados con el desecamiento y prevenir así la falla del recubrimiento arcilloso
6. **Conclusiones y recomendaciones.** Finalmente el Estudio de Mecánica de Suelos debe concluir dando recomendaciones generales de construcción como es: cantidades de suelo a substituir y calidad de los nuevos suelos a colocar, localización bancos de extracción, mejoramiento de la impermeabilidad del suelo del fondo de las lagunas, comentarios respecto a la conveniencia de utilización de geomembranas, forma de compactación de los

taludes y control de la compactación en campo y en general procedimientos de construcción para garantizar la durabilidad de la obra

2.2.3. SELECCIÓN DE MATERIALES

Durante la etapa de la construcción, con la idea de reducir costos, algunas veces se utilizan materiales de tubería sin la calidad requerida para su uso, lo que durante la operación representará un mayor costo, ya que se incrementarán las labores de operación y mantenimiento. Lo que es recomendable es utilizar tubería de los mejores materiales disponibles en el mercado (Tabla 2.3).

En la Ilustración 2.9 se muestran que fueron utilizados cementos de baja calidad. En la Ilustración 2.9a se observa el deterioro que han sufrido las paredes de un registro de llegada, en donde se están provocando problemas de taponamiento y de azolve, en la Ilustración 2.9b se muestra la corrosión que se ha provocado en un vertedor rectangular, lo que imposibilita el uso de esta estructura para el aforo de caudal.

Se sugiere utilizar un cemento tipo II para uso general, cuando se requiera una resistencia moderada a los sulfatos o un moderado calor de hidratación; este cemento tiene uso generalizado

en las estructuras que conforman las plantas de tratamiento de aguas residuales.

La mezcla inadecuada de materiales para la construcción de los bordos, además de generar inestabilidad en estos, se incrementa el riesgo de que sean afectados por efecto de la erosión causada por lluvia o por oleaje (ver Ilustración 2.10).

2.2.4. REJILLAS Y DESARENADORES

Las rejillas y desarenador forman parte del pretratamiento, el cual evitará que los humedales se colmaten y que las tuberías y canales se obstruyan o desgasten (García y Corzo, 2008). El desarenador tiene como finalidad retener arenas y/o inorgánicos sedimentables gruesos, así como también homogenizar las variaciones de caudal. El desarenador está compuesto de por lo menos dos canales, cada uno incluye rejillas finas. Se recomienda consultar el libro *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Pretratamiento y tratamiento primario* del MAPAS donde se presenta información amplia y precisa relacionada con el diseño de estas operaciones unitarias.

Es importante, entonces, la caracterización del agua residual que permita la selección de las unidades necesarias previas al tratamiento

Tabla 2.3 Materiales recomendados para tubería de un humedal artificial

Material		Características	Comparación
Tubería	Policloruro de vinilo (PVC)	Se considera uno de los polímeros más durables, para sistemas de tuberías tanto subterráneas como superficiales. El PVC es un material inerte y se caracteriza por su alta resistencia a la corrosión.	El PVC tiene un control de calidad más riguroso, además tiene un mejor rendimiento térmico: $\frac{1}{4}$ de la tasa de expansión-contracción térmica del PE. Las uniones de PE requieren de equipos de fusión a tope.
	Polietileno	Es el segundo termoplástico en importancia que se usa en el mercado de las tuberías.	Las tuberías de PVC presentan una hidráulica superior.

Ilustración 2.9 Cementos de baja calidad. a) Paredes de un registro de llegada, b) Vertedor rectangular



mediante el humedal. Por ejemplo, ante la presencia de algún tipo de semillas, deberá aumentarse el número de rejillas, colocarlas en serie, reduciendo la abertura entre barras conforme avanza el tratamiento.

En el caso del desarenador, especialmente en el caso de drenajes mixtos (combinación de agua residual y de lluvia, donde se incorporan partículas poco densas) éste debe diseñarse con el propósito de reducir en suficiencia la velocidad del agua y retener aún aquellas partículas con densidad ligeramente menor que la del agua. Cabe señalar que las partículas que no sean eliminadas en este proceso físico provocarían la

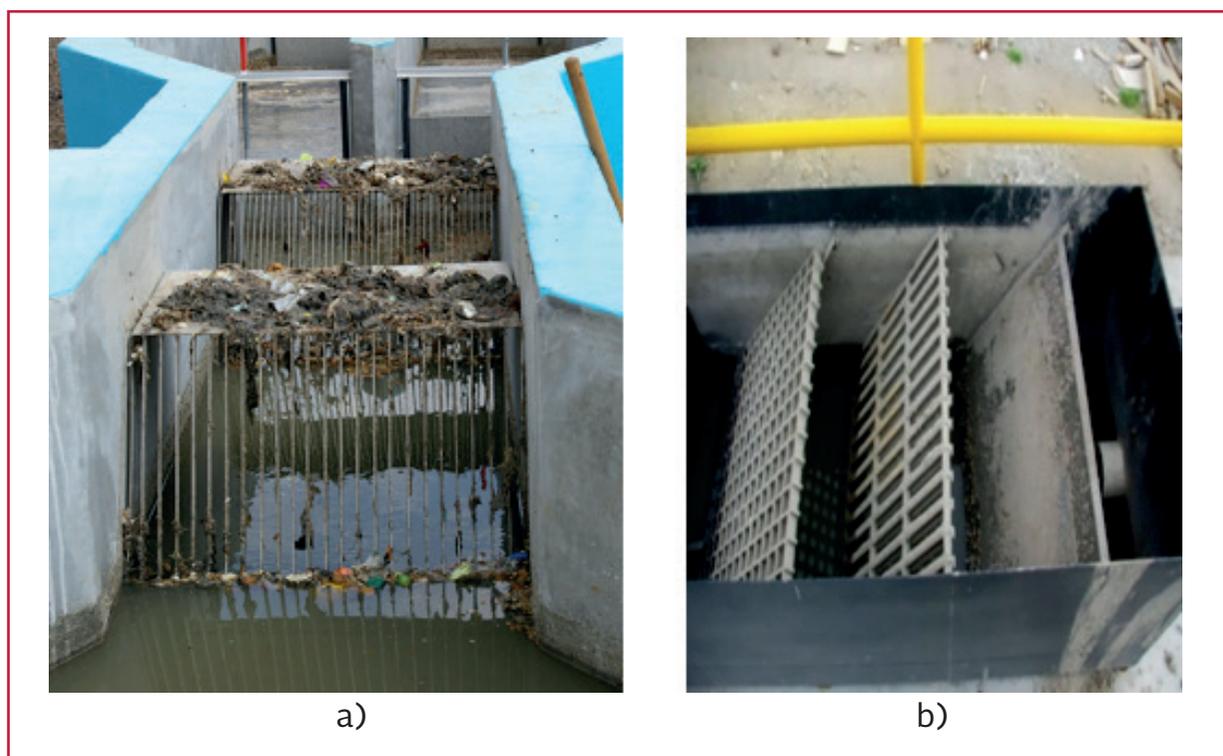
colmatación en el medio del lecho. El taponamiento del medio filtrante se traduce en la formación de flujos preferenciales, zonas muertas y reducción de la eficiencia de tratamiento, lo que afecta el funcionamiento hidráulico y reduce el tiempo de retención hidráulica requerido para el tratamiento (Ilustración 2.11).

Las aguas residuales, regularmente contienen cantidades importantes de arena, cenizas y grava, los cuales deben removerse a fin de evitar daños en tuberías y bombas, causados por la abrasión de estos materiales, se prevendrá el taponamiento de tuberías, estructuras de distribución de caudal (estructuras en los cuales se

Ilustración 2.10 Bordos construidos con materiales inadecuados



Ilustración 2.11 Uso de rejillas. a) rejillas en serie, b) serie de rejillas con diferentes aberturas entre barras



transporta el agua residual a una velocidad relativamente baja, con lo que se provoca la sedimentación de arenas y otras partículas de peso mayor que el del agua). La limpieza se realiza mediante palas o botes. Las arenas se deben disponer en la pileta instalada para este fin, en donde se escurrirá el exceso de agua.

Al igual que con el uso de las rejillas, con la idea de reducir la introducción de pequeños sólidos hacia los humedales, se aconseja diseñar el desarenador con un factor de riesgo, el cual, aunque no se han realizado estudios suficientes para determinarlo, para el caso particular de los humedales, con base en la experiencia, se recomienda que sea entre un 25 y un 30 por ciento mayor al obtenido en el diseño.

En la Ilustración 2.12 se muestran problemas de azolve en los lechos de tratamiento como resul-

tado de la ausencia de rejillas y desarenador, o por deficiencias en el diseño y/o en la operación del pretratamiento. Cabe señalar la relevancia del monitoreo de la planta de tratamiento mediante el aforo y la determinación frecuente de la calidad del agua, para tomar acciones extraordinarias de control.

Una de las actividades de mayor importancia en la operación de un humedal consiste en la medición de caudal, el cual se toma como un parámetro de control operativo. Para obtener mayor información referente a la medición de caudales se recomienda consultar el libro *Sistemas de Medición del Agua: Producción, operación y consumo* del MAPAS. Existen varias alternativas para la medición de este parámetro como pueden ser: aforador Parshall, vertedores (triangulares y rectangulares) y dispositivos electrónicos. El aforador Parshall, también conocido

Ilustración 2.12 Problemas de azolve en humedales artificiales (Fuente b: Conagua, 2014)



como canal Parshall (Ilustración 2.13) es de alta precisión y presenta una muy buena confiabilidad, no obstante cuando se presentan fuertes variaciones de caudal, se instala para medir con precisión el caudal de agua, ya que fue debidamente construida y calibrada para este fin, por personal especializado. Previamente se conoce el ancho de su garganta, a partir de la cual se elabora una tabla con valores ya conocidos, posteriormente se introduce una regla para medir la altura del tirante de agua, a partir de la cual se puede leer el valor de ese tirante en la tabla antes mencionada (Pedroza, 2001).

2.2.5. CANALES Y TUBERÍAS

Toda la tubería instalada debe ser sometida a pruebas de flujo adecuadas antes de rellenar el humedal con el medio filtrante. La elección del material de la tubería es importante, por ejem-

Ilustración 2.13 Aforador Parshall



plo, en aplicaciones donde están expuestas a la luz solar, las tuberías de PVC pueden deteriorarse muy rápido (Tanaka *et al.*, 2011). También debe evitarse el construir los colectores sin protección alguna, por ejemplo un encofrado, o bien no deben reubicarse sobre la superficie ya que se encuentran bastante expuestos a sufrir daños (Ilustración 2.14), inclusive daños intencionales para desviar el agua residual hacia otros usos, por ejemplo el riego de cultivos.

Ilustración 2.14 Tubería deteriorada



Para determinar el tamaño, material, diámetro, pendiente de la tubería, se recomienda consultar los siguientes documentos:

- *Manual de instalación de tuberías para drenaje sanitario* de la Conagua, editada en septiembre de 2012
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-CONAGUA-2011, Sistemas de agua potable, toma domiciliaria y alcantarillado sanitario-Hermeticidad-Especificaciones y métodos de prueba
- Normatividad para el sistema de drenaje sanitario

2.2.6. DERIVACIÓN DE CAUDAL

Al igual que todos los sistemas de tratamiento de aguas residuales, los humedales artificiales deben incluir un sistema con estructuras hidráulicas con el fin de proteger los procesos de tratamiento, tal como un bypass (estructura utilizada para derivación de caudal), para que ingrese a la planta de tratamiento únicamente los caudales de diseño para los que fue diseñado.

En México es recurrente el uso de sistemas de drenaje combinado, en los que no se separan las aguas de tipo sanitario de las aguas pluviales, lo que hace indispensable el uso de estas estructuras. También es aconsejable instalar una serie de rejillas en el bypass para evitar que los sólidos pasen hacia el cuerpo receptor, sin ser retenidos.

Otras obras hidráulicas protectoras son los canales para excedencias, o las cunetas perimetrales al sistema de tratamiento (Ilustración 2.15), los que se construyen con el objetivo de evitar que ingrese agua superficial (lluvia, agua de riego, etc.) (Department of Planning and Local Government, 2010). El diámetro de las tuberías o el de los canales deberán diseñarse con base en la información local de la cantidad de agua que pudiera llegar al sistema, por ejemplo, si pasa un arroyo junto al sistema de tratamiento, deberá obtenerse o generarse la información del caudal máximo que podría formarse durante una fuerte avenida, mismo que servirá para el diseño de la estructura hidráulica protectora.

La pendiente debe determinarse para un rango de velocidad entre 0.3 m/s para el gasto mínimo de 1 L/s a 3.0 m/segundo. Para el caso de pendientes fuertes, será necesario hacer escalonamientos en el perfil de la línea de drenaje,

Ilustración 2.15 Disposición de excedencias. a) Uso de canal, b) Uso de cunetas



utilizando para este caso tuberías que no sean afectadas por el sulfuro de hidrógeno que se produce en las caídas libres.

2.2.7. BORDOS

Para el dimensionamiento de los bordos se deben de tomar en cuenta los siguientes aspectos: los bordos deben ser lo suficientemente altos como para contener el volumen esperado, al menos unos 15 cm de borde libre para la acumulación de agua (Hoffmann y Platzter, 2011), así como la acumulación de basura y sedimentos que se generen con en el tiempo (EPA, 1995). Para sistemas a gran escala, la parte alta del bordo debería tener un ancho suficiente para colocar un camión o cualquier equipo necesario para el mantenimiento, usualmente 3 metros de ancho.

Los bordos de algunos humedales se contruyen con concreto, otros utilizan una geomembrana anclada (Ilustración 2.19) y otros con arcilla (con la proporción adecuada de arcilla-arena para que se obtenga una compresibilidad adecuada en la que se obtenga un 95 por ciento de

prueba). En la Ilustración 2.16 se presenta la construcción del taludes utilizando arcilla.

Los humedales artificiales no son profundos, usualmente tienen una profundidad de 0.6 m, sin embargo en aquellos casos en que la topografía conlleva a construir los estanques en terrazas la altura de los bordos puede duplicarse para pasar de una terraza a otra con lo que se debe de utilizar una inclinación máxima de 3:1; sin embargo, las pendientes internas deben ser de 2:1 (EPA, 2000a), sin embargo existen bordos construidos con base en concreto, que son completamente verticales al fondo (Ilustración 2.17). Es recomendable que cada celda del sistema deberá tener una rampa que permita el acceso a los vehículos de mantenimiento (Estrada, 2010).

Los bordos deberán estar construidos con suelos de grano fino (los suelos que contienen más del 15 por ciento de arcilla son generalmente adecuados), los que se compactarán en un terraplén estable, recubierto por una geomembrana la cual evitará la posible contaminación de las aguas subterráneas, y a su vez la infiltración de la misma al sistema (EPA 1995). En la Tabla 2.4 se encuentra

Ilustración 2.16 Construcción de taludes mediante arcilla



información referente a los suelos que se pueden utilizar para la construcción de los bordos.

El control de calidad de las actividades de movimientos de tierras se centra en primer lugar en una buena caracterización de las tierras aportadas en el terraplenado y una correcta selección del material, para evitar la aportación de elementos extraños que causen problemas en su compactación. Para realizar una buena compactación, se suele extender el material aportado por capas de grosor no superior a los 25 cm y compactarlas completamente antes de añadir

una nueva capa. También es necesario controlar la inclinación definitiva de los taludes para asegurar su estabilidad. Es bastante habitual mantener una relación $1H/1V$ en los taludes definitivos de los humedales en el caso de flujo subsuperficial y más suaves para flujo superficial (Píriz, 2004).

Debe tenerse en cuenta que, acabado el movimiento de tierras, queda definida por completo la forma de los lechos del humedal, y con ella sus parámetros básicos de diseño (longitud, anchura, profundidad, e inclinación de los talu-

Ilustración 2.17 Bordos de concreto

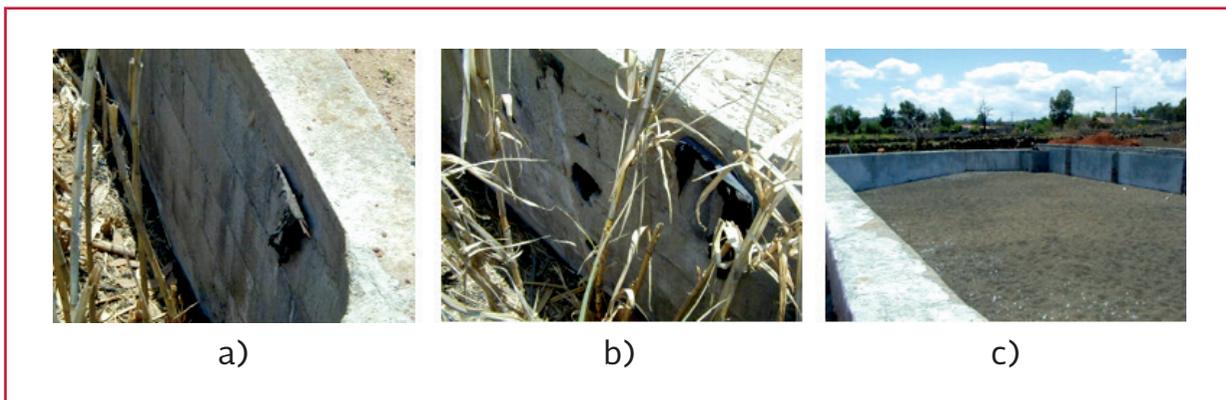


Ilustración 2.18 Construcción de bordos mediante geomembrana anclada



Tabla 2.4 Características del suelo y su utilidad para el uso en la construcción del terraplén

	Grupo de suelos	Descripción del suelo	Idoneidad para formar un terraplén	Permeabilidad y pendientes
Bueno	Grava arcillosa	Gravas arcillosas y mezclas de grava-arena-arcilla	Estable - adecuado para todos los niveles Buena carga de la cimentación Buena compatibilidad	Permeabilidad: lenta
	Arena arcillosa	Arena arcillosa y mezclas de arena-arcilla	Estable - adecuado para todos los niveles En general buena carga de la cimentación Compatibilidad aceptable	Permeabilidad: lenta
	Arcilla inorgánica	Arcillas inorgánicas de baja plasticidad a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas y arcillas magras	Estable - adecuado para todos los niveles Tiene carga de la cimentación justo Compatibilidad aceptable	Permeabilidad: lenta
Aceptable	Arena limosa	Arenas limosas y mezclas arena-limo	Bastante estable - adecuado para niveles bajos Carga de la cimentación regular Buena compatibilidad	Permeabilidad: moderada. Utilice pendientes planas y proteger contra la acción de las olas.
	Limo inorgánico	Limos inorgánicos, arenas muy finas, arenas limosas finas o arcillosas y limos arcillosos de ligera plasticidad	Baja estabilidad - adecuada para niveles bajos Carga de la cimentación regular Compatibilidad Regular	Permeabilidad: moderada. Utilice pendientes planas y proteger contra la acción de las olas.
	Arcilla inorgánica de alta plasticidad	Arcillas inorgánicas que tienen alta plasticidad y arcillas de grasa	Bastante estable - adecuado para todos los niveles Carga de la cimentación: mala Sujeto a agrietarse cuando se seca Difíciles de compactar	Permeabilidad: muy lenta. Utilice pendientes planas
	Limo inorgánico elástico	Limos inorgánicos, micáceo o arena fina de diatomeas o suelos limosos y limos elásticos	Muy baja estabilidad - adecuada solo para niveles bajos Carga de la cimentación: mala Difíciles de compactar	Permeabilidad: lenta. Utilice pendientes planas y proteger contra todas las fuerzas erosivas
Malo	Limo orgánico, arcilla orgánica	Limos orgánicos y arcillas orgánicas que tienen baja plasticidad	Muy baja estabilidad - adecuada solo para niveles bajos Carga de la cimentación: mala Difíciles de compactar	Permeabilidad: moderada. Utilice pendientes planas y proteger contra todas las fuerzas erosivas
	Arcilla orgánica, limo orgánico	Arcillas orgánicas que tienen media-alta plasticidad y limos orgánicos	Muy baja estabilidad: adecuado solo para niveles bajos Carga de la cimentación: mala Sujeto a agrietarse cuando se seca Difíciles de compactar	Permeabilidad: muy lenta. Utilice pendientes planas
	Turba	Turba y otros suelos altamente orgánicos	Muy baja estabilidad: adecuado niveles bajos Carga de la cimentación: mala Difíciles de compactar	Permeabilidad: variable. Utilice pendientes planas

des). Es por tanto sumamente importante que se proceda a la comprobación de estos parámetros, mediante un nuevo levantamiento topográfico en el momento que los trabajos de movimiento de tierras finalicen (Píriz, 2004).

Otra opción para la protección de los bordos, consiste en el uso de pasto, por ejemplo, se recomienda el pasto cuyo nombre común es grama (*Cynodon dactylon*), que tiene un sistema radicular muy profundo, en sequía con perfil de suelo penetrable, las raíces pueden crecer a más de 2 m de profundidad, aunque la mayoría de la zona radicular se desarrolla a menos de 60 cm bajo la superficie, es de crecimiento rápido, se recupera rápidamente cuando es pisoteado y es altamente tolerante al calor y a la sequía, lo que la convierte en una alternativa de utilidad (Ilustración 2.19a).

También el uso de geomembranas es recomendable para proteger tanto los taludes, como de los bordos (Ilustración 2.18), se recomienda utilizar las fabricadas con poliuretano de alta densidad de 1 mm de espesor; así mismo la utilización de pasillos de cementos (Ilustración 2.19c).

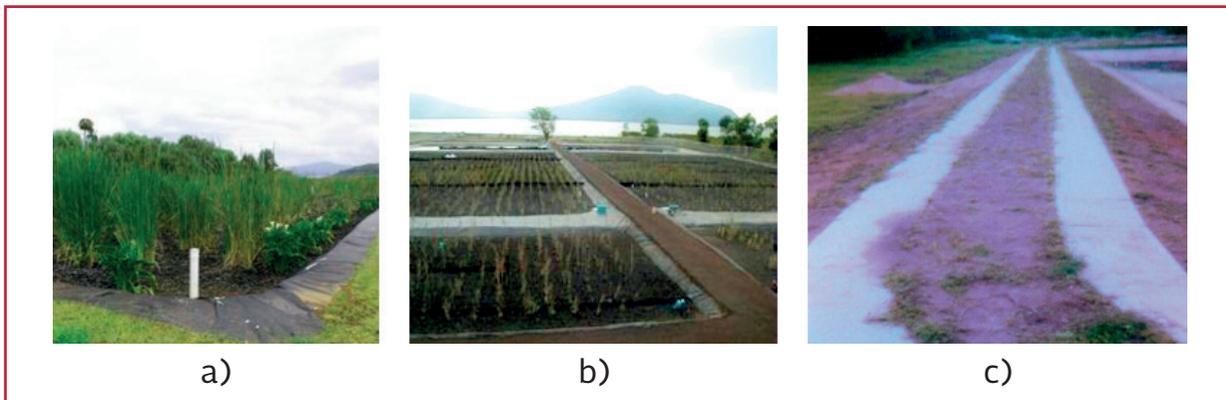
La corona de los bordos también puede protegerse mediante una capa de asfalto, como se

muestra en la Ilustración 2.19b, o bien mediante la colocación de concreto, como se observa en la Ilustración 2.19c. Es conveniente citar que cuando no se hace uso de una geomembrana, asfalto o concreto, normalmente se desarrolla la vegetación sobre estos, la que no solamente provoca daños, sino que además obstaculiza el acceso, por lo que puede inferirse que los gastos resultantes de estas alternativas de protección de los bordos siempre serán menores a los requeridos en actividades de poda y disposición de la vegetación que se hubiera desarrollado sobre su superficie.

2.2.8. PROTECCIÓN DE LAS INSTALACIONES

Actividades humanas y de animales pueden dañar los humedales. El sistema debe cercarse para impedir su acceso (Jensen *et al.*, 2005). para controlar el acceso al sistema, así como para su protección, se debe instalar un cercado perimetral a base de una malla ciclónica de tejido galvanizado y dispositivos de acceso, que incluyan la puerta personal y portones para el acceso a vehículos, equipos y herramientas mayores (Ilustración 2.20 a y b).

Ilustración 2.19 Protección de los bordos mediante el uso de: a) pastos, b) carpetas de asfalto o de geomembrana y c) pasillos de cemento



2.2.9. GEOMETRÍA

La forma geométrica que se da a los lechos de tratamiento está ligada a la ubicación de las estructuras de entrada y salida. Ambos aspectos tienen influencia sobre el comportamiento hidráulico que se desarrolla dentro de los humedales, afectando de una manera directa la eficiencia de tratamiento.

Actualmente existen en México humedales con formas muy diversas, los hay circulares, rectangulares, cuadrados y formas irregulares. Una geometría eficiente en los humedales está directamente relacionada con la reducción de flujos preferenciales, tal y como se comentó en el subcapítulo anterior.

Estudios realizados por Shilton y Prasas (1996), Langergraber *et al.*, (2009), refieren que en humedales con formas geométricas cuadradas, los tiempos de residencia hidráulica reales son usualmente menores a los contemplados en el diseño; el uso de trazadores en la evaluación hidráulica de sistemas a escala real, demuestran que los tiempos reales de residencia hidráulica

se reducen hasta en un cuarto del tiempo teórico de tratamiento, lo que sin duda alguna afecta reduciendo la eficiencia de tratamiento.

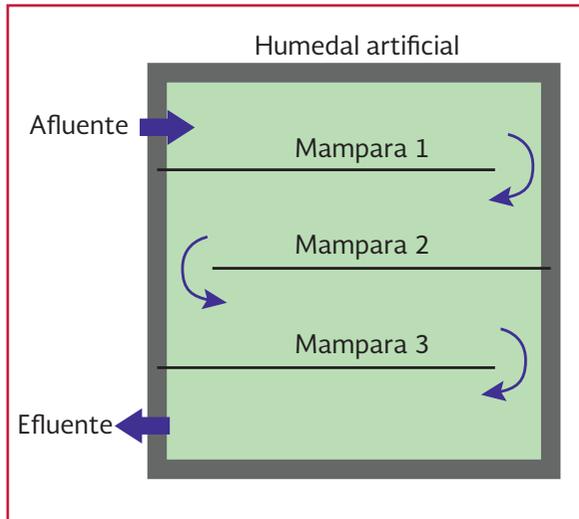
La geometría cuadrada, con una relación largo ancho 1:1 disminuye el riesgo de taponamientos, sin embargo presenta una mayor cantidad de flujos preferenciales, con lo que se reduce la eficiencia de remoción de contaminantes. Por lo tanto los humedales rectangulares, con una amplia relación largo-ancho, suelen ser más eficientes. Wood (1995) recomienda que esta relación sea mayor de 2:1 y menor de 4:1. Una manera sencilla, poco costosa y que no incrementa el tamaño del área por concepto del ancho de la corona de los bordos consiste en instalar mamparas de poliuretano, en la Ilustración 2.21 se presenta un esquema de ejemplo.

Cabe señalar que entre más pequeño sea el ancho de los canales, y mayor el caudal de tratamiento, se incrementa el fenómeno de colmatación. Otras formas geométricas, como la circular, forma amiboidea, o cualquier otra forma irregular presentan mayor riesgo de formación de zonas muertas y flujos preferenciales.

Ilustración 2.20 Uso de mallas ciclónicas para protección de las instalaciones



Ilustración 2.21 Esquema del flujo a través de un humedal artificial



No se cuenta con estudios específicos que determinen cuál es la óptima relación largo ancho, sin embargo puede citarse de una manera general que entre más angosto sea el canal, mayor es el riesgo de colmatación, pero también puede asumirse que entre más angosto sea el canal, se reduce el riesgo de formación de flujos preferenciales y de zonas muertas, con lo que se obtiene una mayor eficiencia de remoción de contaminantes. Evidentemente debe tomarse en cuenta la relación existente entre el ancho del humedal y el flujo de diseño. Coombes (1990) citan que la velocidad del flujo para diversos humedales, con variantes de porosidad, en el Reino Unido, varió entre 0.2 a 9.8 m/día. Se recomienda que el ancho de los canales no sea mayor de 10 metros. Para el caso de caudales mayores de 1.5 L/s es conveniente instalar módulos en paralelo en los que se distribuya el flujo. Esta recomendación presenta además la ventaja de facilitar las labores de operación y mantenimiento cuando se requiera dar mantenimiento a los lechos de tratamiento (Ilustración 2.22).

2.2.10. IMPERMEABILIZACIÓN

Para asegurar que el humedal no contamine al agua freática y evitar fugas de agua que afecten el balance hídrico, se debe realizar un buen trabajo de impermeabilización del fondo, los taludes y cualquier estructura dentro de los estanques.

La selección del tipo de impermeabilizante está en función de su disponibilidad y costo (UN-HABITAT, 2008), así como de las condiciones del sitio, puede ser suficiente una adecuada compactación del terreno, de lo contrario será necesario realizar aportaciones de arcilla o utilizar geomembranas (García y Corzo, 2008).

UN-HABITAT, 2008; ITRC, 2003; Tanaka *et al.*, 2011, nombran algunos de los materiales que generalmente se utilizan, los que estarán básicamente en función del costo y de la disponibilidad de materiales. El uso de arcilla se recomienda en aquellos casos en que su costo sea sustancialmente menor al de otras opciones y se tenga disponibilidad de suelos adecuados para su conformación, particularmente en sistemas que requieran grandes extensiones de terreno.

- Revestimientos sintéticos: PVC, polietileno de alta y baja densidad (Ilustración 2.23) y polipropileno
- Concreto (Ilustración 2.24a)
- Arcilla compactada (Ilustración 2.24b)

La Tabla 2.5 presenta las ventajas y desventajas de diferentes tipos de materiales que pueden ser usados para la impermeabilización del humedal.

Ilustración 2.22 Formas y tamaños de los humedales artificiales de flujo subsuperficial



Para la instalación de los materiales impermeabilizantes sintéticos, Reef Industries (2011) recomienda lo siguiente:

- Las condiciones del lugar pueden ser un factor determinante. Las rocas, con el tiempo, pueden perforar a través de casi cualquier material de revestimiento no importa lo fuerte que sea, por lo que si el sustrato es rocoso, se debe instalar una capa de geotextil o una barrera de arena para evitar perforaciones
- La empresa instaladora tiene la capacidad de poner el revestimiento en una sola pieza. Una vez que llega desde la fábrica, todo lo que necesitan hacer es desenrollar el revestimiento y colocarlo en su lugar. Si el tamaño, el peso del mate-

Ilustración 2.23 Impermeabilización mediante geomembranas. a) Con protección contra el sol con de grava, b) antes del relleno con grava



Ilustración 2.24 Impermeabilización a) con concreto, b) con arcilla



Tabla 2.5 Ventajas y desventajas para los diferentes tipos de materiales para impermeabilización (Reef Industries, 2011)

Material	Ventajas	Desventajas
Policloruro de vinilo (PVC).	<ul style="list-style-type: none"> Tiene una excelente resistencia a la abrasión y es difícil de perforar. Es también muy flexible, lo que permite que el revestimiento se ajusta con precisión a la base. Es fácil de unir, y es resistente a los productos químicos industriales más comunes. Está disponible en una variedad de espesores. En cuanto a costos, es el más rentable. 	<ul style="list-style-type: none"> Los revestimientos de PVC se dañan fácilmente por los rayos ultravioleta (UV).
Polietileno de alta densidad.	<ul style="list-style-type: none"> Específico para condiciones extremas. Estabilizada a los rayos UV. Excelente resistencia a rompimientos y ofrece una excepcional estabilidad dimensional. 	<ul style="list-style-type: none"> Las desventajas son el costo y la rigidez del producto.
Polipropileno.	<ul style="list-style-type: none"> Es uno de los materiales de revestimiento más duraderos (hasta 40 años). El PP reforzado tiene una excelente resistencia al desgarre y a los rayos UV, además es altamente resistente a los químicos. La principal ventaja del polipropileno es que se trata en grandes hojas. Otros materiales pueden ser limitados en ancho. 	<ul style="list-style-type: none"> El polipropileno es más caro que el PVC y polietileno de alta densidad.
Arcilla	<ul style="list-style-type: none"> Es adecuada dependiendo de las condiciones locales, puede ser suficiente una compactación del terreno con aportaciones de arcilla. (García y Corzo, 2008). 	

rial y las condiciones del lugar requieren un revestimiento de varias piezas, estas se pueden unir en el sitio

- Los bordos deben ser asegurados enterrándolos en una zanja, un enrocamiento, protección mediante concreto o un control de erosión sintético

Los requerimientos de geotextiles y sus características deben ser determinados a partir de los estudios geotécnicos y para ello es recomendable consultar con una empresa especialista en geomembranas. Sin embargo se ha observado en campo, en humedales en los que se utilizaron materiales geotextiles, que éstos fueron destruidos por la intemperización en un tiempo menor de cinco años, y colateralmente producen problemas de colmatación del medio filtrante donde se incorporan como partículas de sólidos.

De acuerdo con el arreglo de los estanques, la geomembrana se debe sujetar en la corona de los bordos perimetrales y en el central. Los bordos transversales se deben cubrir totalmente para evitar que con los cambios de temperatura se provoquen levantamientos de las coronas. La geomembrana que se suministra en rollos debe unirse mediante termo-fusión con doble línea para garantizar la unión. En el caso de las cajas de válvulas y de distribución, así como las tuberías que quedan dentro de los estanques, se deben cubrir con geomembrana, moldeando su forma.

García y Corzo (2008), cita que en el caso de impermeabilización con arcilla, las capas de este material se disponen hasta alcanzar un espesor normalmente de 0.3 m y una permeabilidad inferior a 6 cm/segundos. Primero se debe instalar una capa gruesa de cal (de 2 a 4 cm) para separar el terreno natural de la capa de arcilla. Después se colocan capas de arcilla

de 5 a 6 cm de espesor, estas deben mantenerse húmedas todo el tiempo, e ir compactando a medida que se va colocando.

2.2.11. RECIRCULACIÓN

La EPA (2000a), describe el proceso de recirculación como la introducción del efluente tratado a la entrada o en alguna otra ubicación interna del humedal. Recircular el efluente ayuda a disminuir las concentraciones de los contaminantes del afluente y aumentar las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) cerca de la entrada. El aumento del OD puede ayudar a reducir los olores de entrada, obtener una concentración de DBO menor, y aumentar el potencial de nitrificación en las zonas de aguas abiertas.

Si se considera la recirculación, los efectos en el balance de agua y el sistema hidráulico de los humedales deben ser analizados. Cabe mencionar que para realizar la recirculación deben utilizarse equipos de bombeo, lo que demandará el uso de energía eléctrica y consecuentemente el incremento de los costos de operación, es por esto que no es común que se lleve a cabo.

Las estructuras de entrada y salida distribuyen y controlan la trayectoria del flujo en el humedal. Para garantizar los rendimientos esperados en un humedal construido, se requiere de flujos uniformes tanto en la entrada como en la salida (Estrada, 2010). Múltiples registros de entrada y salida separadas en los extremos de los humedales son esenciales para asegurar una distribución uniforme del afluente y de flujo por el humedal.

La instalación de dobles registros en entradas y salidas en las celdas de tratamiento ayudan a evi-

tar «zonas muertas». Los dispositivos de entrada, interconexión y salida deberán diseñarse en la forma más simple posible, evitando la utilización de válvulas y mecanismos que se deterioren por efecto de las características corrosivas del agua residual y mayormente por el poco uso.

Para humedales superficiales pequeños o estrechos, se emplea tubería de PVC perforada, como estructura de entrada y salida. La longitud de la tubería debe ser aproximadamente igual a la anchura del humedal, con perforaciones uniformes a lo largo de la tubería. El tamaño de los tubos, y el tamaño y el espaciamiento de los orificios dependerán de la velocidad de flujo de aguas residuales y el sistema hidráulico de las estructuras de entrada y salida. Es importante que los orificios sean suficientemente grandes para reducir al mínimo la obstrucción con sólidos. En algunos casos, los tubos perforados de las estructuras de entrada y salida se cubrirán con grava para proporcionar una distribución más uniforme o colección de flujos (EPA, 2000a).

Tal como se muestra en la Ilustración 2.25, el flujo de distribución en un humedal con un único punto de salida se ve comprometido y el tiempo de residencia hidráulica se reduce, y se presenta la formación de zonas muertas y flujos preferenciales, en función de la ubicación de dichas estructuras (Kadlec y Knight, 1996).

Tal como se muestra en la Ilustración 2.26, un dispositivo de salida variable o codo giratorio constituye un accesorio sencillo, que permite el control del nivel de agua en la celda del humedal (Lara, 1999).

En la Ilustración 2.27 se muestra que el esquema a) corresponde a la colocación de un tubo de entrada, sin un tubo transversal de distri-

bución, que constituye a la opción menos recomendable, ya que presentara mayores deficiencias hidráulicas hacia el interior del lecho del humedal, particularmente hacia la zona de la entrada. La opción b), construida mediante perforaciones en el tubo de distribución le sigue en orden de riesgo de colmatación, ya que las perforaciones tienden a taponarse con sencilla rapidez. La opción c), es mejor que las dos anteriores, sin embargo incrementa el costo debido a la instalación de reducciones a partir del tubo de distribución. La opción d), que corresponde a un vertedero, es la más recomendable, ya que no se colmata con facilidad, su limpieza es sencilla y distribuye el caudal adecuadamente. Para los sistemas de humedales más grandes, se utilizan múltiples vertederos hidráulicos, generalmente para las estructuras de entrada y salida (Ilustración 2.28b).

En la Ilustración 2.28a se muestra un detalle de la Ilustración 2.27b, y en la Ilustración 2.28b se observa un detalle de la Ilustración 2.27d. En las estructuras de entrada y salida se recomienda utilizar rocas gruesas, de entre 15 y 20 cm, con el objeto de evitar colmataciones.

Cuando se construyen humedales con forma cuadrada y se instala una sola tubería de distribución a la entrada del lecho y una de recolección en la salida del mismo, se suele presentar una gran cantidad de flujos preferenciales y zonas muertas. Estudios demuestran que el tiempo teórico de residencia hidráulica disminuye significativamente como consecuencia de la formación de flujos preferenciales (ver Ilustración 2.29).

Con el incremento de la relación largo ancho se reduce la posibilidad de generar estos flujos preferenciales; sin embargo, se incrementa

Ilustración 2.25 Efecto de las estructuras de salida en la distribución del flujo en humedales de flujo superficial (Kadlec y Knight, 1996)

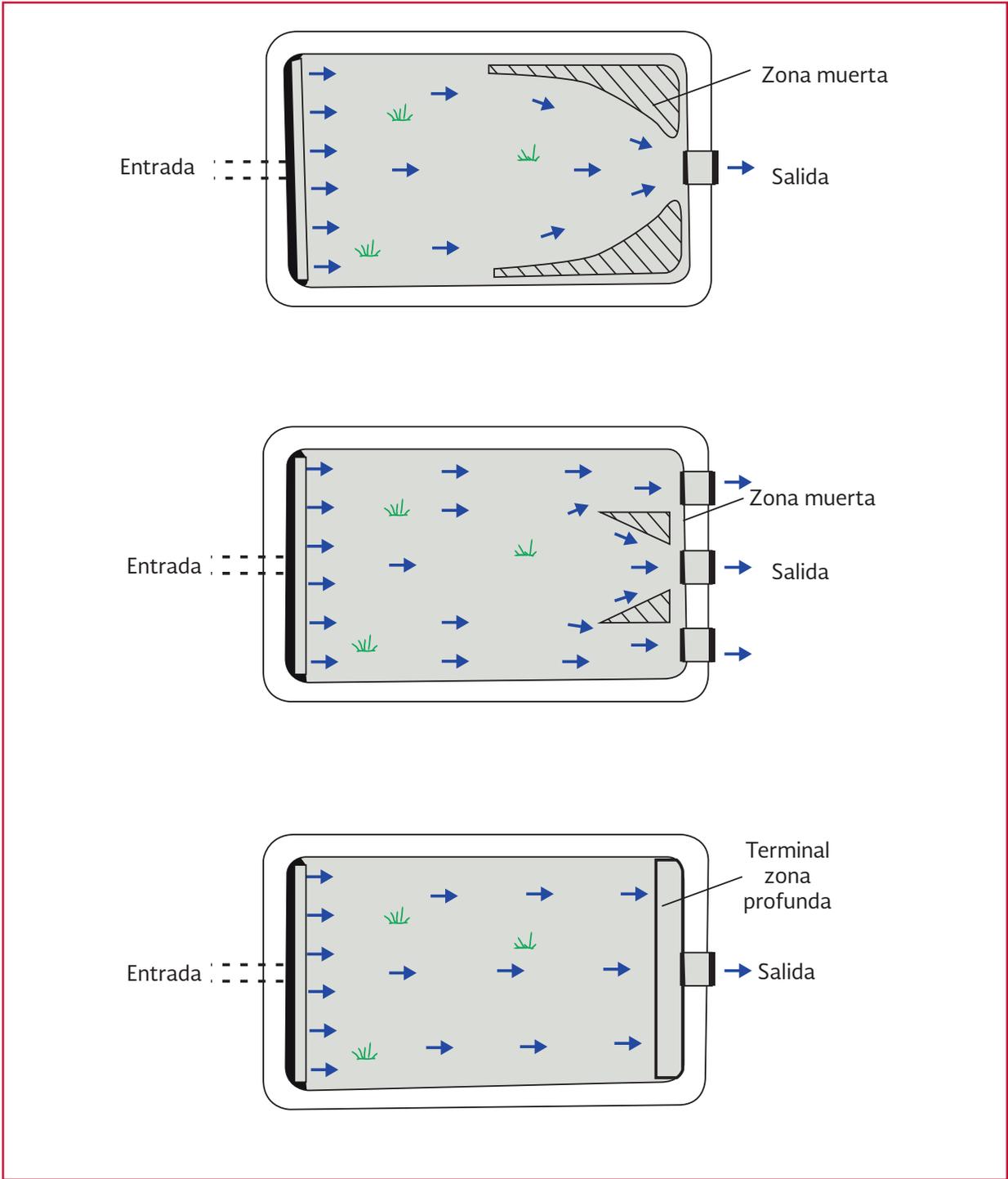
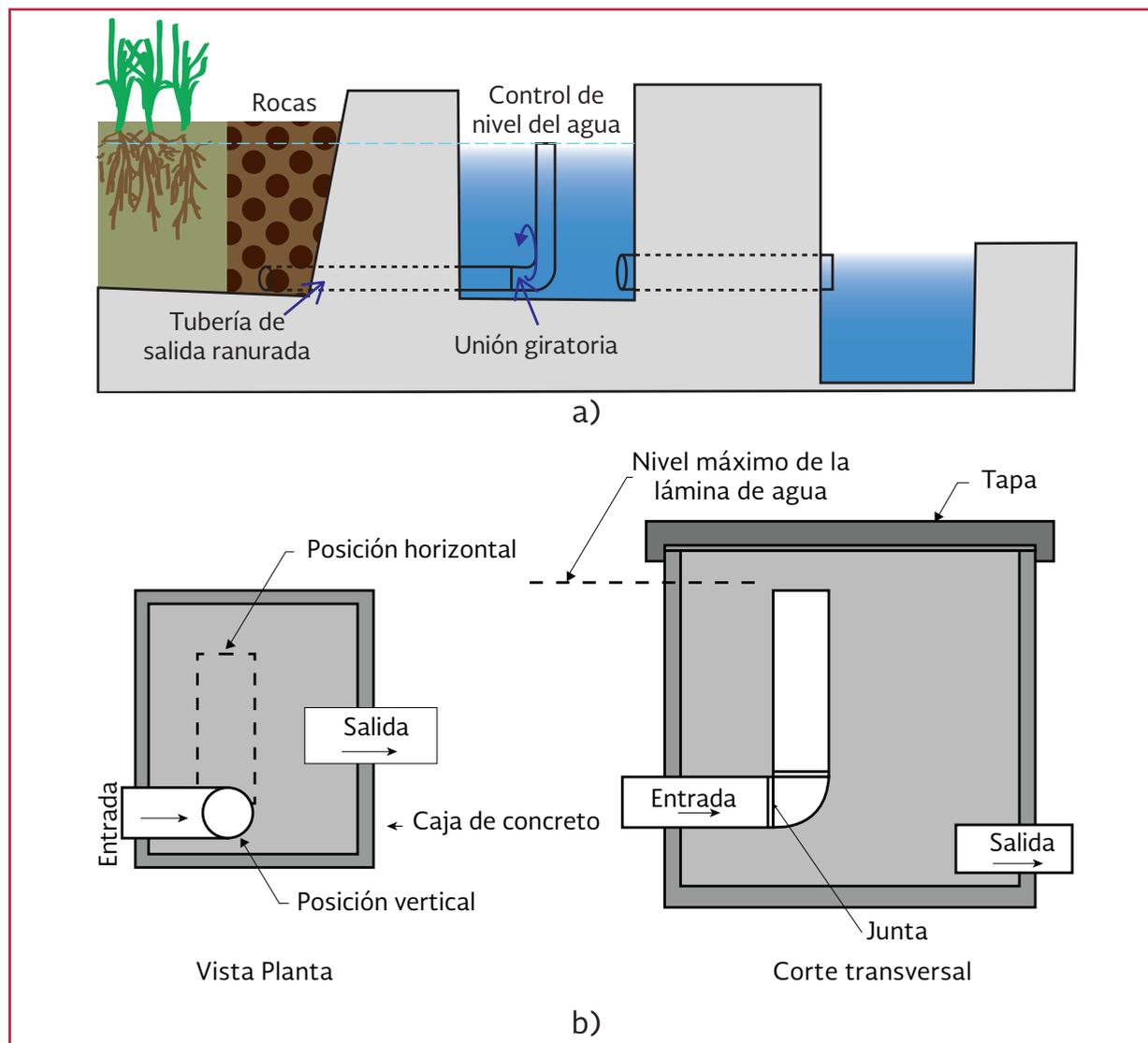


Ilustración 2.26 Diseño típico de una estructura de salida con control de nivel (Kadlec y Knight, 1996; Crites et al., 2006)



la posibilidad de colmatación en los primeros metros del humedal. Ante esta situación se recomienda diseñar, adecuadamente el pretratamiento considerando un factor de protección considerable que permita evitar la introducción de sólidos al medio de soporte. En algunos casos es aconsejable la colocación de mamparas dentro del humedal, con el objeto de propiciar un flujo tipo pistón, en el que se reduzca la dispersión y los flujos preferenciales.

Tomando en cuenta que es en los primeros metros del humedal en donde se realiza la retención de sólidos y se reduce la concentración de materia orgánica, lo ideal sería instalar de una manera especial, dentro de un tren de tratamiento, un primer humedal cuya construcción sea más resistente y soporte una frecuente restauración, como lo es la extracción y sustitución del medio filtrante y de las macrófitas, limpieza de las tuberías de distribución y recolección, confor-

Ilustración 2.27 Diseños entrada de para la distribución del caudal (McBrien, 2000)

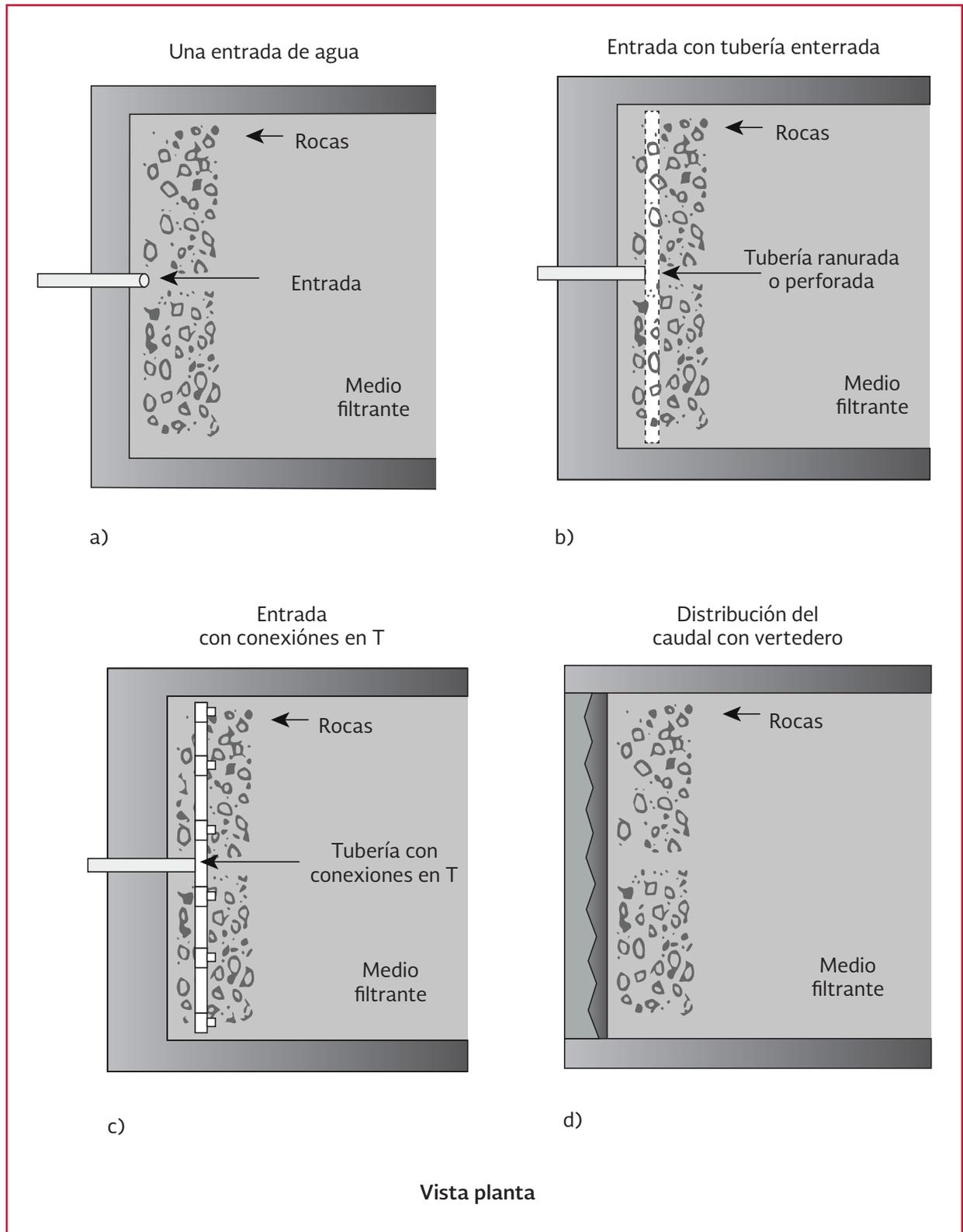
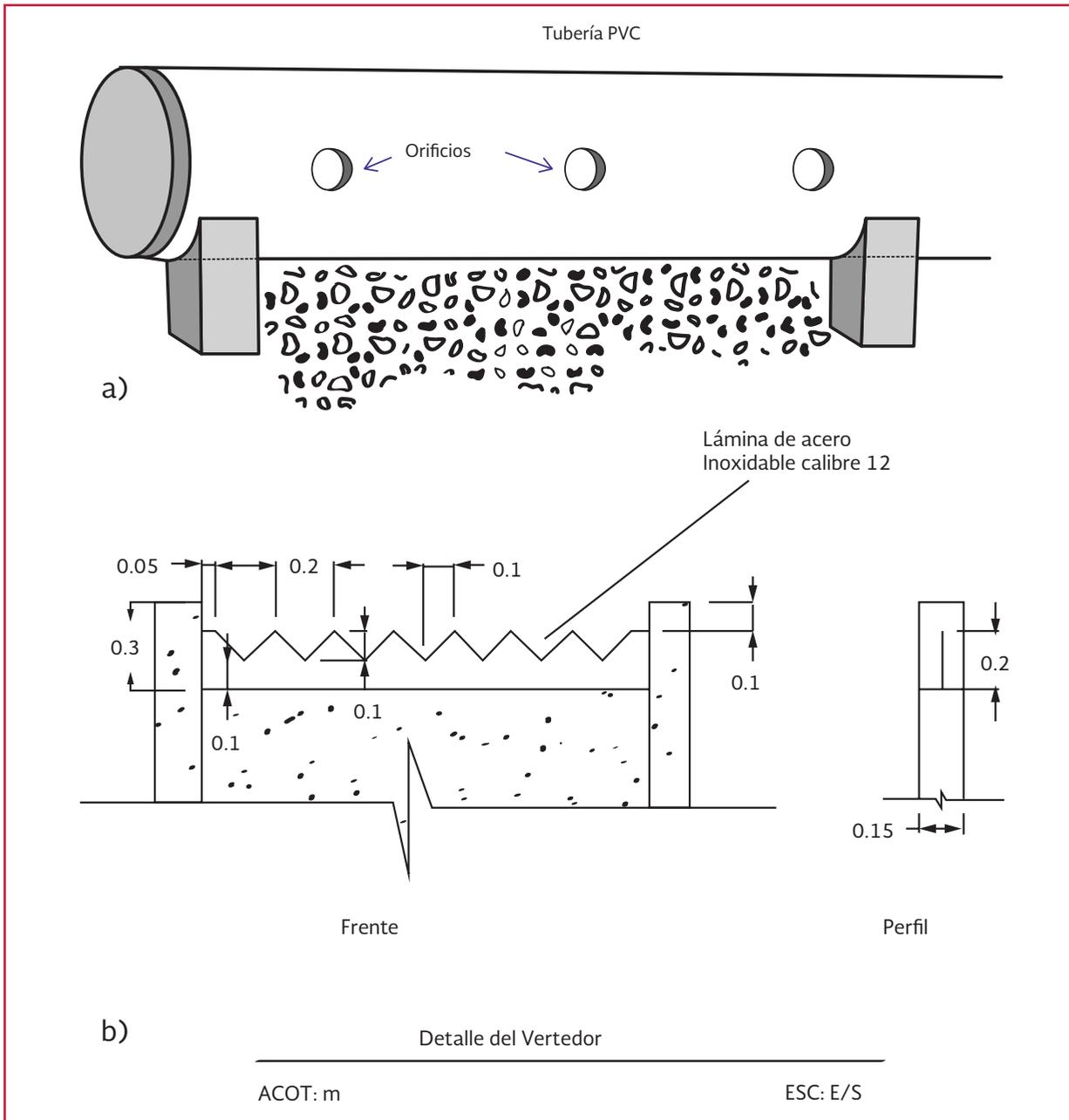


Ilustración 2.28 Alternativas para distribución de caudal (Kadlec y Knight, 1996)



me se vaya demandado durante la operación y mantenimiento. Se recomienda que el primer estanque sea impermeabilizado mediante arcilla, la que a partir de una prueba de laboratorio demuestre ser un material que pueda utilizarse en la impermeabilización.

En la Ilustración 2.30, se presenta los flujos preferenciales con respecto de la ubicación de

la estructura de salida. La corriente preferencial se presenta en un tono más oscuro. Se presenta una diferencia significativa en la velocidad de flujo y por lo tanto, el tiempo de residencia tiende a disminuir con el incremento de esta tendencia.

En la Ilustración 2.31, se presenta, de manera esquemática, la manera en que las formas y las

Ilustración 2.29 Flujos preferenciales mediante el uso de trazadores: a) Zona de entrada al humedal, mediante tubería perforada, b) flujo preferencial superficial sobre el lecho del humedal



infraestructuras de entrada y salida, afectan la eficiencia del proceso.

- a) Es un ejemplo de mala configuración, se presenta la formación de flujos preferenciales que disminuyen la eficiencia del proceso
- b) Es una pobre configuración, ya que favorece la formación de zonas muertas en las esquinas
- c) Es una buena configuración, ya que tiene múltiples entradas y salidas además de favorecer el flujo pistón (no incluye separación por diques, las líneas punteadas únicamente indica el favorecimiento del flujo)
- d) Es una muy buena configuración ya que existe una separación física por diques (canales), que garantiza un mejor comportamiento del flujo además de incluir una redistribución intermedia
- e) Es la mejor configuración, ya que incluye una zona de distribución, redistribución intermedia y colección. Además de una separación física por diques que garantiza la minimización de zonas muertas y

por lo tanto el aprovechamiento eficiente del área de tratamiento

2.3. HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

2.3.1. PROFUNDIDAD DE LOS LECHOS

La profundidad de un humedal de flujo subsuperficial se determina con base en la profundidad que pueden alcanzar las raíces de las macrofitas, de modo que se garantice que éstas se encuentren en contacto con el agua y tengan un efecto en el tratamiento.

Un sistema de flujo subsuperficial típico presenta un espesor de 30 a 70 cm de lecho. Es conveniente tener una profundidad total mayor al tirante de agua con la finalidad de asegurar una zona seca en la parte superior del lecho (Reed *et al.*, 1995). La mayoría de los humedales de flujo horizontal en Europa presentan una profundidad de lecho de 60 cm (Cooper *et al.*, 1996), mientras que en Estados Unidos comúnmente

Ilustración 2.30 Ubicación de las estructuras de entrada y salida

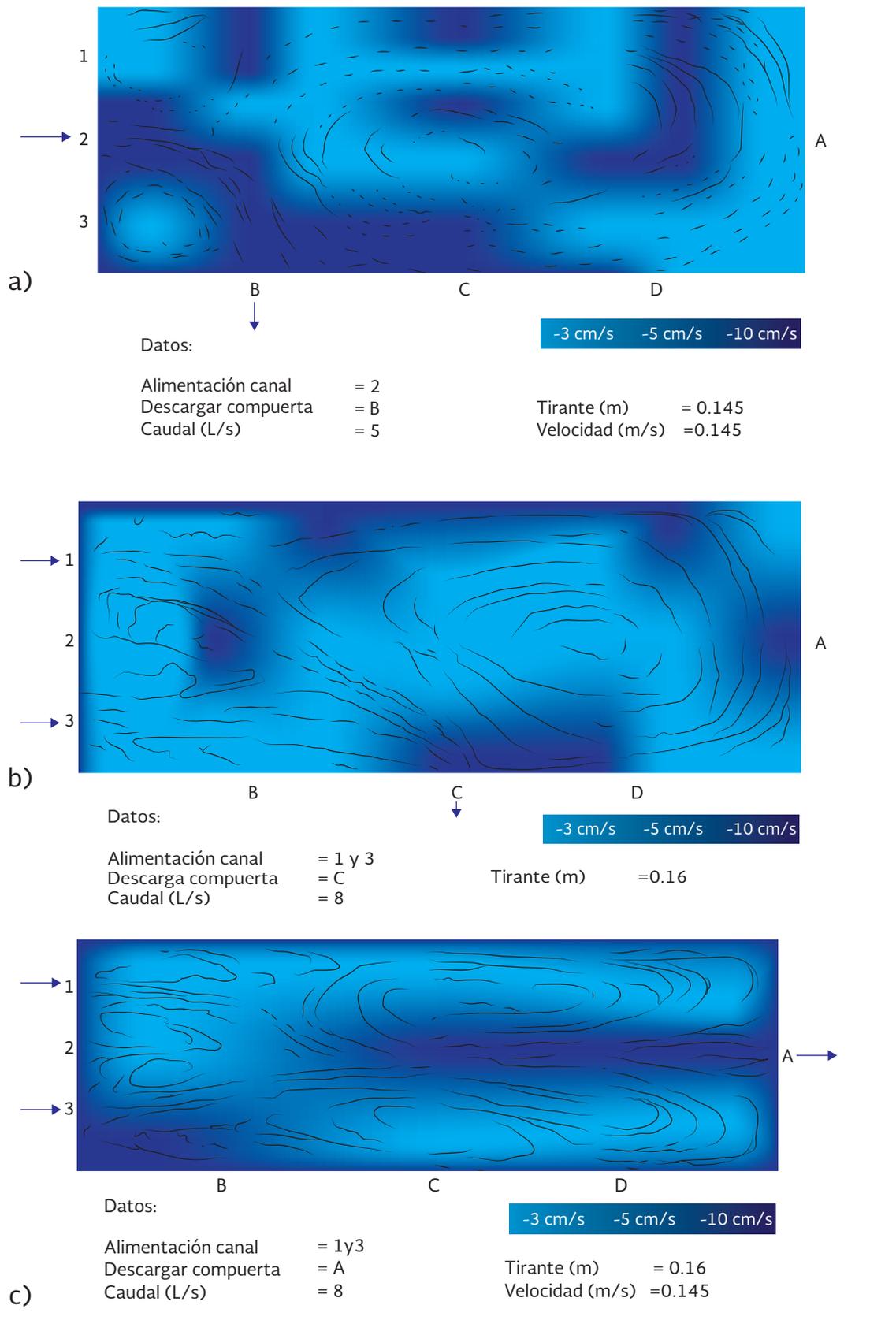
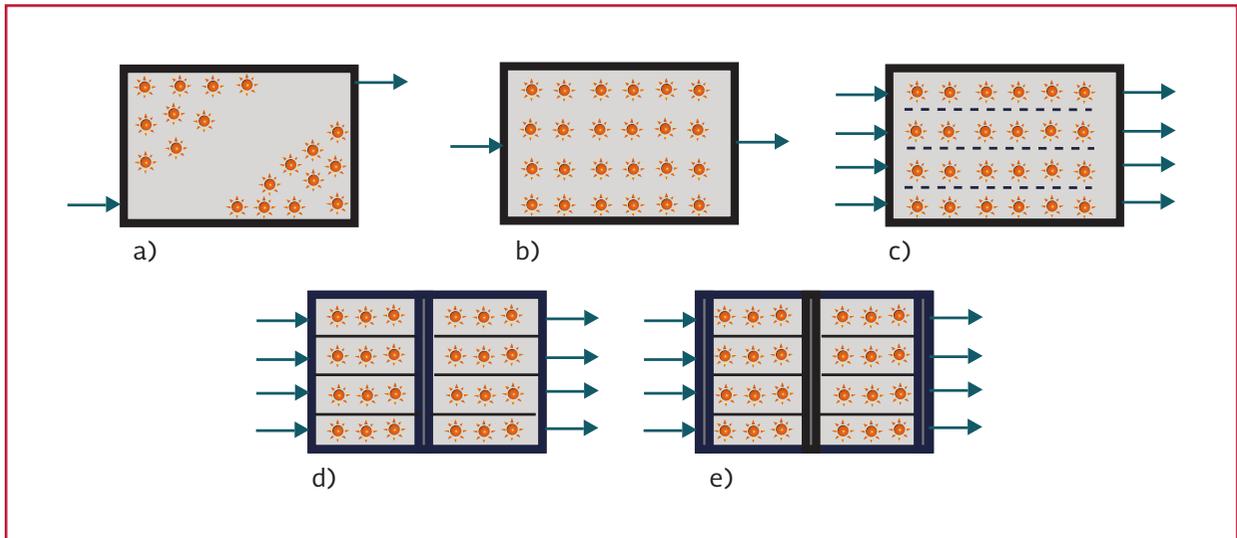


Ilustración 2.31 Variantes de configuración para la distribución de flujo en un humedal



se han diseñado de 30 a 45 cm (Steiner y Watson, 1993). Lo anterior depende de las macrófitas utilizadas.

2.3.2. MATERIAL DE EMPAQUE

Los sistemas de flujo subsuperficial consisten de estanques con un material filtrante, como lo es la grava o la arena, a través del cual fluye el agua con una baja velocidad.

El tamaño del medio filtrante colocado en la entrada del humedal (Ilustración 2.32) debe graduarse de grueso a fino, para reducir el riesgo de obstrucción (Tanaka *et al.*, 2011). En algunas zonas de México se pueden utilizar capas de tezontle a profundidades de 50, 25 y 10 cm, desde el fondo hacia la superficie, con diámetros de 4-5 cm, 2-4 cm, y 1-2 cm, respectivamente.

Cabe señalar, que desde el punto de vista económico, es recomendable utilizar materiales

Ilustración 2.32 Colocación del medio filtrante. a) grava con diámetro de 1 a 1.5 cm colocada sobre grava con diámetros de 2 a 3 cm, b) Colocación de diversas capas de grava (arcilla en el fondo, y grava de 2 a 5 cm en la superficie)



que se encuentren disponibles en la región. Se recomienda utilizar piedras entre 10 y 15 cm, por ejemplo la conocida como piedra-bola de río en la Ilustración 2.33 se muestra este caso.

Ilustración 2.33 Uso de piedras de río como medio filtrante



El humedal subsuperficial tiene dos zonas, la zona de entrada y la zona de salida, usualmente conocidos como cabezales se utilizan para distribuir y recoger el agua con menor riesgo de taponamiento. En la Ilustración 2.34 se observa que la tubería de distribución de caudal está inmersa en el cabezal, el que le sirve tanto de soporte, como de protección.

2.3.3. SIEMBRA DE ESPECIES

En un clima templado, como es el caso del humedal ubicado en la localidad de Santa Fe de la Laguna, en la rivera del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México; cuando se utiliza el tule (*Thypha latifolia*, *Scirpus lacustris*) en los humedales artificiales, se desarrolla una densidad final aproximada de 50 individuos por cada metro cuadrado. Por tanto, se recomienda realizar la siembra a una distancia de separación de un

metro (Ilustración 2.35). Sin embargo, es posible la siembra con distancias entre 50 y 75 cm, cuando se requiera acelerar el desarrollo de la vegetación para que luzca más densa y verde.

Cabe señalar que la siembra debe realizarse cuando ya se haya introducido el agua a los lechos (Ilustración 2.36a). Como una generalidad se recomienda realizar la siembra en los inicios de la temporada de lluvias con el objeto de reducir el riesgo de que el humedal no tenga la suficiente agua, para que cubra la zona de las raíces de las macrófitas. Sin embargo, es importante revisar para la planta vegetal seleccionada, las características específicas para la siembra, de tal manera que se minimice el riesgo de que las plantas no se desarrollen. Por tanto es importante conocer como mínimo las siguientes características:

Es aconsejable para reducir el riesgo de la mortandad de las macrófitas, que una vez que hayan sido extraídas por ejemplo de alguna zona de un lago o humedal natural cercano, evitar exponer las raíces al aire, ya que esto las puede afectar, por lo que tan pronto como sean extraídas deben introducirse en tinas que contengan agua, y de este modo ser trasladadas hasta el sitio donde se ubica el humedal. También es importante comentar que antes de realizar el traslado de las macrófitas ya debe de haberse realizado la excavación de los pozos en donde van a ser sembradas, cada pozo con una profundidad aproximada entre 30 y 40 cm esto con el fin de reducir el tiempo de que las macrófitas permanezcan fuera del agua.

Antes de realizar la siembra de especies vegetales en los HFSS, se recomienda llenar con agua el estanque entre 30 y 40 cm de profundidad, con el objeto de que las macrófitas tengan contacto directo con el líquido y puedan disponer

Ilustración 2.34 Colocación del cabezal de distribución de caudal



Ilustración 2.35 Esquema de la distancia de siembra en un humedal artificial

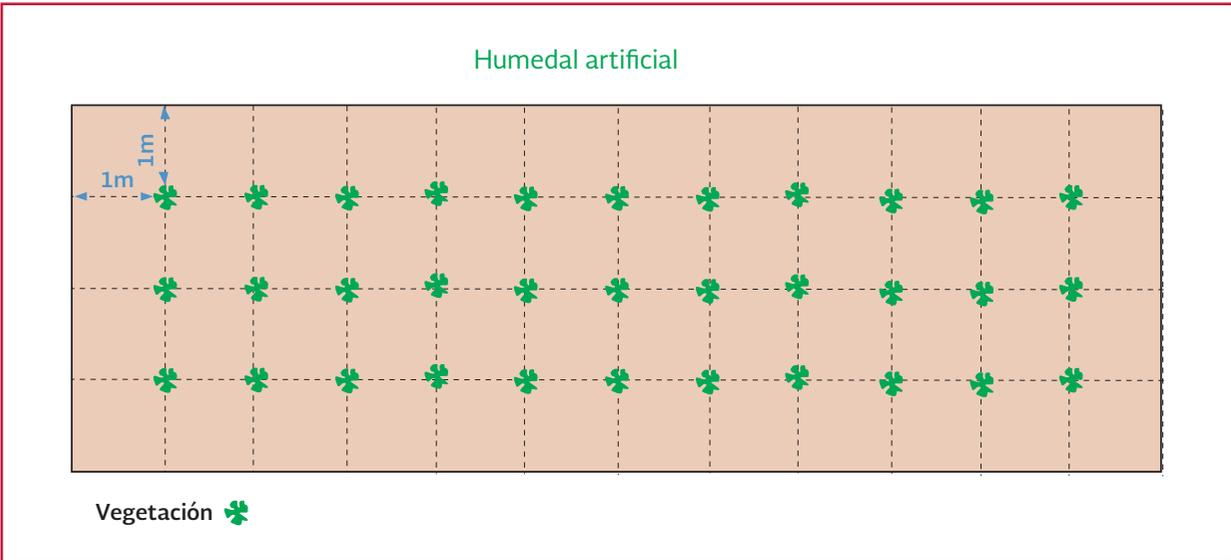


Ilustración 2.36 Plantado de especies vegetales. a) siembra de especies, b) humedal terminado de sembrar



de los nutrimentos. Posteriormente se debe incrementar la profundidad hasta los 50 cm. La vegetación debe monitorearse frecuentemente, si se encuentran macrófitas muertas se deben replantar más de la misma especie.

Cooper (1993) recomienda usar semillas debido a que cubren más rápido el lecho de manera uniforme, no obstante, requiere de mayores cuidados para su desarrollo. Se deben plantar cuatro semillas por metro cuadrado.

2.3.4. RECOMENDACIONES DE DISEÑO

Aunque se han planteado muchas recomendaciones de diseño, cada caso en particular se debe tratar con especial cuidado. Las recomendaciones dependen de variables como la climática, las especies vegetales utilizadas y tipo de humedal. Por tanto, se deben tener reservas en este sentido.

El tiempo de residencia hidráulica, por ejemplo, recomendado por Tchobanoglous y Bur-

ton (1991) varía entre cuatro y 15 días, dependiendo del tipo de contaminantes, las tasas de remoción de contaminantes y de los objetivos de tratamiento; Kadlec y Knight (1996) citan un tiempo de retención hidráulica de 5 a 10 días. La remoción de DBO en un humedal varía entre 70 y 95 por ciento en función del tiempo de retención hidráulica.

Es factible obtener una concentración de DBO en el agua tratada menor de 25 mg/L, sin embargo no se puede obtener un valor menor de 10 mg/L debido a los residuos orgánicos propios del sistema (EPA, 2000a). En la Tabla 2.6 se resumen los criterios de diseño de los humedales de acuerdo con EPA, 2000a.

Los criterios a tomar en cuenta en el diseño dependen de algunas variables como: las concentraciones y los tipos de contaminantes presentes en el agua residual a tratar. Es muy importante tomar en cuenta, los tipos de vegetación, unidades de pretratamiento, aspectos económicos (costos de diseño, construcción, operación y mantenimiento). Wood (1995), propone los siguientes aspectos físicos y cinéticos:

Tabla 2.6 Resumen de algunas recomendaciones de diseño para humedales de flujo subsuperficial (EPA, 2000a)

Parámetro	Criterio
Área superficial	Basado en una calidad del efluente esperada y en términos de cargas por área.
DBO	6 g·m ² /d para efluentes con 30 mg/L
DBO	1.6 g·m ² /d para efluentes con 20 mg/L
NTK	Utilizar tratamiento adicional conjuntamente con los FSSH.
PT	Los recomendados para remoción de fósforo.
Profundidad (depende de la macrófita)	
Superficie del lecho	0.5-0.6 m
Profundidad mojada	0.4-0.5 m
Largo	Según lo calculado, mínimo de 15 m
Ancho	Según lo calculado, máximo de 61 m
Pendiente del fondo	0.5%-1 %
Pendiente de la superficie	Nivelado (cercano al horizontal).
Conductividad hidráulica, K	
Primer 30% de la longitud	Uso del 1% de K para cálculos de diseño
Último 70% de la longitud	Uso del 10% de K para cálculos de diseño
Medio filtrante	
Primeros 2 m	40-80 mm
Tratamiento	20-30 mm
Efluente, último m	40-80 mm
Medio filtrante plantado, los 10 cm superficiales	5-20 mm
Misceláneo	Utilice como mínimo dos humedales en paralelo Utilice una estructura de entrada para dar balance al flujo Utilice una estructura de entrada para dar balance al flujo

- Carga orgánica superficial: 75 - 85 kg/(ha d) en sistemas inundados y 70 - 80 kg/(ha d) en sistemas de flujo subterráneo
- Profundidad de las unidades: 0.30 - 0.50 m en sistemas inundados y 0.40 - 0.70 m en sistemas de flujo subterráneo
- Gasto del sistema: Módulos menores de 10 L/s
- Tiempo de retención hidráulica de 6 a 15 días en sistemas inundados, 3 a 7 días en sistemas de flujo subterráneo
- Relación largo ancho, mayor de 2:1 y menor de 4:1
- Tipo de sustrato: Grava con diámetro entre 10 y 15 centímetros
- Cubrir requerimientos de DBO, SST, pH, concentración de amonio y de OD

(tasas de transferencia de oxígeno para los sistemas de flujo subsuperficial, para la remoción de DBO y de nitrógeno)

Otras recomendaciones de diseño son las siguientes:

- La suficiencia de la conductividad hidráulica del material filtrante tiene que ser probada con la aplicación de la ley de Darcy u otro método adecuado de cálculo
- Se recomienda un bordo libre entre 15-30 cm para la acumulación de agua
- Debe procurarse que tanto la tubería de distribución como la de recolección se encuentren perfectamente niveladas, con las ranuras espaciadas de manera uniforme, y que incluyan codos de 45°

a distancias entre 5-7 m para facilitar su limpieza

- En los casos en los que se requiera reducir de manera importante la concentración de nitrógeno se recomienda instalar tuberías que permitan desviar una parte del agua desde la entrada del humedal hacia partes posteriores del tratamiento, con objeto de proporcionar el carbono adicional requerido para la desnitrificación
- Se recomienda colocar una capa de arcilla con un espesor de 7-10 cm sobre el fondo impermeabilizado mediante geomembrana o concreto, con objeto de propiciar la retención de fósforo
- La superficie del medio de empaque debe estar completamente plana y sin pendiente con el objeto de evitar que después del sembrado algunas macrófitas queden más lejos del área húmeda, además de que se deben evitar áreas inundadas sobre la superficie cuando se requiera incrementar la profundidad de operación, por ejemplo durante la temporada fría, a fin de incrementar el tiempo de retención hidráulica
- Las macrófitas deben ser nativas, ya que se deben seleccionar las que ya se encuentran adaptadas al clima local y que se encuentren presentes en cuerpos de agua de la zona. El objetivo es incrementar las posibilidades de su buen desarrollo, además de evitar la introducción de especies no locales que pudieran afectar a la flora de la región
- En algunos casos, podría ser recomendable la instalación de mamparas dentro del lecho del humedal con el objeto de garantizar el flujo pistón, para mejorar la hidráulica al reducir la formación de flujos preferenciales y zonas muertas

La información y parámetros requeridos para el diseño de humedales son:

1. Caracterización analítica representativa del agua residual a tratar
2. Disponibilidad de terreno (a priori considerar un área aproximada de 4 m²/hab para la zona de influencia)
3. Disponibilidad y costos de tezontle o grava
4. Tipo de suelo del sitio
5. Accesibilidad del área donde se planea construir el humedal
6. Porcentaje y edad del sistema de alcantarillado
7. Distancia del sitio de descarga al sitio asignado para el humedal y tipo de suelo por donde se conducirán las aguas residuales
8. Existencia de un tratamiento previo (tanque séptico, rejillas)
9. Utilizar únicamente macrófitas de la región que puedan aprovecharse en los humedales
10. Población actual y población proyectada
11. Normativa con respecto del cuerpo receptor o tipo de reúso

2.3.5. ASPECTOS HIDRÁULICOS

Las características hidrodinámicas de cualquier tipo de humedal vienen denominadas por distintos parámetros: los caudales entrantes y salientes, la precipitación, la evaporación, la circulación del agua a través del medio poroso, los perfiles de agua de este medio y otros fenómenos o anomalías (García *et al.*, 2004).

Los modelos cinéticos determinan el área superficial necesaria para la degradación de contaminantes específicos en humedales artificiales.

La hidráulica es crítica para alcanzar las remociones esperadas y el objetivo de este análisis es determinar el área transversal al flujo.

Para poder considerar que un HFSS posee un régimen de flujo próximo al de flujo pistón ideal, se requiere un arreglo hidráulico riguroso y unos métodos constructivos apropiados. El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia es impuesta por la vegetación, el medio filtrante, las raíces de las macrófitas y los sólidos acumulados en los HFSS. La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema. La mejor solución práctica, en lo referente a la construcción, es proveer al humedal de un fondo con una inclinación que sea suficiente para permitir un drenaje completo cuando sea necesario y una salida de altura variable con el nivel de agua (Mena *et al.*, 2008).

La relación largo-ancho del humedal tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del agua. En teoría, grandes relaciones largo-ancho (10:1 o mayores) asegurarían un flujo pistón, pero tienen el inconveniente de que cuanto mayor es la relación largo-ancho, menor es el área transversal al flujo y,

por lo tanto, es más susceptible de colmatarse, sobre todo al principio del humedal, donde el agua se desbordaría debido al incremento en la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos. Por tanto, relaciones de 2:1 hasta aproximadamente 4:1 son aceptables. Los cortocircuitos pueden ser minimizados con una cuidadosa construcción y mantenimiento del fondo del humedal, con el uso de múltiples celdas, e intercalando zonas abiertas (sin vegetación) para la redistribución del flujo.

Para el caso del medio de soporte, en caso de no contar con una caracterización, se pueden utilizar las recomendaciones de la Tabla 2.7 y Tabla 2.8.

Una etapa importante en el proceso de diseño es la determinación del nivel de agua a través del humedal, para asegurar que el agua residual no llegue a la superficie del medio. Como todo sistema de flujo por gravedad, el nivel de agua está controlada por la elevación del dispositivo de salida, así como por el gradiente hidráulico, o pendiente, la cual se manifiesta a través de la pérdida de carga entre la entrada y salida.

La relación entre el flujo a través del medio poroso y el gradiente hidráulico se describe mediante la ecuación de Darcy. Esta ecuación

Tabla 2.7 Características típicas del medio filtrante para humedales artificiales de flujo subsuperficial (EPA, 1993a)

Tipo de medio	Tamaño Efectivo	Porosidad	Conductividad Hidráulica
	Ø mm	%	m ³ /m ² d
Arena de cuarzo	2	32	1 000
Arena graduada	8	35	5 000
Grava fina	16	38	7 500
Grava media	32	40	10 000
Roca de cuarzo	128	45	100 000

Tabla 2.8 Valores típicos de conductividad hidráulica para materiales de los suelos

Textura del suelo	Conductividad hidráulica, m/d
Grava, arena gruesa	>36.0
Arena gruesa, media	6.0–36.0
Arena fina, arena arcillosa	2.4–6.0
Franco arenoso, franco	1.2–2.4
Limo, franco limosa poroso	0.6–1.2
Franco arcillo limosa, franco arcilloso	0.3–0.6

asume un flujo laminar a través del medio y se puede utilizar para la determinación del nivel de agua en el medio poroso.

La determinación de las dimensiones del medio es indispensable para el funcionamiento hidráulico del humedal. En el medio, las zonas de entrada y salida podrían contener materiales de entre 40 y 80 mm de diámetro con la finalidad de minimizar el taponamiento (Ilustración 2.37). Aunque depende del caso, la zona de entrada podría tener al menos dos metros de largo y la zona de salida de al menos un metro.

2.3.6. EJERCICIOS DE DISEÑO

A continuación se presenta un ejemplo de diseño, cabe señalar, que los parámetros de diseño deben de obtenerse a partir de la caracterización de la descarga de aguas residuales.

2.3.6.1. Ejercicio 1

El ejemplo consiste en diseñar un humedal artificial de flujo subsuperficial para el tratamiento del agua residual, con un caudal de 3.0 L/s (259.2 m³/d) utilizando el modelo propuesto por la EPA. En la Ilustración 2.38 se presenta el tren de tratamiento. Para el diseño del humedal se puede asumir que el humedal se encuentra dividido en cuatro secciones (EPA, 2000a):

- Se considera una zona de entrada y una de salida para la distribución y captación del caudal respectivamente tal como se indica en la Ilustración 2.37. Tanto el ancho de la sección como la granulometría depende de las condiciones específicas
- La zona inicial, ocupa el 30 por ciento del área de tratamiento total. Se considera una conductividad hidráulica equivalente

Ilustración 2.37 Componentes del balance hidráulico del humedal de flujo subsuperficial de tipo horizontal

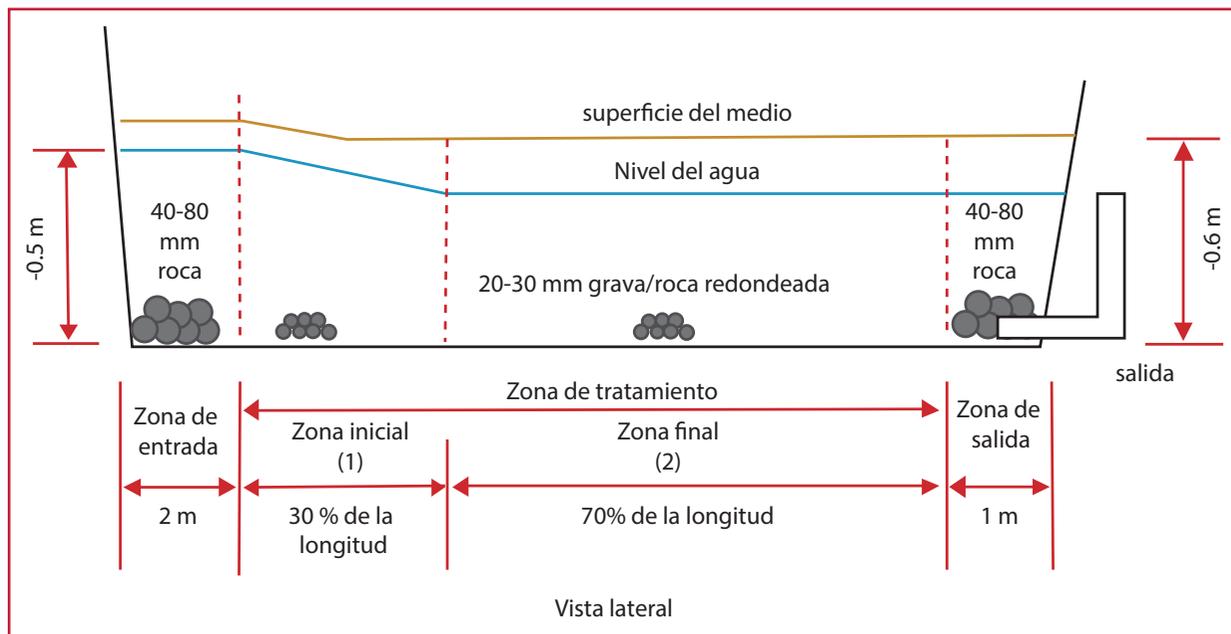
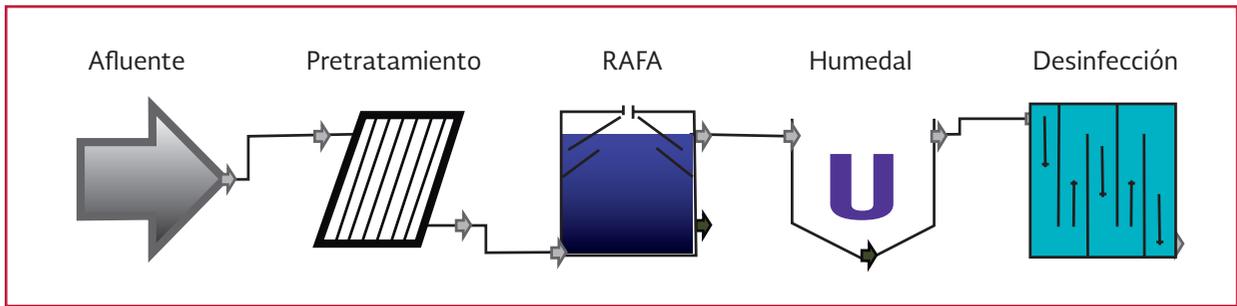


Ilustración 2.38 Diagrama de flujo, ejemplo 1



- al uno por ciento de la conductividad en condiciones limpias
- La zona final, ocupa el 70 por ciento del área de tratamiento total. Se considera una conductividad hidráulica equivalente al 10 por ciento de la conductividad en condiciones limpias

En la Tabla 2.9 se presentan los datos para el diseño del humedal.

Datos adicionales

- Temperatura media del mes más caluroso: 28 °C
- Temperatura media del mes más frío: 14°C
- Constante cinética, $K_{v,20} = 1.104 d^{-1}$
- Planta seleccionada: *Phragmites australis* (Carrizo)
- Profundidad de la raíz = 0.6 m
- Separación entre planta, $d = 1.0 m$
- Propuesta de profundidad del agua en zona inicial de tratamiento, $D_{w0} = 0.6 m$

- Propuesta de profundidad del agua en zona final de tratamiento, $D_{wF} = 0.6 m$ (nota: la profundidad del agua depende de la profundidad que alcanza la raíz de la planta seleccionada)
- Propuesta de profundidad del lecho, $D_M = 0.6 m$
- Perdida de carga máxima en zona inicial, $d_{hi} = 0.06 m$
- Pendiente del fondo del humedal, $S_F = 0.005$

Características de medio de empaque

- Diámetro de grava media, $D_g = 25 mm$
- Conductividad hidráulica. Cuando no se cuenta con datos de conductividad hidráulica, estos se pueden calcular de la siguiente forma:

$$K_s = 12600D_g^{1.9} = 12600\left(\frac{25}{10}\right)^{1.9} = 71\,855 \frac{m^3}{m^2d}$$

Tabla 2.9 Datos para el diseño del humedal

Parámetro	Afluente PTAR, mg/L	Remoción RAFA, %	Afluente, humedal, mg/L	Límite máximo efluente, mg/L
DBO	350	60	140	30
SST	320	70	96	40
NT	25	10	22.5	15

- Porosidad, $n = 0.43$

Se evalúa el efecto de la temperatura en la constante cinética utilizando la ecuación de Arrhenius (ecuación 2.5), para el mes más caluroso se obtiene:

$$K_{v,T} = 1.04 d^{-1} (1.06)^{28-20} = 1.7596 d^{-1}$$

Para el mes más frío se obtiene el siguiente valor:

$$K_{v,T} = 1.04 d^{-1} (1.06)^{16-20} = 0.8745 d^{-1}$$

Determinación del área superficial

Para la determinación del área superficial se aplica la ecuación 2.4, y para el mes más caluroso se obtiene lo siguiente:

$$A_s = \frac{259.2 \frac{m^3}{d} \left[\ln\left(140 \frac{mg}{L}\right) - \ln\left(30 \frac{mg}{L}\right) \right]}{1.7596 d^{-1} (0.6)(0.43 m)} = 879.52 m^2$$

El área superficial para el mes más frío.

$$A_s = \frac{259.2 \frac{m^3}{d} \left[\ln\left(140 \frac{mg}{L}\right) - \ln\left(30 \frac{mg}{L}\right) \right]}{0.8745 d^{-1} (0.6)(0.43 m)} = 1769.77 m^2$$

Se selecciona el área para las condiciones menos favorables, por tanto el área para la zona inicial (A_1) de tratamiento según la Ilustración 2.38, es igual a:

$$A_1 = 0.3(1769.77) = 530.93 m^2$$

Para la zona final de tratamiento (A_2), se obtiene:

$$A_2 = 0.7(1769.77) = 1238.84 m^2$$

Determinación del ancho mínimo necesario

Para mantener el flujo de agua por debajo de la superficie y determinar la altura de salida del efluente. Se determina el ancho mínimo teórico (W), utilizando la ecuación de Darcy y para la zona inicial de tratamiento se tiene:

$$W = \left(\frac{Q A_1}{K_{s,1\%} dh_i D_{w,0}} \right)^{0.5} \quad \text{Ecuación 2.14}$$

Entonces utilizando la ecuación anterior (2.14), se obtiene:

$$W = \left[\frac{\left(259.20 \frac{m^3}{d} \right) (530.93 m^2)}{719 \frac{m^3}{m^2 d} (0.06 m)(0.6 m)} \right]^{0.5} = 73 m$$

Este es el ancho en el cual la pérdida de carga es igual a 0.06 m, dado que todos los parámetros están definidos. El diseñador podría usar un ancho igual o mayor, para asegurar que la pérdida de carga es igual o menor que el valor recomendado.

Determinación de la pérdida de carga en la zona inicial de tratamiento

La longitud de la zona inicial (L_i) de tratamiento se determina de la siguiente forma:

$$L_i = \frac{A_i}{W} = \frac{530.93 m^2}{73 m} = 7.3 m$$

Verificación de la pérdida de carga:

$$dh_i = \frac{Q L_i}{K_{s,1\%} W D_{w,0}} = \frac{259.20 \frac{m^3}{d} (7.3 m)}{719 \frac{m^3}{m^2 d} (73 m)(0.6 m)} = 0.06 m$$

Determinación de la longitud y la pérdida de carga en la zona final de tratamiento

La longitud de la zona final (L_F) de tratamiento se determina de la siguiente forma:

$$LF = \frac{A_2}{W} = \frac{1238.84 \text{ m}^2}{73 \text{ m}} = 16.97 \approx 17 \text{ m}$$

La pérdida de carga en la zona final (dh_F) de tratamiento es igual a:

$$dh_F = \frac{Q L_F}{K_{S,10\%} W D_{W,F}} = \frac{259.20 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} (17 \text{ m})}{7185 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{d}} (73 \text{ m})(0.6 \text{ m})} = 0.01 \text{ m}$$

La longitud total del humedal equivale a:

$$L = L_i + L_F = 7.3 \text{ m} + 17 \text{ m} = 24.3 \text{ m}$$

Al menos, se recomiendan dos celdas de tratamiento para facilitar las actividades de operación y mantenimiento. Ahora bien, para cumplir con las recomendaciones de la relación largo-ancho (2:1 a 4:1), se propone un número de celdas (N) igual a 6, estas celdas pudieran estar separadas por ejemplo, por una geomembrana.

Por tanto, el ancho de cada celda equivale a:

$$W_{\text{celda}} = \frac{W}{N} = \frac{73 \text{ m}}{6} = 12.2 \text{ m}$$

(Con esto se obtiene una relación largo-ancho equivalente a 2:1, con esto, se atiende la recomendación).

Determinación de las elevaciones del fondo

Para la determinación de estas elevaciones se asume lo siguiente:

Elevación a la salida del efluente, E_{be} se asume cero;

Elevación a la entrada de la zona final de tratamiento, E_{bF} :

$$E_{bF} = L_F S_F = 17 \text{ m}(0.005) = 0.08 \text{ m}$$

Elevación a la entrada de la zona inicial de tratamiento, E_{b0} :

$$E_{b0} = L S_F = (7.3 \text{ m} + 17 \text{ m})(0.005) = 0.12 \text{ m}$$

Determinación de las elevaciones de la superficie del agua

Elevación del agua al inicio de la zona final de tratamiento, E_{WF} :

$$E_{WF} = E_{bF} + D_{WF} = 0.08 \text{ m} + 0.6 \text{ m} = 0.68 \text{ m}$$

Elevación de la superficie del agua a la salida, E_{WE} :

$$E_{WE} = E_{WF} - dh_F = 0.68 \text{ m} - 0.01 \text{ m} = 0.67 \text{ m}$$

Elevación de la superficie del agua a la entrada, E_{W0} :

$$E_{W0} = E_{WF} + dh_i = 0.68 \text{ m} + 0.06 \text{ m} = 0.74 \text{ m}$$

Determinación de la profundidad del agua

Profundidad del agua a la entrada, D_{W0} :

$$D_{W0} = E_{W0} - E_{b0} = 0.74 \text{ m} - 0.12 \text{ m} = 0.62 \text{ m}$$

Profundidad al inicio de la zona final de tratamiento, D_{WF} :

$$D_{WF} = E_{WF} - E_{bF} = 0.68 \text{ m} - 0.08 \text{ m} = 0.60 \text{ m}$$

(se obtiene el valor propuesto inicialmente, por tanto el procedimiento es correcto)

Profundidad del agua a la salida del humedal, D_{WE} :

$$D_{WE} = E_{WE} - E_{be} = 0.60 \text{ m} - 0.0 \text{ m} = 0.60 \text{ m}$$

Determinación de la profundidad del medio

La profundidad del medio dependerá de la profundidad que alcance la raíz de la macrófita propuesta para el humedal. Por lo que es necesario contar con este dato para el diseño. Cabe recalcar que la planta seleccionada se debe encontrar en abundancia en la zona. Considerando que se desea una altura constante del agua a través del humedal, la profundidad del medio se calcula de la siguiente forma:

Distancia propuesta entre la superficie del medio y la del agua, $D_{WM} = 0.1$ metros.

Elevación de la superficie del medio a la entrada, E_{M0} :

$$E_{M0} = E_{W0} - D_{WM} = 0.74 \text{ m} - 0.1 \text{ m} = 0.84 \text{ m}$$

Elevación de la superficie del medio a la entrada de la zona final de tratamiento, E_{MF} :

$$E_{MF} = E_{WF} + D_{WM} = 0.68 \text{ m} + 0.1 \text{ m} = 0.78 \text{ m}$$

Elevación de la superficie del medio a la salida, E_{ME} :

$$E_{ME} = E_{WE} + D_{WM} = 0.67 \text{ m} + 0.1 \text{ m} = 0.77 \text{ m}$$

Profundidad del medio a la entrada, D_{M0} :

$$D_{M0} = E_{M0} - E_{b0} = 0.84 \text{ m} - 0.12 \text{ m} = 0.72 \text{ m}$$

Profundidad del medio a la entrada de la zona final de tratamiento, D_{MF} :

$$D_{MF} = E_{MF} - E_{bF} = 0.58 \text{ m} - 0.08 \text{ m} = 0.70 \text{ m}$$

Profundidad del medio a la salida, D_{ME} :

$$D_{ME} = E_{ME} = 0.77 \text{ m}$$

Determinación del tiempo de residencia hidráulica (TRH) nominal

$$TRH_{nominal} = \frac{n D_{WF}}{\left(\frac{Q}{A}\right)} = \frac{0.43(0.6 \text{ m})}{\left(\frac{259.2 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{1770 \text{ m}^2}\right)} = 1.76 \text{ d} = 42.24 \text{ h}$$

Concentración estimada de nitrógeno total esperada en el efluente ($C_{e,N}$)

$$C_{e,N} = (0.52 C_{0,N}) + 3.1 \quad \text{Ecuación 2.15}$$

$$C_{e,N} = 0.52 \left(22.5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) + 3.1 = 16.10 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Aunque el cálculo anterior, mediante una ecuación de regresión es una aproximación, se logra remover lo esperado para nitrógeno total.

Concentración estimada de SST esperada en el efluente ($SST_{e,N}$)

Se considera una ecuación de regresión propuesta por Reed and Brown (1995), para la estimación de la concentración de salida para los SST. La ecuación aplica para un rango de concentración de entrada ($C_{0,SST}$) mayor a 22 mg/L. La ecuación se presenta a continuación:

$$C_{e,SST} = C_{0,SST} \left(0.1058 + 0.0011 \frac{100Q}{A} \right)$$

Ecuación 2.16

$$\begin{aligned} C_{e,SST} &= 96 \frac{mg}{L} \left[0.1058 + 0.0011 \frac{100 \left(259.20 \frac{m^3}{d} \right)}{1770 m^2} \right] \\ &= 10.17 \frac{mg}{L} \end{aligned}$$

Número de macrófitas requeridas para la instalación (Nv)

$$Nv = \left(\frac{L}{d_{M-M}} - 1 \right) \left(\frac{W}{d_{M-M}} - 1 \right)$$

Ecuación 2.17

donde:

d_{M-M} = Distancia entre macrófita y macrófita

$$Nv = \left(\frac{24.3 m}{1.0 m} - 1 \right) \left(\frac{73 m}{1.0 m} - 1 \right) = 1677 \text{ macrófitas}$$

Volumen estimado de material de lecho (V)

$$V = AD_{ME} = 1770 m^2 (0.77 m) = 1362.9 m^3$$

2.3.6.2. Ejercicio 2

Tal como se presentó anteriormente, el modelo seleccionado influye en el dimensionamiento del humedal. El modelo de Kadlec and Knight no considera una influencia de la temperatura para la remoción de DBO y SST, ya que el coeficiente de Arrhenius (θ) es igual a 1.0, tal como se aprecia en la Tabla 2.2; sin embargo, para la remoción de nitrógeno el coeficiente es igual a 1.05 y por tanto el área si es función de la temperatura. Considerando los datos del primer ejercicio a continuación se determina el área superficial utilizando el modelo de Kad-

lec and Knight. La metodología para el dimensionamiento de tipo hidráulico es igual que el ejemplo anterior, por lo tanto se obvia.

Despejando q de la ecuación 2.12 se obtiene:

$$q = \frac{-K_{A,T}}{\ln \left[\frac{C_e - C^*}{C_0 - C^*} \right]}$$

Ecuación 2.18

Es conveniente recordar que C^* esta relacionado con la concentración del contaminante en el fondo del humedal y de la Tabla 2.2 se utiliza los siguientes datos adicionales:

- Concentración de DBO en el fondo del humedal, $C^*_{DBO} = 6 \text{ mg/L}$ (según la Tabla 2.2 esta selección tiene que ser un valor mayor a 3 mg/L)
- Concentración de nitrógeno total en el fondo del humedal, $C^*_{NT} = 1.5 \text{ mg/L}$
- Constante cinética a 20°C para remoción de DBO, $K^{DBO}_{A,20} = 0.49 \text{ m/d}$
- Constante cinética a 20°C para remoción de nitrógeno total, $K^{NT}_{A,20} = 0.074 \text{ m/d}$

Determinación del área superficial necesaria para la remoción de DBO

A continuación se presenta la determinación de la carga hidráulica:

$$q = \frac{-(0.49 \frac{m}{d})}{\ln \left[\frac{140 \frac{mg}{L} - 6 \frac{mg}{L}}{30 \frac{mg}{L} - 6 \frac{mg}{L}} \right]} = 0.2849 \frac{m}{d}$$

Considerando la ecuación 2.9, se obtiene el área superficial:

$$A_s = \frac{259.20 \frac{m^3}{d}}{0.2849 \frac{m}{d}} = 909.73 m^2$$

Determinación del área superficial necesaria para la remoción de nitrógeno total

Primero se realiza un ajuste por temperatura, por tanto, para el mes más caluroso se obtiene:

$$K_{A,T} = 0.074 \frac{m}{d} (1.05)^{28-20} = 0.109 d^{-1}$$

Para el mes más frío:

$$K_{A,T} = 0.074 \frac{m}{d} (1.05)^{16-20} = 0.061 d^{-1}$$

El área superficial para el mes más caluroso se obtiene:

$$q = \frac{-(0.109)}{\ln \left[\frac{15 \frac{mg}{L} - 1.5}{22.5 \frac{mg}{L} - 1.5} \right]} = 0.1966 \frac{m}{d}$$

$$A_s = \frac{259.20 \frac{m^3}{d}}{0.1966 \frac{m}{d}} = 1318.14 m^2$$

El área superficial para el mes más frío se obtiene:

$$q = \frac{-(0.061)}{\ln \left[\frac{15 \frac{mg}{L} - 1.5}{22.5 \frac{mg}{L} - 1.5} \right]} = 0.11005 \frac{m}{d}$$

$$A_s = \frac{259.20 \frac{m^3}{d}}{0.1098 \frac{m}{d}} = 2361 m^2$$

2.3.6.3. Comentario adicional a los ejercicios

El valor obtenido con el valor de Kadlec and Knight para remoción de DBO (909.73 m²), comparado con el obtenido por el modelo de la EPA (1 769.77 m²) demanda 50 por ciento menos área. La mayor demanda de área se obtiene para la remoción de nitrógeno (2.355.36 m²); sin embargo, esta decisión debe ser consecuencia de un análisis de alternativas cuidadoso, que contemple la disponibilidad de área y los posibles procesos que pudieran disminuir la carga orgánica en el afluente previo al humedal.

No existe una regla para la selección del modelo. Se deberá evaluar cada caso en particular, considerando aspectos como variabilidad de la temperatura y cargas orgánicas.

2.4. HUMEDALES DE FLUJO SUPERFICIAL

2.4.1. PROFUNDIDAD

En los sistemas de flujo superficial el agua presenta una profundidad entre 30 y 40 cm (García y Corzo, 2008). Los HFS deben ser diseñados para ser compatibles con las macrófitas que contienen. Como tal, la mayoría de las especies vegetales de tipo emergente no pueden tolerar más de 60 cm de inmersión cuando se someten a cargas de aguas residuales (Wallace y Knight, 2006). Por lo tanto, debe asegurarse que las macrófitas no están sometidas a cantidades excesivas de profundidad del agua.

Reed *et al.*, (1995), cita que la profundidad en estos humedales puede estar en un rango que va desde unos pocos centímetros hasta un me-

tro. El rango de profundidad típica de diseño para estos sistemas se encuentra entre 0.1 m a 0.46 m, lo cual depende de la época del año y de la calidad del agua esperada en el sistema. En climas fríos en donde se espera formación de hielo en invierno, el valor de la profundidad del agua puede incrementarse para compensarse. Durante el verano el sistema puede operar con una mínima profundidad, en relación con los objetivos del tratamiento del agua, para mejorar la transferencia de oxígeno y estimular el crecimiento de las macrófitas.

2.4.2. VEGETACIÓN UTILIZADA Y SIEMBRA DE ESPECIES

Respecto a los humedales de flujo superficial, para la introducción de vegetación al sistema es común que se seleccionen una o dos especies. Esto último estará en función de la capacidad de adaptación de la macrófita al medio y también del objetivo final de reúso que se le quiera dar al agua. (EPA, 2000b).

Diversos humedales construidos en Estados Unidos y Europa se han plantado como monocultivo o como máximo con dos o tres especies de macrófitas (Crites *et al.*, 2006).

Píríz (2004), cita que en humedales de flujo superficial, que suelen ser de mayor extensión, es más habitual la plantación mediante rizomas y semillas de humedales cercanos. En la Tabla 2.10 se describe el método de siembra de diferentes macrófitas según sus características.

Si no se cuenta con los recursos para la densidad recomendada de especies vegetales esta se puede disminuir a una macrófita por cada

4 metros cuadrados, sin embargo bajo este esquema de siembra se requerirán como mínimo dos años para alcanzar la densidad necesaria en el humedal (UNLP, 2013).

En condiciones ideales, la puesta en marcha de un sistema de humedales artificiales no se iniciaría hasta al menos 6 semanas después de la plantación de la vegetación. Se requiere este período de tiempo para permitir que las nuevas macrófitas se aclimaten y crezcan. En la práctica actual, la puesta en marcha muchas veces se ha realizado un día después de que se completó la plantación, como respuesta se tiene el riesgo de dañar la vegetación y retrasar el logro de los resultados esperados (Crites *et al.*, 2006).

2.4.3. CRITERIOS DE DISEÑO

En la Tabla 2.11 se muestran los parámetros a considerar para el diseño de un humedal de flujo superficial.

Iowa DNR (2007), describe el proceso de diseño de HFS de la siguiente manera:

1. Determinar los requerimientos de diseño (caudal del afluente y carga de contaminantes, descarga del efluente)
2. Dimensionar la unidad de pretratamiento
3. Calcular el área requerida
4. Establecer la configuración del humedal
5. Calcular el tiempo de retención hidráulica
6. Diseño de las estructuras de entrada y salida
7. Impermeabilización

Tabla 2.10 Método de siembra de diferentes macrófitas en HFSS y HFS

Macrófita	Siembra de especies	Distancia de siembra	Aplicación
Eneas (<i>Typha spp.</i>)	<p>Se realiza a partir de pequeñas macrófitas previamente desarrolladas en vivero, o directamente mediante rizomas.</p> <p>Pueden plantarse en cualquier época del año, mientras que para los rizomas el momento óptimo es en primavera, justo antes de la brotación.</p> <p>Las eneas son helófitas de climas templados o templado-fríos con estaciones. El rango de temperaturas en que se desarrollan es de 10 a unos 30°C, existiendo diferencias entre especies.</p> <p>Existen diferencias en cuanto a tolerancia a la inundación y características del agua en que viven aunque la profundidad óptima de la capa de agua en la que crecen las eneas, es del orden de 0.5 metros.</p>	La distancia aconsejada entre rizomas o macrófitas es de 1 metro, con esta distancia, en aproximadamente 3 meses de desarrollo se consigue una buena cobertura en el humedal.	Su aplicabilidad es amplia. Pueden aplicarse en sistemas de flujo superficial, aprovechando su condición de helófitas, en flujo sub-superficial, como plantas arraigadas en la grava.
Carrizo (<i>Phragmites australis</i>)	<p>Se efectúa mediante la propagación vegetativa: los rizomas se fraccionan convenientemente (que tengan varias yemas) y se plantan en el lecho.</p> <p>Se recomienda en primavera.</p> <p>Para la propagación por semilla se debe tener en cuenta que gran parte de las semillas que produce la macrófita no son viables. Aquellas que sí lo son, germinan en aproximadamente 5 días (condiciones de humedad a 20-24°C). Las plántulas, para su desarrollo requieren condiciones de humedad permanente sin que la lámina de agua tenga más de 4 cm de altura.</p>	Logran un excelente cubrimiento en un año con separación de 0.6 metros.	HFSS
Juncos (<i>Scirpus spp.</i>)	<p>Se realiza comúnmente por división de mata.</p> <p>Las macrófitas se desarraigan del sustrato, se fraccionan de modo que cada porción lleve en su parte subterránea rizomas, y se plantan individualmente.</p> <p>Se recomienda que las plantas madres procedan de poblaciones naturales de la zona, a fin de asegurar su adaptación al lugar.</p> <p>La propagación por semilla es opción viable. En un humedal de flujo superficial, el flujo del agua debe controlarse debidamente, para que no arrastre la semilla, ya que ésta es muy pequeña.</p> <p>Clima: templado, prosperan en posiciones soleadas, tolerando un amplio rango de pHs (4-9). La temperatura media óptima para su desarrollo está dentro del intervalo 16-27°C.</p> <p>La mayoría de las especies tienen un crecimiento moderado y pueden lograr un buen cubrimiento en alrededor de un año con separaciones de 0,30 m. Algunas variedades crecen más rápido y pueden cubrir en un año con un espaciamiento algo menor (de entre 0.3 y 0.6 m).</p>	<p>La mayoría de las especies logran un cubrimiento adecuado en alrededor de un año con separaciones de 0.3 metros.</p> <p>Algunas especies crecen más rápido y pueden cubrir en un año con un espaciamiento menor (0.3-0.6 m).</p>	HFS y HFSS

Tabla 2.10 Método de siembra de diferentes macrófitas en HFSS y HFS (continuación)

Macrófita	Siembra de especies	Distancia de siembra	Aplicación
Jacinto de agua (<i>Eichcornia crassipes</i>)	Consiste en ingresar al humedal macrófitas individuales o renuevos, que se dejan dispersos por la superficie del agua. Estas macrófitas se obtienen por división de una población madre.	-	HFS
Lentejas de agua (<i>Lemna spp.</i>)	Se realiza mediante la dispersión de una muestra de agua que contenga macrófitas de Lemnaceae.	Las macrófitas colonizarán el nuevo medio rápidamente por propagación vegetativa. Por ejemplo, un único ejemplar de L. minor, que ocupa 0.12 cm ² , en menos de un año puede formar una colonia que cubra una superficie de más de 1 m ² .	HFS

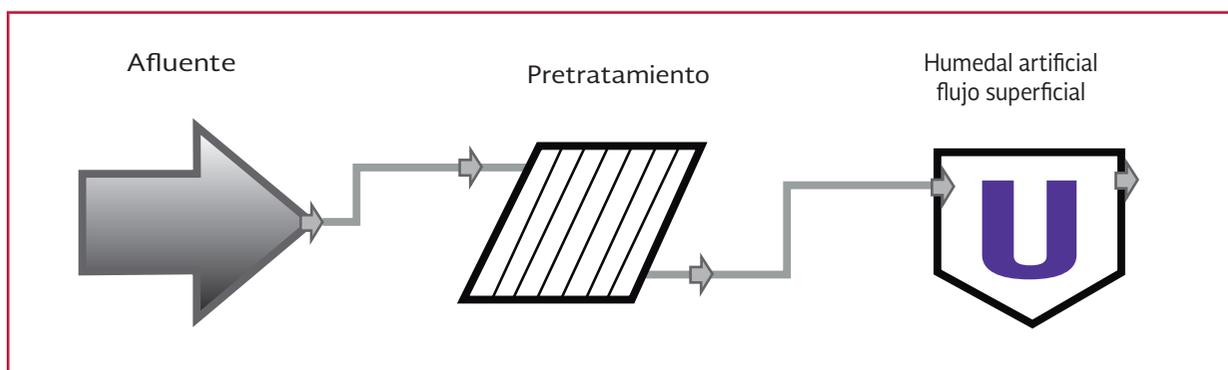
Tabla 2.11 Criterios de diseño de los humedales con flujo libre (Rodríguez, 2003)

Parámetros de diseño	Unidad	Valor
Tiempo de retención hidráulica	d	2-5 (DBO)
		7-14 (N)
Velocidad de carga orgánica	kg/h/d	<110
Profundidad del agua	m	0.06-0.45
Porosidad		0.65-0.75 (Reed et al., 1995)
Tamaño mínimo	m ² /m ³ d	5.3-10.7
Relación L:W		2:1-4:1
Control de mosquitos		Requerido
Intervalo de cosecha	año	3-5

2.4.3.1. Ejercicio 3 (humedal de flujo superficial)

A continuación se presenta el diseño de un humedal artificial de flujo superficial para obtener una calidad de 30 mg/L para DBO y SST, para un caudal medio de 110 L/s (9,504 m³/d), utilizando, para el diseño, las cargas orgánicas recomendadas por la bibliografía. Para fines del ejemplo, el caudal máximo se considera igual a dos veces el caudal promedio. Se cuenta con una población de 30 mil habitantes.

Ilustración 2.39 Diagrama de flujo del sistema a diseñar



Se considera la aplicación de los datos de la Tabla 2.12, para este ejercicio:

Tabla 2.12 Datos para el diseño del humedal

Parámetro	Carga orgánica, kg/ha d	Concentración efluente, mg/L
DBO	45	< 20
	60	30
SST	30	< 20
	50	30

El ejercicio de diseño considera que el humedal estará formado por tres zonas de tratamiento, tal como se presenta en la Ilustración 2.39.

Para el diseño se utilizarán los siguientes factores de carga:

- Carga orgánica hipotética para DBO, $COH_{DBO} = 60 \text{ kg DBO/ha d}$
- Carga orgánica hipotética para SST, $COH_{SST} = 50 \text{ kg SST/ha d}$
- Concentración de DBO afluente, $C_{0,DBO} = 110 \text{ mg/L}$
- Concentración de SST afluente, $C_{0,SST} = 95 \text{ mg/L}$

Para caudal máximo ($2Q_{med}$), se tiene que:

- Concentración de DBO afluente = 60 mg/L
- Concentración de SST afluente = 45 mg/L

Determinación de condiciones críticas

Estas condiciones se evalúan mediante la aplicación de cargas orgánicas hipotéticas, utilizando la siguiente ecuación:

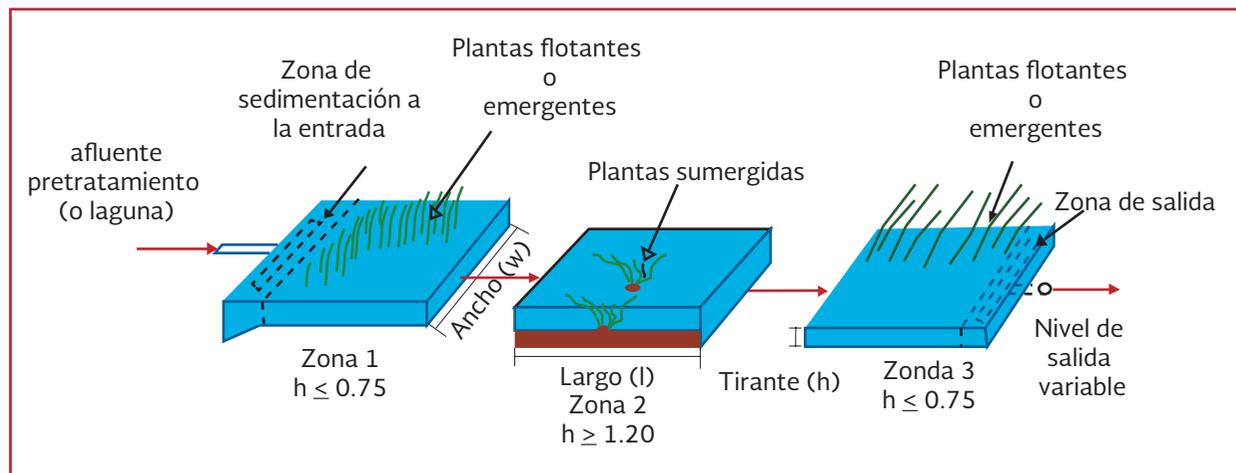
$$A_w = \frac{QC_0}{COH} \quad \text{Ecuación 2.19}$$

Evaluando con base en la DBO, para Q_{med} se tiene que:

$$A_w = \frac{1000 \left(9504 \frac{m^3}{d} \right) \left(110 \frac{mg}{L} \right)}{1000000 \left(60 \frac{kg}{ha d} \right)} = 17.42 \text{ ha}$$

Evaluando con base en la DBO para $Q_{máx}$ se tiene que:

Ilustración 2.40 Zonas de tratamiento en un humedal artificial de flujo superficial propuesto por la EPA (1998)



$$A_w = \frac{1000(2)\left(9504 \frac{m^3}{d}\right)\left(60 \frac{mg}{L}\right)}{1000000\left(60 \frac{kg}{ha d}\right)} = 19 ha$$

Evaluando con base en la SST, para Q_{med} se tiene que:

$$A_w = \frac{1000\left(9504 \frac{m^3}{d}\right)\left(95 \frac{mg}{L}\right)}{1000000\left(50 \frac{kg}{ha d}\right)} = 18 ha$$

Evaluando con base en la SST para $Q_{m\acute{a}x}$ se tiene que:

$$A_w = \frac{1000\left(9504 \frac{m^3}{d}\right)\left(45 \frac{mg}{L}\right)}{1000000\left(50 \frac{kg}{ha d}\right)} = 17.1 ha$$

La condición limitante es la carga de SST en condiciones de caudal máximo, ya que se requiere 19 hectáreas.

Determinación del tiempo de residencia hidráulica teórica

Para su determinación se asume lo siguiente:

Para las zonas 1 y 3 (con vegetación):

- Profundidad, $h = 0.6$ m
- Porosidad, $n = 0.75$

Para la zona 2 (zona abierta):

- Profundidad, $h = 1.2$ m
- Porosidad, $n = 1.0$ m

Para el promedio combinado se obtiene una profundidad (h) de 0.9 metros y una porosidad de 0.9 m; por tanto, suponiendo todo en una sola celda se obtiene:

Para Q_{med} :

$$TRH = \frac{A_w D n}{Q_{med}} \quad \text{Ecuación 2.20}$$

$$TRH = \frac{10000(19 ha)(0.9 m)(0.9 m)}{9504 \frac{m^3}{d}} = 16.2 d$$

Para $Q_{m\acute{a}x}$:

$$TRH = \frac{A_w D n}{Q_{m\acute{a}x}} \quad \text{Ecuación 2.21}$$

$$TRH = \frac{10000(19 ha)(0.9 m)(0.9 m)}{2\left(9504 \frac{m^3}{d}\right)} = 8.1 d$$

Este último cálculo implica que para el caudal máximo, el TRH pudiera no ser el adecuado para llevar a cabo la remoción adecuada de los contaminantes. Como una primera aproximación podría considerarse el mismo TRH para cada una de las tres zonas observadas en la Ilustración 2.40, entonces, para $Q_{m\acute{a}x}$, se tendría un TRH equivalente a 2.7 días (5.4 d para Q_{med}). Para la zona 1, el TRH a $Q_{m\acute{a}x}$ podría seleccionarse de 2.5 días (5 días para Q_{med}).

Para este ejemplo, el concepto es que el área de la zona abierta (2), tendrá un TRH que exceda al tiempo requerido para la formación de algas, creando así, una carga adicional para la zona 3. Obviamente la determinación de este tiempo varía con la temperatura y las condiciones climáticas del lugar del proyecto (mientras más caluroso el clima, el tiempo de formación de algas es menor). Por otro lado, mientras mayor sea los requerimientos de remoción de materia orgánica, se debe seleccionar un mayor TRH para la zona 2; para esto no existe un criterio claro, por lo que depende de las condiciones climáticas, sin embargo, con un TRH adecuado

en la zona 2, se puede esperar una reducción adecuada de orgánicos solubles, nitrógeno amoniacal y hasta coliformes fecales como proceso global. Para este ejercicio, se elige un TRH de 3 días para $Q_{m\acute{a}x}$ y 6 días para Q_{med} .

Para la zona 3, podría considerarse el mismo criterio utilizado para la zona 1 por la similitud de sus funciones hidráulicas. Dependiendo del desempeño de la zona 2, podría además ocurrir una desnitrificación en adición a la floculación natural y sedimentación. Por tanto se selecciona el mismo TRH equivalente a 2.5 días para $Q_{m\acute{a}x}$ (5 días para Q_{med}).

Por tanto, el mínimo TRH obtenido para $Q_{m\acute{a}x}$ es equivalente a $2.5 + 3 + 2.5 = 8$ días y para caudal promedio equivalente a 16 días. A continuación se determina el área requerida para el humedal.

$$A_w = \frac{TRH(Q)}{h n} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

$$A_w = \frac{16 d \left(9504 \frac{m^3}{d} \right)}{10000 (0.9 m)(0.9 m)} \approx 18.8 ha$$

En algunos países se considera un factor de seguridad, sin embargo, considerando que para México el clima predominantemente es cálido, se puede considerar que dicho factor se encuentra contemplado.

Configuración

Considerando el potencial que tienen este tipo de sistemas para presentar cortos circuitos, se debe considerar al menos dos trenes de tratamiento en paralelo con un mínimo de tres celdas en serie para cada uno. La primera celda de cada tren podría tener una profundidad aproxi-

mada de un metro de profundidad. De manera ideal se puede considerar una estructura para la redistribución del caudal después de pasar por la primera y segunda celda (considerando tres en serie para cada tren). Es necesario también considerar un sistema de derivación para cada una de las celdas, de tal manera que se facilite el mantenimiento y/o modificación de los TRH en caso de variación de caudal.

2.4.3.2. Ejercicio 4. Humedal de flujo superficial utilizando la ecuación de Kadlec and Knight

Determinar mediante el modelo de Kadlec el área requerida para un humedal de flujo superficial. Se considera que el pretratamiento ya ha sido considerado. El caudal es de 1 L/s, asuma que la temperatura de diseño es de 10 °C Considerando además los siguientes datos adicionales:

- Planta seleccionada: *Phragmites australis* (Carrizo)
- Profundidad de la raíz: 0.6 m
- Separación entre planta, $d = 1.0 m$
- Propuesta de profundidad del agua en zona inicial de tratamiento, $D_{w0} = 0.6 m$
- Propuesta de profundidad del agua en zona final de tratamiento, $D_{wf} = 0.6 m$
- Propuesta de profundidad del lecho, $D_m = 0.6 m$
- Perdida de carga máxima en zona inicial, $dh_i = 0.06 m$
- Perdida del fondo del humedal, $S_f = 0.005$
- Distancia propuesta entre la superficie del medio y la del agua, $D_{WM} = 0.1m$

En la Tabla 2.13 se presentan los parámetros de diseño.

A partir de la Tabla 2.14 se obtienen los valores de $K_{A,20}$ y C^* para humedal de flujo superficial.

Tabla 2.13 Datos para el diseño del humedal

Contaminante	Concentración, mg/L	Calidad requerida, mg/L
DBO	60	20
SST	80	20
CF	100 000 NMP	240

Tabla 2.14 Valores de $K_{A,20}$ y C^* para humedal de flujo superficial

Humedal de flujo superficial					
	DBO	SST	NT	PT	CF
$K_{A,20}$ m/año	34	1 000	22	12	75
$\theta_{K,20}$	1.0	1.0	1.05	1.0	1.0
C^* mg/L	3.0+	5.0+	1.50	0.02	50+

El área se determina de la siguiente manera, de acuerdo al despeje de A_s , de la ecuación 2.12 y 2.9. Para remoción de DBO.

$$A_{DBO} = \frac{365 \frac{d}{año} \left(86.4 \frac{m^3}{d} \right)}{34 \frac{m}{año}} \ln \left(\frac{100 \frac{mg}{L} - 6.68 \frac{mg}{L}}{20 \frac{mg}{L} - 6.68 \frac{mg}{L}} \right)$$

$$A_{DBO} = 1287 m^2$$

Para remoción de SST.

$$A_{DBO} = \frac{365 \frac{d}{año} \left(86.4 \frac{m^3}{d} \right)}{1000 \frac{m}{año}} \ln \left(\frac{80 \frac{mg}{L} - 17.9 \frac{mg}{L}}{20 \frac{mg}{L} - 17.9 \frac{mg}{L}} \right)$$

$$A_{DBO} = 107 m^2$$

Por lo tanto el área superficial del humedal para remover DBO es de 1 287 metros cuadrados.

Características de medio de empaque

Diámetro de grava media, $Dg = 25$ mm

Conductividad hidráulica. Cuando no se cuenta con datos de conductividad hidráulica, estos se pueden calcular de la siguiente forma:

$$K_s = 12600 Dg^{1.9}$$

$$K_s = 12600 \left(\frac{25 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} \right)^{1.9}$$

$$K_s = 71855 \frac{m^3}{m^2 d}$$

Ecuación 2.23

Se selecciona el área para las condiciones menos favorables (remoción de la DBO), por tanto el área para la zona inicial (A_1) considerando que esta tendrá el 30 por ciento de la longitud total:

$$A_1 = 0.3(1287 m^2) = 386.1 m^2$$

Ecuación 2.24

Para la zona final de tratamiento (A_2), con el área en las condiciones menos favorables (remoción de la DBO), considerando que esta tendrá el 70 por ciento de la longitud total:

$$A_2 = 0.7(1287 m^2) = 900.9 m^2$$

Ecuación 2.25

Determinación del ancho mínimo necesario

Para mantener el flujo de agua por debajo de la superficie y determinar la altura de salida del efluente. Se determina el ancho mínimo teórico (W), utilizando la ecuación de Darcy y para la zona inicial de tratamiento se tiene:

$$W = \left(\frac{Q A_1}{K_{S1\%} d h_i D_{W0}} \right)^{0.5}$$

Ecuación 2.26

Utilizando la ecuación anterior, se obtiene:

$$W = \left[\frac{86.4 \frac{m^3}{d} (386.1 m^2)}{718.55 \frac{m^3}{m^2 d} (0.06 m)(0.6 m)} \right]^{0.5} = 35.92 m$$

Este es el ancho en el cual la pérdida de carga es igual a 0.06 m, dado que todos los parámetros están definidos. El diseñador podría usar un ancho igual o mayor, para asegurar que la pérdida de carga es igual o menor que el valor recomendado.

Determinación de la pérdida de carga en la zona inicial de tratamiento

La longitud de la zona inicial (L_i) de tratamiento se determina de la siguiente forma:

$$L_i = \frac{A_1}{W} = \frac{386.1 m^2}{35.92 m} = 10.75 m$$

Ecuación 2.27

Verificación de la pérdida de carga:

$$dh_i = \frac{QL_i}{K_{S,1\%} WD_{W,0}}$$

$$dh_i = \frac{86.4 \frac{m^3}{d} (10.75 m)}{718.55 \frac{m^3}{m^2 d} (35.92 m)(0.6 m)}$$

$$dh_i = 0.06 m$$

Ecuación 2.28

Determinación de la longitud y la pérdida de carga en la zona final de tratamiento

La longitud de la zona final (L_F) de tratamiento se determina de la siguiente forma:

$$L_F = \frac{A_2}{W} = \frac{900.9 m^2}{35.92 m} = 25.08 m$$

Ecuación 2.29

La pérdida de carga en la zona final (dh_F) de tra-

tamiento es igual a:

$$dh_F = \frac{Q L_F}{K_{S,10\%} WD_{W,F}}$$

$$dh_F = \frac{86.4 \frac{m^3}{d} (25.08 m)}{7185.5 \frac{m^3}{m^2 d} (35.92 m)(0.6 m)}$$

$$dh_F = 0.014 m$$

Ecuación 2.30

La longitud total del humedal equivale a:

$$L = L_i + L_F = 10.75 m + 25.08 m = 35.83 m$$

Ecuación 2.31

Al menos, se recomiendan dos celdas de tratamiento para facilitar las actividades de operación y mantenimiento. Ahora bien, para cumplir con las recomendaciones de la relación largo-ancho (2:1-4:1), se propone un número de celdas (N) igual a: 3, estas celdas pudieran estar separadas por ejemplo, por una geomembrana.

$$W_{celda} = \frac{W}{N} = \frac{35.92 m}{3} = 11.94 m$$

Ecuación 2.32

(Con esto se obtiene una relación largo-ancho equivalente a 3:1, con esto, se atiende la recomendación)

Determinación de las elevaciones del fondo

Para la determinación de estas elevaciones se asume lo siguiente:

Elevación a la salida del efluente, E_{be} , se asume cero;

Elevación a la entrada de la zona final de trata-

miento, E_{bF} :

$$E_{bF} = L_F (S_F) = (25.08 \text{ m})(0.005) = 0.125 \text{ m}$$

Ecuación 2.33

Elevación a la entrada de la zona inicial de tratamiento, E_{b0} :

$$E_{b0} = L S_F = (35.83 \text{ m})(0.005) = 0.179 \text{ m}$$

Ecuación 2.34

Determinación de las elevaciones de la superficie del agua

Elevación del agua al inicio de la zona final de tratamiento, E_{WF} :

$$E_{WF} = E_{bF} + D_{WF} = 0.125 \text{ m} + 0.6 \text{ m} = 0.725 \text{ m}$$

Ecuación 2.35

Elevación de la superficie del agua a la salida, E_{WE} :

$$E_{WE} = E_{WF} - dh_F = 0.725 \text{ m} - 0.01 \text{ m} = 0.715 \text{ m}$$

Ecuación 2.36

Elevación de la superficie del agua a la entrada, E_{W0} :

$$E_{W0} = E_{WF} + dh_i = 0.725 \text{ m} + 0.06 \text{ m} = 0.785 \text{ m}$$

Ecuación 2.37

Determinación de la profundidad del agua

Profundidad del agua a la entrada, D_{W0} :

$$D_{W0} = E_{W0} - E_{b0} = 0.785 \text{ m} - 0.179 \text{ m} = 0.606 \text{ m}$$

Ecuación 2.38

Profundidad al inicio de la zona final de tratamiento, D_{WF} :

$$D_{WF} = E_{WF} - E_{bF} = 0.725 \text{ m} - 0.125 \text{ m} = 0.60 \text{ m}$$

Ecuación 2.39

(se obtiene el valor propuesto inicialmente, por tanto el procedimiento es correcto)

Profundidad del agua a la salida del humedal, D_{WE} :

$$D_{WE} = E_{WE} - E_{be} = 0.715 \text{ m} - 0.00 \text{ m} = 0.715 \text{ m}$$

Ecuación 2.40

Determinación de la profundidad del medio

La profundidad del medio dependerá de la profundidad que alcance la raíz de la macrófita propuesta para el humedal. Por lo que es necesario contar con este dato para el diseño. Cabe recalcar que la planta seleccionada se debe encontrar en abundancia en la zona. Considerando que se desea una altura constante del agua a través del humedal, la profundidad del medio se calcula de la siguiente forma:

Elevación de la superficie del medio a la entrada, E_{M0} :

$$E_{M0} = E_{W0} + D_{WM} = 0.785 \text{ m} + 0.10 \text{ m} = 0.885 \text{ m}$$

Ecuación 2.41

Elevación de la superficie del medio a la entrada de la zona final de tratamiento, E_{MF} :

$$E_{MF} = E_{WF} - D_{WM} = 0.725 \text{ m} - 0.10 \text{ m} = 0.625 \text{ m}$$

Ecuación 2.42

Elevación de la superficie del medio a la salida, E_{ME} :

$$E_{ME} = E_{WE} + D_{WM} = 0.715 \text{ m} + 0.10 \text{ m} = 0.815 \text{ m}$$

Ecuación 2.43

Profundidad del medio a la entrada, D_{M0} :

$$D_{M0} = E_{M0} - E_{b0} = 0.606 \text{ m} - 0.179 \text{ m} = 0.427 \text{ m}$$

Ecuación 2.44

Profundidad del medio a la entrada de la zona final de tratamiento, D_{MF} :

$$D_{MF} = E_{MF} - E_{bF} = 0.625 \text{ m} - 0.125 \text{ m} = 0.50 \text{ m}$$

Ecuación 2.45

Profundidad del medio a la salida, D_{ME} :

$$D_{ME} = E_{ME} - 0 = 0.815 \text{ m} - 0.00 \text{ m} = 0.815 \text{ m}$$

Ecuación 2.46

Determinación del tiempo de residencia hidráulica (TRH) nominal

Considerando que se tiene un sustrato con porosidad de $n = 0.43$.

$$TRH_{nominal} = \frac{nD_{WF}}{q}$$

$$TRH_{nominal} = \frac{0.43(0.60 \text{ m})}{\left(\frac{86.4 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{1287 \text{ m}^2}\right)}$$

$$TRH_{nominal} = 2.32 \text{ d} = 55.68 \text{ h}$$

Ecuación 2.47

Concentración estimada de SST esperada en el efluente ($SST_{e,N}$)

Se considera una ecuación de regresión propuesta por Reed and Brown (1995), para la estimación de la concentración de salida para los SST. La ecuación aplica para un rango de concentración de entrada ($C_{0,SST}$) mayor a 22 mg/L. La ecuación se presenta a continuación:

$$C_{eSST} = C_{0,SST} \left(0.1058 + 0.0011 \frac{100Q}{A} \right)$$

$$C_{eSST} = 80 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \left[0.1058 + 0.0011 \frac{100 \left(86.4 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \right)}{1287 \text{ m}^2} \right]$$

$$C_{eSST} = 9.05 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

Ecuación 2.48

Número de macrófitas requeridas para la instalación (N_v).

$$N_v = \left(\frac{L}{d_p} - 1 \right) \left(\frac{W}{d_p} - 1 \right)$$

$$N_v = \left(\frac{35.83 \text{ m}}{1.00 \text{ m}} - 1 \right) \left(\frac{35.92 \text{ m}}{1.00 \text{ m}} - 1 \right)$$

$$N_v = 1216.26 \approx 1217 \text{ macrófitas}$$

Ecuación 2.49

donde:

- N_v = Número de macrófitas necesarias
- d_p = Distancia entre macrófita y macrófita, m

Volumen estimado de material de lecho (V).

$$V = AD_{ME} = 1287 \text{ m}^2 (0.815 \text{ m}) = 1048.91 \text{ m}^3$$

Ecuación 2.50

Se presenta, Tabla 2.15 un resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 2.15 Resumen de los resultados obtenidos

Parámetro	Kadlec y Knight
Área superficial (m ²)	3 289
Ancho (m)	28.67
Largo (m)	114.68
Área transversal (m ²)	11.47
Volumen (m ³)	1 316
Tiempo de retención hidráulica (d)	10.66
Carga hidráulica (m/d)	0.03
Número de macrófitas	3 192

2.4.4. ARRANQUE DEL SISTEMA

EPA (2000a), sugiere las siguientes recomendaciones para el arranque del humedal:

- Los humedales de flujo superficial no alcanzan los niveles óptimos de rendimiento hasta que la vegetación y el lecho están completamente desarrollados y en equilibrio. El tiempo necesario para llegar a este punto es una función de la

densidad de siembra y la estación del año. Un humedal con una alta densidad de siembra (50 cm y 75 cm de distancia) que se inicia en la primavera es probable que se desarrollen plenamente para el final de la segunda estación de crecimiento. Un humedal con una baja densidad de siembra (cuatro metros de distancia) que se inició a finales de otoño puede requerir tres o más años para alcanzar su rendimiento del tratamiento previsto. El tiempo de arranque puede ser más rápido en climas cálidos (Crites *et al.*, 2006). La densidad de siembra recomendada es de 1 metro de distancia entre macrófitas (UNLP, 2013)

- Bajo condiciones ideales, la puesta en marcha de un humedal (HFS) debe retrasarse seis semanas después de plantar para dar tiempo suficiente para que las macrófitas emergentes se aclimaten y se desarrollen por encima del nivel de agua. Cuando esto no es posible, se debe controlar el nivel de agua de forma que este por debajo de la macrófita
- Ajuste de nivel de agua en la profundidad de diseño después de las plantas están establecidas
- Cuando se inicia el arranque, el nivel de agua debe elevarse gradualmente hasta el nivel de diseño ajustando el dispositivo de control de flujo en la salida de cada celda. Esto se hace para permitir que la parte superior de la vegetación emergente permanezca por encima del agua. Si el afluente contiene alta carga de contaminante, puede ser necesario diluir el afluente con agua limpia o reciclar los efluentes tratados para aumentar poco a poco las cargas de contaminantes

de la zona húmeda hasta que se aclimate la vegetación. Kadlec y Wallace (2006) citan los brotes emergentes de las macrófitas deben estar por encima de la superficie del agua en todo momento para dar acceso a la luz solar y el oxígeno. El ajuste del nivel del agua debe ser inferior a dos cm por día durante este tiempo

- El operador debe verificar las macrófitas del humedal varias veces por semana. En grandes áreas donde el crecimiento de la vegetación ha fallado, las macrófitas deben ser replantados

Crites *et al.*, (2006) cita que después del arranque del sistema, la operación de los humedales es muy simple y similar a los requisitos para el funcionamiento de una laguna facultativa. Gran parte del esfuerzo que supone es la observación visual de las condiciones y la corrección de los problemas que se presenten. Las principales cuestiones de interés son:

- Mantener el nivel de agua para el óptimo crecimiento de las macrófitas
- La uniformidad de distribución y recolección del flujo
- Integridad de los bordos
- La salud y el crecimiento de la macrófitas
- El control de las plagas y los insectos dañinos
- La eliminación de la vegetación no deseada

2.4.5. CONSIDERACIONES HIDRÁULICAS

Los humedales de flujo superficial han demostrado ser una alternativa eficiente y viable para tratar el agua residual. Uno de los elementos

más importantes para la correcta operación del sistema es la hidráulica del humedal, ésta es el término aplicado al movimiento del agua a través del humedal. Un arreglo hidráulico erróneo puede causar problemas en el transporte del agua, la calidad del agua, olores y vectores (Silva y Zamora, 2005).

La EPA (2000) menciona que la distribución del flujo de agua residual en toda la superficie debe ser uniforme para que esta área sea efectiva. Esto se hace posible mediante una pendiente adecuada y el uso de estructuras apropiadas de entrada y salida.

En principio, el flujo que entra en un humedal nunca es igual al flujo que sale de un humedal. Muchos factores adicionales afectan el balance hídrico general dentro de un humedal (Iowa DNR, 2007).

El rendimiento de cualquier sistema de humedales artificiales depende del sistema de hidrología, así como otros factores como son la lluvia, la infiltración, la evapotranspiración (ET), la tasa de carga hidráulica, la profundidad y el área pueden afectar la eliminación de materia orgánica, nutrientes, y elementos traza no sólo mediante la alteración de la retención de tiempo, sino también por la concentración o dilución de las aguas residuales. Los cambios en el tiempo de la retención o el volumen de agua puede afectar significativamente el rendimiento del tratamiento. (EPA, 1988).

La EPA (2000) cita que tasas elevadas de evapotranspiración pueden aumentar las concentraciones en el efluente pero también aumentar el TRH del humedal, mientras que

tasas altas de precipitación pluvial pueden diluir la concentración de contaminantes pero también reducir el TRH del humedal. En general las zonas templadas con un clima moderado estos efectos no son críticos para un buen rendimiento.

Para humedales de flujo superficial, es necesario medir las pérdidas entre la entrada y la salida del sistema, ya que el humedal debe diseñarse para manejar flujos sin crear problemas significantes de estancamiento e inundación (Silva y Zamora, 2005).

Un diseño confiable debe asumir que no existen pérdidas por filtración y adoptar una estimación razonable de las pérdidas por evapotranspiración y ganancias por lluvias de los registros históricos del lugar. Esto requiere una primera suposición del área superficial del humedal para poder calcular el agua extra que entra o sale. Por lo general se asume que el caudal de entrada y salida son iguales (Lara, 1999).

El arreglo hidráulico que se recomienda para la construcción de un humedal superficial es el de flujo a pistón con un flujo uniforme a través de la sección del humedal, esto con la finalidad de minimizar flujos preferenciales. Los cortos circuitos pueden ser disminuidos con el uso de celdas o mamparas. Un diseño válido requiere tener en cuenta consideraciones hidráulicas y térmicas, así como la cinética de remoción (Lara, 1999).

El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia es impuesta por la vegetación y la capa de sedimentos en los humedales de flu-

jo libre. La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y salida del sistema. Para lograr un eficiente drenado del humedal es importante proveer al humedal de un fondo con una pendiente suficiente (Lara, 1999). ITRC (2003) cita que los humedales de tipo superfi-

cial ofrecen un mayor control del flujo que los subsuperficiales.

La relación largo-ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema por lo que las relaciones de 2:1 o 4:1 son aceptables (Lara, 1999).



3

CONSIDERACIONES DE PLANEACIÓN

El objetivo principal de la depuración del agua radica en restablecer su calidad con el fin de proteger los usos que de ella se puedan obtener, ya sean ambientales, de salud o bien por tener una relación con las actividades productivas.

Es importante señalar que el no tratar el agua residual siempre resulta más costoso no sólo en términos económicos, sino en los otros aspectos anteriormente señalados a los que se puede adicionar el bienestar de las personas, de la biodiversidad y de los ecosistemas en general.

Los humedales artificiales representan una alternativa eficiente, con bajos costos de tratamiento y sencillos de operar, sin embargo cuando se requiere lograr la calidad deseada en términos de coliformes fecales, o de nutrientes (nitrógeno y fósforo) son necesarias áreas mayores de tratamiento que las requeridas para reducir la concentración de carga orgánica, o bien pueden combinarse con lagunas de maduración de tal manera que no se requieran sustancias químicas o aparatos eléctricos para realizar la desinfección, lo que adicionalmente permite proteger de una manera eficiente a los cuerpos receptores. Cabe señalar que los sistemas convencionales, que requieren energía eléctrica para su funcionamiento, usualmente no son diseñados para remover nutrientes, y que muchas veces por deficiencias de operación o de diseño se tiene un alto remanente de materiales orgá-

nicos en el agua tratada, la cual cuando es desinfectada con cloro se puede llegar a producir compuestos organoclorados. En otras palabras cuando se realiza una comparación entre la combinación de humedales-lagunas con cualquier sistema convencional, debe de analizarse los alcances y objetivos de tratamiento.

Los humedales artificiales remueven la totalidad de huevos de helmintos ya que se tienen enormes tiempos de retención hidráulica (de siete a 14 días), en donde los procesos de sedimentación, filtración, depredación, bajas velocidades de flujo, entre otros, producen las condiciones necesarias para su eliminación.

No obstante las ventajas que se tienen de los humedales artificiales, conjuntamente con las lagunas de maduración, es también de gran importancia considerar la disponibilidad de terreno, ya que se han presentado muchos casos en los que por la falta de este, no ha sido factible la implementación de estas tecnologías, por lo que ha sido necesario implementar otras opciones.

3.1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Lara (1999), ITRC, (2003), García *et al.* (2004) exponen el siguiente listado de ventajas y desventajas de los humedales artificiales:

Desventajas

- Demandan grandes áreas de terreno (mayor tiempo de retención hidráulica), hasta 20 veces mayor demanda de terreno en relación a los sistemas intensivos, lo que afecta la disponibilidad
- Incrementan los costos de inversión en áreas con terrenos costosos
- Cuando no son eficientemente operados corren el riesgo de taponamientos en el medio filtrante
- Generación de malos olores cuando son subdimensionados o cuando es rebasada su capacidad de tratamiento por la introducción de nuevas descargas a las contempladas en el diseño original, o por haber alcanzado su capacidad de tratamiento en el periodo proyectado de diseño
- En climas fríos, con estación de invierno marcada, con acumulación de nieve, o en sitios con presencia de heladas severas, reducen la velocidad de reducción de contaminantes
- Por ser un sistema biológico, la presencia de sustancias tóxicas puede afectar su eficiencia
- Las macrófitas del sistema puede afectarse en sitios con periodos largos de estiaje, por ejemplo en las escuelas donde se reduce la generación de agua residual durante la temporada de vacaciones. El sistema funciona mientras se mantenga húmeda la zona radicular
- Las deficiencias de impermeabilización (roturas, fallas en la vulcanización) durante la construcción son difíciles de corregir, por lo que es conveniente realizar pruebas hidráulicas antes de la colocación del medio filtrante en los sistemas de flujo sub-superficial o de las especies vegetales en los de flujo superficial
- Existe el riesgo de desarrollo de moscas y mosquitos en los humedales de flujo superficial
- Se presentan pérdidas de caudal por evapotranspiración, lo que se agudiza en climas secos con altas temperaturas ambientales
- Se puede acumular la salinidad en los lechos después de varios años de operación
- Se tiene aún desconocimiento de los procesos físicos, químicos, biológicos e hidrológicos que intervienen en la depuración del agua, ya sea de manera individual o integral. Usualmente el dimensionamiento no incluye un arreglo hidráulico eficiente
- El proceso se limita a la profundidad de penetración de las raíces o aguas poco profundas
- Las eficiencias de remoción de contaminantes se reducen cuando no se realiza una poda sistemática de la vegetación y la disposición del material podado en sitios fuera de los lechos (extracción de nutrientes) o la rehabilitación de zonas azolvadas, las que proporcionalmente reducen el tiempo real de tratamiento y consecuentemente la eficiencia de remoción de contaminantes.
- Requieren experiencia de los diseñadores para determinar el tipo de ecuación a utilizar, tipo de macrófitas, granulometría, geometría más adecuada, ubicación de estructuras de entrada y salida (reducción de flujos preferenciales y zonas muertas)
- Demandan una buena supervisión durante la etapa de construcción

Ventajas

- Consumo mínimo o nulo de energía eléctrica, ya que el oxígeno requerido es proporcionado durante el periodo diurno mediante el proceso de fotosíntesis de las macrófitas y durante la noche por el aerénquima (sistema vascular) de las macrófitas
- Operación y mantenimiento sencillos. Demanda un mínimo de operadores los que requieren de una sencilla capacitación (aunque cabe enfatizar que sí demandan una adecuada atención, es decir, no deben ser descuidada la operación. Una persona es suficiente para humedales artificiales menores a 2500 habitantes (zonas rurales)
- No producen malos olores cuando son bien diseñados y operados
- No producen ruido (inexistencia de equipos electromecánicos)
- Producen menor cantidad de lodos residuales
- No se presenta un riesgo severo de desarrollo de moscas y mosquitos en los humedales de flujo subsuperficial.
- Eficiente remoción de DBO, SS, Patógenos y nutrientes (N y P)
- Menores costos de operación que otros sistemas de tratamiento
- Amplia flexibilidad o tolerancia a variaciones de carga, tanto hidráulica (caudal), como orgánica
- Amables con el ambiente. Constituyen áreas de protección para la vida silvestre y contribuyen con el desarrollo e incremento de la biodiversidad, ya que constituyen nuevos hábitats
- Soportan rangos mayores (hasta un 300 por ciento) de variación de carga orgánica e hidráulica que los sistemas electromecánicos
- Pueden diseñarse desde unipersonales, unifamiliares hasta ciudades medianas con disponibilidad de terreno.
- Proporcionan efluentes bajos en DBO, macronutrientes (como nitrógeno, fósforo y potasio) y de microorganismos patógenos
- El agua tratada puede reutilizarse en varios usos (riego de áreas verdes, riego de cultivos, acuicultura, recarga de acuíferos, protección de la vida acuática de ríos y lagos)
- Pueden utilizarse en climas fríos, templados y cálidos. La biomasa vegetal actúa como aislante del sedimento, lo que asegura una intensa actividad microbiana en todas las estaciones del año
- Son estéticos, muestran áreas verdes agradables a la vista y se integran de manera armónica con el ambiente.
- Subproductos aprovechables (flores, forrajes, materias primas para manufacturas de artesanías)
- Proporcionan oportunidades recreativas y educativas

De acuerdo con Arana (2009), Huertas *et al.*, (2013) los principales factores, técnicos, ambientales, sociales, culturales, económicos, políticos y normativos que influyen en la selección de procesos de tratamiento de bajo costo son los siguientes:

3.2. ASPECTOS TÉCNICOS

- Requerimientos de energía eléctrica. En el caso de varias zonas rurales, donde no se cuenta con el servicio de energía eléctrica los humedales son una importante alternativa
- Caracterización eficiente de la descarga. Naturaleza del agua residual. El origen y la composición de las aguas residuales
- Calidad requerida del efluente según el medio receptor (tratamiento adecuado). Una planta de tratamiento de aguas residuales influye en la administración de la calidad de todo el sistema hidrológico en la que se ubica. Este impacto debe tomarse en cuenta en el proceso de planeamiento
- Tamaño y crecimiento de la población (en habitantes-equivalentes)
- Requerimientos de superficie (disponibilidad de terreno). La desventaja principal de los humedales es que demandan extensiones de terreno mucho mayores que los sistemas intensivos lo que limita su aplicación en sitios con poca disponibilidad de terreno. En México hay humedales artificiales para caudales mayores de 600 L/s (seiscientos litros por segundo), como son los casos existentes en San Luis Potosí, SLP y en Mexicali, BC., en donde el agua tratada se reutiliza en riego de cultivos. Constituyen además áreas para protección de la vida silvestre
- Tolerancia a variaciones de carga orgánica e hidráulica. Los sistemas de tratamiento deben ser robustos, capaces de autorregularse de forma eficaz en un amplio rango de caudal y carga para obtener un efluente con una calidad suficiente. Resistencia a choque de materiales orgánicos y tóxicos. Sensibilidad de operación intermitente. No obstante debe respetarse la capacidad de diseño
- Configuración y topografía de la comunidad y zonas circundantes
- Meteorología. Con bajas temperaturas del agua se retarda la sedimentación y la lluvia puede aumentar excesivamente el caudal a tratar y la materia en suspensión. Influye sobre todo la temperatura que está íntimamente ligada con la velocidad de los procesos naturales de autodepuración. En periodos fríos puede reducirse el rendimiento, sobre todo en HAFS. Además, influyen los periodos vegetativos de las macrófitas del humedal. El uso de humedales de flujo subsuperficial en clima frío es posible, sin embargo, la factibilidad de operación del sistema en invierno depende de la resistencia de las macrófitas. En general, los sistemas de flujo subsuperficial son más estables que los sistemas de flujo superficial y la concentración de la biomasa microbiana es mayor. Las fluctuaciones de temperatura son menos significativas y, por lo tanto, se puede esperar una degradación de la materia orgánica más balanceada
- Tolerancia a variaciones estacionales (bajas temperaturas)
- Complejidad de operación y mantenimiento
- Generación de lodos, frecuencia de retiro de lodos, simplicidad en la gestión de lodos generados en la depuración
- Emisión de gases. Dentro de las diversas tecnologías existentes para el tratamiento del agua residual, los sistemas extensivos de tratamiento, como son las lagunas de

estabilización y los humedales son considerados como fábricas de oxígeno, el cual se produce por la fotosíntesis realizada en las macrófitas, con lo que se reduce la emisión de gases (y de malos olores) hacia la atmósfera, con lo que se contribuye a la protección de la capa de ozono, con la reducción del efecto de invernadero y con la atenuación de los efectos producidos por el cambio climático

- Operación y mantenimiento. Requerimientos de personal. Intensidad, complejidad, requerimientos de capacitación, costos). Los sistemas deben demandar una operación sencilla
- Independencia de equipos e insumos
- Compatibilidad con las facilidades existentes. Los humedales son ampliamente utilizados en Europa para el pulimento del agua tratada mediante sistemas convencionales, particularmente para la reducción de nutrientes, además de encontrar aplicación para el tratamiento de los lodos residuales
- Requerimientos de reactivos, por ejemplo cloro para la desinfección
- Tipo de suelo. Existen experiencias en las que no ha sido factible la construcción de sistemas de drenaje y alcantarillado, por la naturaleza rocosa del suelo, casos en los que el uso de humedales unifamiliares o multifamiliares constituyen una atractiva alternativa
- Vida útil del sistema
- Complejidad de la construcción. Usualmente los humedales son bastante más sencillos de construir que los sistemas intensivos

3.3. ASPECTOS AMBIENTALES

- Producción de olores. Los humedales cuando son bien dimensionados y operados no generan malos olores
- Generación de ruidos. En los humedales no se producen ruidos por concepto de equipos electromecánicos. Los ruidos que se generan están relacionados con las aves que arriban a las áreas verdes
- Integración paisajística. Impacto visual. Las instalaciones deben adecuarse al entorno con la mayor integración ambiental posible, buscando incluso proporcionar un valor añadido de carácter educativo, turístico o recreativo. Muy buena integración en el entorno. Permiten la creación y restauración de zonas húmedas

3.4. ASPECTOS ECONÓMICOS

- Costos de construcción. Inversión, costos, capital disponible
- Costos de operación y mantenimiento. Los humedales artificiales, conjuntamente con las lagunas de estabilización tienen los menores costos de tratamiento por no requerir energía eléctrica para su funcionamiento. El costo de energía eléctrica en un sistema intensivo usualmente es equivalente al 80 por ciento de los costos de operación
- Factibilidad en la operación y mantenimiento en términos de costos, capacitación y de obtención de equipos e insumos



CONCLUSIONES

Los humedales artificiales constituyen una alternativa importante con costos bajos de tratamiento y sencillez de operación para el tratamiento de las aguas residuales de diversos tipos.

Por ser sistemas que no requieren energía eléctrica para su funcionamiento son una excelente alternativa para utilizarse en zonas rurales, en las que no se cuente con este servicio, aún en aquellas comunidades que presentan una gran dispersión geográfica.

La desventaja principal que presenta los humedales artificiales es que demandan mayores extensiones de terreno que los sistemas intensivos, sin embargo pueden utilizarse en ciudades medianas o grandes, en función de la disponibilidad de terreno. Colateralmente, al requerir estos sistemas tiempos de retención hidráulica entre siete a 15 días, el hecho de tener grandes volúmenes constituye una ventaja sobre los sistemas intensivos, ya que es factible presentar un mayor rango de variación de cargas orgánica e hidráulica.

Aunque es necesario mayor conocimiento e interpretación matemática de los mecanismos de remoción de contaminantes en los humedales artificiales, es una alternativa plausible de aplicarse en zonas rurales.



A

OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

A.1. ACTIVIDADES DE RUTINA

El objetivo principal de la operación de los humedales artificiales consiste en hacer funcionar el sistema de acuerdo con el diseño para obtener el mayor rendimiento posible y el propósito del mantenimiento radica en mantener las instalaciones en óptimas condiciones de una manera continua, mediante reparación o sustitución de partes o equipos dañados por el uso.

Kadlec y Knight (1996), ITRC (2003) mencionan que las actividades de rutina de la operación y mantenimiento de los humedales artificiales son:

- Extracción de sólidos y basuras acumuladas en las rejillas en el pretratamiento
- Extracción de arenas y basuras acumuladas en el desarenador
- Extracción de basuras acumuladas en las estructuras de entrada y distribución de caudal (cajas de registro, tubería y vertedores)
- Control de niveles de agua dentro del humedal. Usualmente diez centímetros por debajo de la superficie en los humedales de flujo subsuperficial
- Eliminación de malezas y basuras (hojarasca) dentro del lecho del humedal

- Eliminación o poda de la vegetación sobre los bordos circundantes
- Poda de la vegetación utilizada en el humedal. Se recomienda una frecuencia de dos a tres veces por año, en donde se elimine principalmente la vegetación con apariencia amarillenta, correspondiente a la vegetación de más edad. Eliminar en cada poda entre el 10 y 15 por ciento del total de la vegetación.
- Resiembra de especies vegetales. Es recomendable mantener la mayor densidad posible con el fin de evitar áreas sin vegetación
- Accionar todo tipo de válvulas para evitar que se peguen
- Poda de árboles circundantes para evitar la producción de hojarasca y la disminución de la energía solar hacia las especies vegetales dentro de los lechos
- Reparación de bordos, mallas circundantes, puertas, aceitado de los dispositivos que así lo requieran, pintura, geomembrana, banquetas y de estructuras de protección hidráulica (cunetas y bordos)

Con la cosecha o poda de las especies vegetales y su disposición fuera del humedal, se evitaría que las hojas muertas se degraden y reincorporen los nutrientes dentro del estanque. La poda sistemática (1 a 2 veces por año) permite mantener el vigor (desarrollo) de las especies vege-

tales y por lo tanto una mejor remoción de los nutrientes (Vymazal, 2008). La vegetación obtenida en la poda puede ser composteada y como fertilizante para los campos de cultivo, siempre y cuando las aguas residuales sean de origen municipal y no industrial, en cuyo caso deberá ser confinada, previo análisis de la existencia de materiales tóxicos, por ejemplo metales pesados; algunas macrófitas como el tule (*Eichornia crassipes*) después de su poda, pueden ser utilizadas en la manufactura de artesanías.

Las labores de rutina que se requieren para mantener en buen estado y con un buen funcionamiento a los humedales realmente son actividades que no requieren mucha capacitación, por lo que estos sistemas pueden ser operados de una manera sencilla. Las actividades rutinarias principales son: limpieza de las rejillas (Ilustración A.1a), extracción de arenas (limpieza del desarenador, Ilustración A.1b), poda de la vegetación, (Ilustración A.1c), (Ilustración A.1d).

Ilustración A.1 Actividades de rutina: a) Limpieza de las rejillas, b) Limpieza del desarenador, c) Poda de la vegetación y d) Medición de caudal

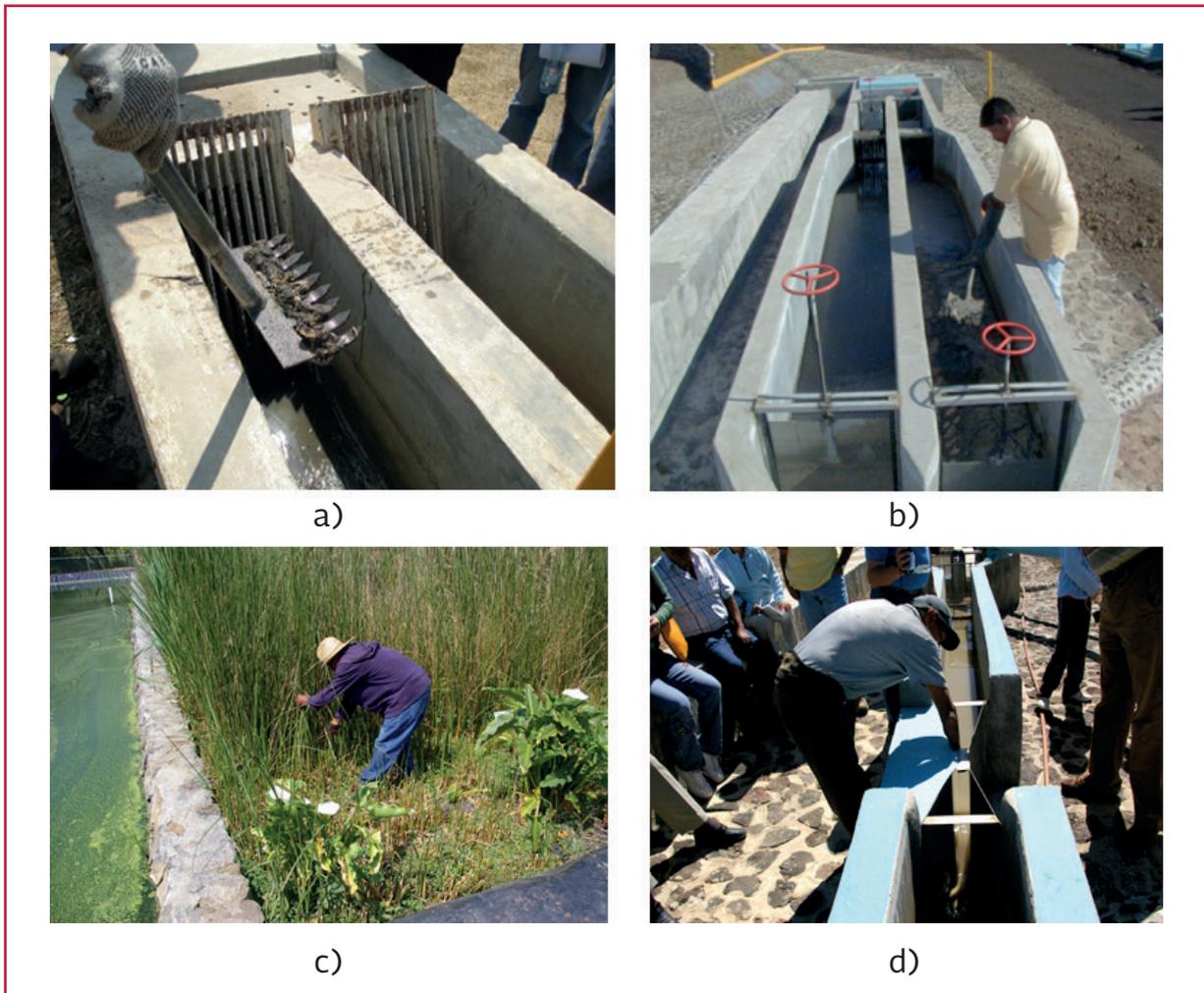


Ilustración A.2 a) Diposición del material podado, b) disposición de los sólidos extraídos en el desarenador

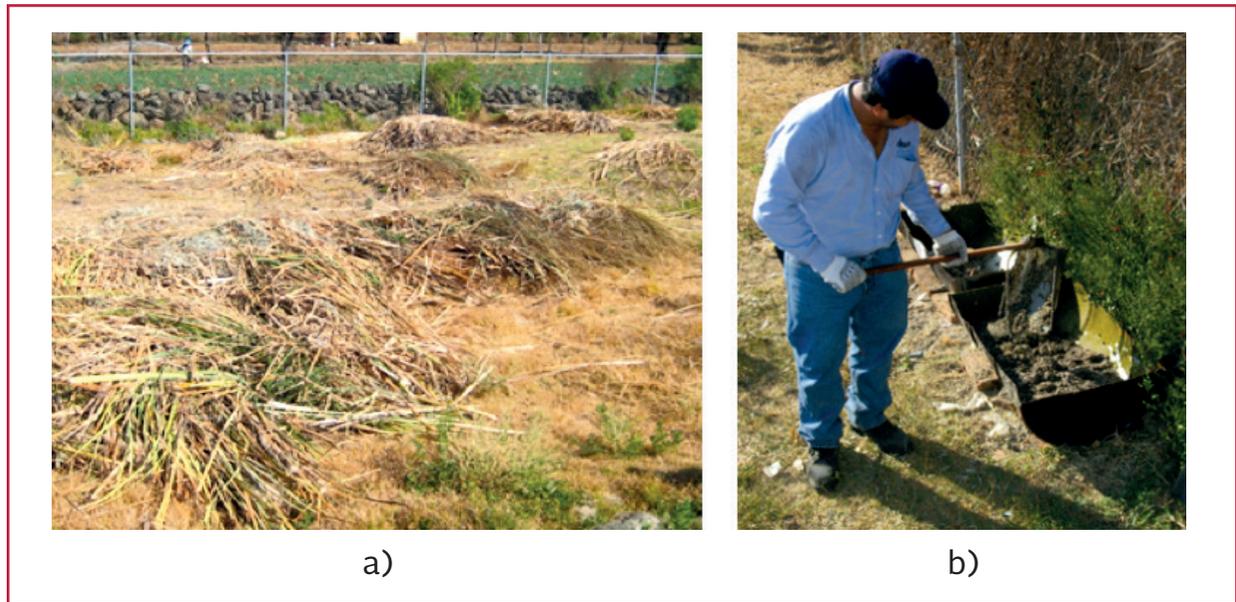


Ilustración A.3 Formato para el registro de las actividades de operación y mantenimiento

Nombre de la planta de tratamiento		Fecha
Nombre del evaluador responsable		
Caudal de diseño	Caudal de operación (afluente)	Caudal de operación (efluente)
Labores de limpieza		
Cárcamo de bombeo		
Rejillas		
Desarenador		
Estructuras de entrada y salida		
Extracción de materiales flotantes		
Poda de la vegetación fuera de las lagunas		
Disposición de residuos		
Labores de reparación		
Camino de acceso dentro y fuera de la planta		
Bordos		
Estructuras de conducción o distribución de caudal		
Equipos eléctricos		
Instalaciones de protección		
Caseta de vigilancia		
Laboratorio		

A.2. INICIO DE OPERACIONES

Otras actividades, que se realizan con menor frecuencia, son el mantenimiento del cuarto del operador, de las mallas de protección, y de los caminos de acceso al sistema de tratamiento.

Es de suma importancia que los operadores cuenten con equipos de seguridad e higiene para su protección como son: guantes, overoles, botas, gorras, cubre-bocas, lentes de protección, jabón, y un botiquín de primeros auxilios.

A.3. PROBLEMAS DURANTE LA OPERACIÓN

Existen varias causas por las cuales se presentan el problema del secado de los lechos. Algunas de las más frecuentes pueden deberse a la existencia de roturas y fugas en el colector antes de llegar a la planta de tratamiento (Ilustración A.5a), también se han presentado casos en los que se extrae el agua de los lechos con fines de riego agrícola (Ilustración A.5b), se pueden presentar fugas en los bordos, cuando se utilizan codos en la salida, y no se tiene algún dispositivo para asegurar que no se vaya a girar solo, existiendo

el riesgo de que se vacíe completamente el estanque, aunque también se ha dado el caso en el que se abrió y se quedó abierta la válvula colocada lateralmente en los lechos con el fin de vaciarlos para su mantenimiento, ocasionando que el agua no llega hasta el sistema debido al azolve del pretratamiento, particularmente cuando éste queda ubicado por debajo del nivel del suelo, como se muestra en la Ilustración A.5c, también a ocurrido en que las estructuras de entrada o salida, o las de distribución de caudal han sido dañadas ya sea por corrosión, por deficiencias en los materiales de construcción o por accidentes que han ocasionado su deterioro (Ilustración A.5d). Otras razones del secado de los estanques pueden deberse a la deficiencia de operación de las válvulas de distribución de caudal, o que los bordos han sido dañados por especies animales que han construido sus madrigueras dentro de los taludes, o por especies vegetales que ahí se hayan desarrollado sobre estos, cuyas raíces después de un tiempo mueren, se descomponen y forman galerías que debilitan a los bordos y que finalmente provoquen su vaciado. Normalmente, salvo el caudal de salida es menor que el caudal de entrada lo que se debe al proceso de evapotranspiración por parte de las especies vegetales, las que provocan una reducción del cau-

Ilustración A.4 a) Pruebas de infiltración, b) llenado de los estanques



a)



b)

dal, ya que se pueden perder entre cuatro y seis milímetros por día, en donde en un humedal de flujo vertical, plantado con carrizo (*Phragmites australis*) se midió una evapotranspiración del tres por ciento por día; en un humedal de flujo subsuperficial horizontal, plantado con tule (*Typhha latifolia*), la pérdida fue de 1.5 por ciento por día; en una Laguna de maduración la evapotranspiración fue de 1.3 por ciento.

Otro problema que suele presentarse en los humedales es la formación de malos olores, los cuales pueden generarse debido a una sobrecar-

ga de materiales orgánicos, ya sea porque fue rebasada la capacidad de tratamiento del sistema, porque el humedal fue subdimensionado, por la aparición de nuevas descargas (rastros, fábricas de alimentos o de fertilizantes), por la presencia de sustancias tóxicas (solventes, residuos de fábricas, hospitales, pinturas, antibióticos, entre otros). Como ya se mencionó con anterioridad, la colmatación del medio filtrante provoca flujos preferenciales y zonas muertas, con lo que se reduce el tiempo de retención hidráulica, lo que provoca que se sobrecargue algunos volúmenes de tratamiento dentro del lecho.

Ilustración A.5 Tendencia de los lechos a secarse. a) Taponamiento o roturas del colector, antes de llegar al sistema, b) Ordeña del agua de los lechos, c) Azolve del pretratamiento, d) Corrosión de estructuras de distribución de caudal



Con relación a los humedales de flujo superficial algunas veces puede observarse que el agua presenta un color rojizo, lo que puede deberse a la presencia de pulgas (Daphnia, Ilustración A.6a) o bien por el desarrollo de bacterias sulfato reductoras Ilustración A.6b). La presencia de color en el agua normalmente está asociada al desarrollo de mal olor, en el caso de las pulgas de agua cuando estas consumen el alimento del estanque mueren por inanición, se descomponen y se genera mal olor.

Las pulgas de agua se utilizan como bioindicadores de buena calidad, por lo que una manera de controlarlas es que tan pronto como se detecte su presencia se introduzca temporalmente una cantidad de agua cruda al estanque, lo que inhibirá su desarrollo y proliferación. Cuando se trata de las bacterias sulfato reductoras su desarrollo está asociado a la presencia de sustancias que contienen azufre, el cual puede estar contenido en algunos productos industriales como son los fertilizantes. En este caso se recomienda identificar la descarga y tratar el agua en sitio para evitar que llegue al sistema de humedales y produzcan efectos adversos. Otra causa de color

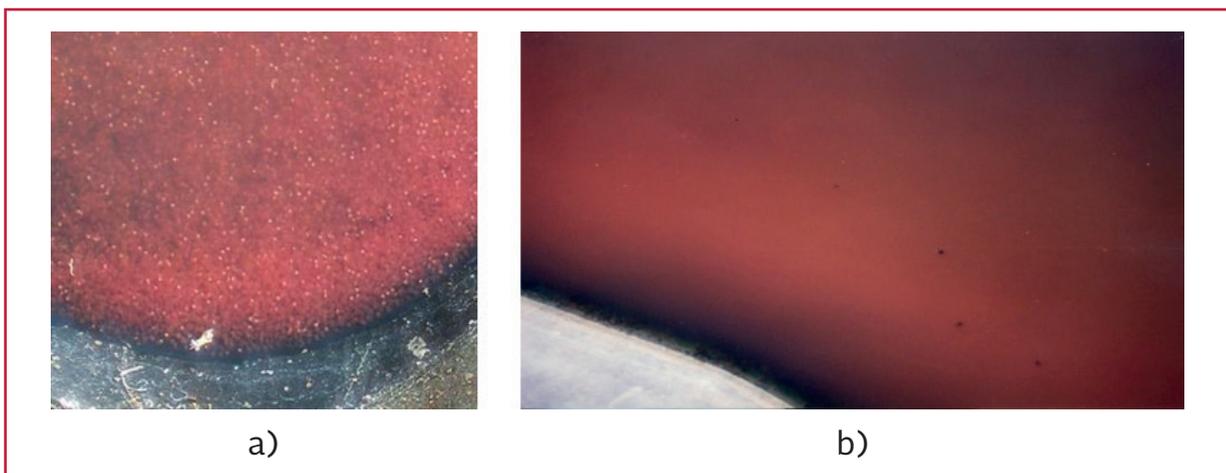
rojizo puede deberse a la presencia de glóbulos rojos, por efecto de la descarga de un rastro, o bien a colorantes en caso de existir alguna industria textil.

En los humedales de flujo superficial también puede presentarse la acumulación de materiales flotantes, como pueden ser basura, algas, latas que se produjeron en el fondo y que salen a flote resultado del metabolismo de las bacterias que producen gases, los que se acumulan debajo de conglomerados orgánicos, provocando que afloren hacia la superficie.

A.4. ACTIVIDADES COMPLEMENTARIAS

Existen otras actividades que deben de realizarse dentro de la operación y mantenimiento como la reparación de los bordos, mantenimiento de la malla ciclónica de protección, caminos de acceso al sistema de tratamiento, limpieza y pintura de la caseta de vigilancia, cuidado y mantenimiento de especies de ornato, mantenimiento de tapas y válvulas, colocación de avisos y alertas y control de visitas, supervisión de tapas y registros.

Ilustración A.6 Presencia de color rojizo. a) Pulgas de agua, b) Bacterias sulfato reductoras



A.5. COMENTARIOS FINALES DE LA OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Aunque ya se mencionó en párrafos anteriores, cabe resaltar que con cierta frecuencia se comete el error de operar de manera ineficiente a los humedales, por considerar que éstos necesitan poco o ningún cuidado, por funcionar de manera natural. Sin embargo no debe de perderse el punto de vista de que son sistemas de tratamiento, que contienen especies vegetales, estructuras hidráulicas y varios procesos que requieren de una continua operación y supervisión, que eviten costosas y molestas reparaciones, y sobre todo que permitan obtener una calidad en el agua tratada que cumpla con los requerimientos con las que fue diseñada, es decir, la protección del medio ambiente, así como de la salud de personas y animales.

Sin duda alguna, resulta mucho más costoso no tratar el agua, en términos económicos, de salud y ambientales, y por lo tanto la operación debe realizarse de la manera más eficiente posible con el objeto de conservar las instalaciones de tratamiento en las mejores condiciones, durante el mayor tiempo posible.

A.6. MEDIDAS DE SEGURIDAD Y RIESGOS A LA SALUD

Es de gran importancia que los operadores conozcan cuáles son las partes que integran el sistema de tratamiento y cómo funcionan. Igualmente importante es que se familiaricen con las medidas de higiene y seguridad que deben tomarse en cuenta con el fin de evitar riesgos

a la salud. Antes de iniciar la operación y mantenimiento del sistema es totalmente necesario que los operadores conozcan y apliquen las siguientes acciones:

- Uso de guantes y botas de hule en todas las actividades que requieran contacto con el agua, de cualquiera de los procesos
- Uso de un overol o ropa asignada de manera exclusiva para realizar las labores de operación y mantenimiento. Existe el riesgo de que los microorganismos tengan contacto con la ropa, y puedan ser transportados al hogar del operador, donde pudiera contaminar a algún miembro de la familia. Es aconsejable que se cuente por lo menos con dos uniformes de trabajo, para que el operador pueda cambiarse de tres a cuatro veces por semana. Los uniformes no deben lavarse junto con la ropa de la familiar. Antes del lavado debe desinfectarse la ropa de trabajo introduciéndola en un recipiente con agua y un poco de cloro, cuando menos durante media hora
- Es de suma importancia que el operador recorte con frecuencias sus uñas, con el propósito de disminuir el riesgo de que en esa zona puedan desarrollarse y protegerse microorganismos, los que pudieran causar enfermedades
- El operador debe proteger la cabeza de los rayos del sol, preferentemente con un sombrero ancho, o una gorra, tanto para evitar contaminación o posibles dolores de cabeza por insolación. También por esta última razón se recomienda consumir agua potable con cierta frecuencia, para evitar una deshidratación. Cuando el cuerpo tiene a

deshidratarse se incrementa la posibilidad del desarrollo de enfermedades. En todos los casos deben lavarse las manos con abundante agua limpia y jabón antes de acercarse a la boca alimentos o agua potable. Nunca debe tocarse la cara, ni los ojos con las manos sucias, ni utilizar las mangas del overol, si éste está sucio

- Al finalizar la actividad diaria, el operador debe bañarse cuidadosamente, de tal manera que se evite transportar microorganismos a su casa. Antes de la hora de la comida, debe lavar sus brazos, manos y cara con jabón y agua abundante

BIBLIOGRAFÍA

- Chalk, E., & Wheale, G. (1989). The root-zone process at Holtby Sewage Treatment Works. *Journal IWEM* , 3, 201-207.
- Lahera, V. (2010). Infraestructura sustentable: Las plantas de tratamiento de aguas residuales. *Quivera* , Universidad Autónoma del Estado de México , 12 (2), 58-69.
- Langergraber, G., Giraldi, D., Mena, J., Meyer, D., Peña, M., Toscano, A., et al. (2009). Recent developments in numerical modelling of sub-surface flow constructed wetlands. *Science of The Total Environment* , 407 (13), 3931-3943.
- Lara, J. A. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. España: Tesis maestría, Instituto Catalán de Tecnología, UPC.
- Celis, J., Junod, M., & Sandoval, M. (2005). Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. *Theoria* , 14 (1), 17-25.
- Lian-sheng, H., Hong-liang, L., Xi Bei-dou, X., & Ying-bo, Z. (2006). Effects of effluent recirculation in vertical-flow constructed wetland on treatment efficiency of livestock wastewater. *Water Science & Technology* , 54 (11-12), 137-146.
- Comisión Nacional del Agua. (2007b). *Diseño estructural de recipientes*. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Comisión Nacional del Agua. (2012). *Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales*. México: SEMARNAT.
- Comisión Nacional del Agua. (2007a). *Paquetes tecnológicos para el tratamiento de excretas y aguas residuales en comunidades rurales*. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Coombes, C. (1990). Reed Bed Treatment Systems in Anglian Water. In P. Cooper, & B. Findlater, *Constructed wetlands in water pollution control* (pp. 223-234). Oxford, United Kingdom: Pergamon Press.
- Cooper, P. F. (1990). *European design and operations guidelines for reed bed treatment systems*. Swindon, UK: EC/EWPCA Emergent Hydrophyte Treatment Systems Expert Contact Group.
- Cooper, P. (1993). The use of Reed Bed systems to treat domestic sewage: The European Design and operations guidelines for reed bed treatment systems. In G. Moshiri, *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement* (pp. 203-217). Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
- Cooper, P., Job, G., Green, M., & Shutes, R. (1996). *Reed Beds and Constructed Wetlands*

- for Wastewater Treatment. Marlow, UK: WRC Publications.
- Lott, B., & Hunt, R. (2001). Estimating evapotranspiration in natural and constructed wetlands. *WETLANDS* , 21 (4), 614-628.
- Crites, R., Middlebrooks, J., & Reed, S. (2006). *Natural Wastewater Treatment Systems*. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, LLC.
- Córdova, R., Lino, J., Patlán, F., Rangel, L., Rodríguez, A., & Vidal, O. (2009). *Humedal artificial para tratamiento de aguas residuales en la Universidad Tecnológica del Norte de Guanajuato*. Guanajuato: CEAG.
- Agnieszka, E. (2011). Nitrogen, Phosphorus and Potassium Resorption Efficiency and Proficiency of four Emergent Macrophytes from Nutrient-Rich Wetlands. *Polish Journal of Environmental Studies* , 20 (5), 1227-1234.
- Arana, V. (2009). *Guía para la toma de decisiones en la selección de sistemas de tratamiento de aguas residuales no convencionales*. Lima: AVINA, Foro ciudades para la vida.
- Arias, C., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* , 13, 17-24.
- Aulestia, K. (2012). *Respuestas Fisiológicas de tres especies de tres especies vegetales nativas sometidas a tratamiento con lixiviado de relleno sanitario*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Bernal , F., Mosquera, D., Maury, H., González, D., Guerra, R., Pomare, A., et al. (2003). *Humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales en la corporación universitaria de la Costa. Seminario Internacional sobre métodos naturales para el tratamiento de Aguas Residuales*. Colombia: Universidad del Valle, Instituto Cinara.
- Brix, H. (1994). Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology* , 29 (4), 71-78.
- Brix, H. (1987). Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetlands plants: the root-zone method. *Water Science and Technology* , 19, 107-118.
- Brown, D. (1994). Constructed wetlands in the USA. *Water Quality Internacional* , 4, 24-28.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
- Department of Planning and Local Government. (2010). *Water Sensitive Urban Design Technical. Manual for the Greater Adelaide Region*. Adelaide: Government of South Australia.
- Dinges, R. (1982). *Natural Systems for Water Pollution Control*. Holanda: Van Rostrand Reinhold Company.
- EPA. (1993b). *Constructed wetlands for waste water, treatment and wild life habitat. 17 Case Studies*. United States.
- EPA. (1995). *A handbook of constructed wetlands: A guide to creating wetlands for agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater in the Mid-Atlantic Region*. Philadelphia: US Government Printing Office.

- EPA. (1988). *Design Manual. Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment*. Cincinnati, OH. USA.
- EPA. (2000b). *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial*. Washington, D.C.: Office of Water. EPA 832-F-00-024.
- EPA. (2000a). *Manual. Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewaters*. Cincinnati, OH. USA.
- EPA. (1993a). *Subsurface Flow Constructed Wetlands For Wastewater Treatment. A Technology Assessment*. United States.
- Escudero, G. E. (2011). *Tratamiento de efluentes de la granja porcina del Instituto Redentores Mater y Juan Pablo II de Ventanilla a través de humedales artificiales para su reutilización como agua de clase III*. Bellavista, Callao: Universidad Nacional de Callao.
- Estrada, I. Y. (2010). *Monografía sobre humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para remoción de metales pesados en aguas residuales*. Colombia.
- Flores, B. (1996). *Diseño y operación de Lagunas de estabilización para tratamiento de aguas residuales industriales y municipales. Curso taller internacional avanzado*. México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Fernández, J., de Miguel, E., de Miguel, J., & Curt, M. (2004). *Manual de Fitodepuración, filtros de macrófitas en flotación*. Editado dentro del Programa Life por el Ayuntamiento de Lorca, la Obra Social de Caja Madrid, la ETSIA de la UPM y la Fundación Global Nature.
- Figueroa, J. (2002). *Evaluación de zantedeschia aethiopica como planta emergente en pantanos de flujo horizontal de subsuperficie para el Tratamiento de aguas residuales*. Tuxtla Gutiérrez: Universidad Autónoma de Chiapas.
- Fisher, A. (1990). Hydraulic characteristics of constructed wetlands at Richmond NSW, Australia. In P. F. Cooper, & B. C. Findlater, *Constructed Wetlands in Water Pollution Control* (pp. 24-28). Oxford: Pergamon Press.
- Frers, C. (2001). AVIZORA. Retrieved from El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales: http://www.avizora.com/atajo/colaboradores/textos_cristian_frers/0008_uso_plantas_acuaticas_tratamiento_aguas.htm
- García, J., Morató, J., & Bayona, J. M. (2004). *Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos*. Barcelona, España: Ediciones CPET.
- García, S., & Corzo, H. (2008). *Depuración con humedales construidos. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. Catalunya, España.
- Hoffmann, H., & Platzer, C. (2011). *Revisión Técnica de Humedales Artificiales: de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas grises y aguas domésticas*. Eschborn: Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, Programa de Saneamiento Sostenible.
- Huertas, R., Marcos, C., Ibarguren, N., & Ordás, S. (2013). *Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones*.

- Valladolid, España: Confederación Hidrográfica del Duero.
- Hunt, P., & Poach, M. (2001). State of the art for animal wastewater treatment in constructed wetlands. *Water Science & Technology*, 44 (11-12), 19-25.
- Instituto Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados. (2010). *Guías Técnicas para el Diseño de Alcantarillado Sanitario y Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales*. Managua, Nicaragua : INAA.
- Iowa Department of Natural Resources. (2007). *Constructed Wetlands Technology Assessment and Design Guidance*. Pleasant Hill: MSA.
- Jenssen, P., Maehlum, T., Krogstad, T., & Vråle, L. (2005). High performance constructed wetlands for cold climates. *Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering*, 40 (6-7), 1343-1353.
- Kadlec, R., & Knight, R. (1996). *Treatment Wetlands*. Boca Ratón, FL, USA: Lewis Publishers.
- Kadlec, R., & Wallace, S. (2009). *Treatment Wetlands*. CRC Press. Boca Ratón: FL, USA.
- McBrien, P. (2000). *Artificial wetland storm water management systems*. Wisconsin Department of Natural Resources.
- Malina, J. F., & Gloyna, D. E. (1976). *Ponds as a Wastewater Treatment Alternative (Water Resources Symposium Number Nine)*. Austin: University of Texas .
- Mara, D., Alabaster, G., Pearson, H., & Mills, S. (1992). *Waste stabilization ponds. A design manual for Eastern Africa*. Leeds, England: Lagoon Technology International.
- Mena, J., Rodriguez, L., Núñez, J., & Villaseñor, J. (2008). *Depuración de aguas residuales con humedales artificiales: Ventajas de los sistemas híbridos*. CONAMA.
- Metcalf & Eddy. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización* (Tercera ed.). México: McGraw Hill.
- Odum, E. (1972). *Ecología* (Tercera ed.). México: Interamericana.
- Pedroza, E. (2001). *Serie autodidacta de medición. Canal Parshall*. México: Conagua, IMTA.
- Peña, M., Van Ginneken, M., & Madera, C. (2003). Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales. *Ingeniería y Competitividad*, 5 (1), 27-35.
- Pérez, R., Alfaro, J., Sasa, J., & Agüero, P. (2013). Evaluación del funcionamiento de un sistema alternativo de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *UNICIENCIA*, 27 (1), 332-340.
- Persson, J., Somes, N., & Wong, T. (1999). Hydraulics efficiency of constructed wetlands and ponds. *Water Science and Technology*, 40 (3), 291-300.
- Píriz, A. (2004). Construcción y explotación de humedales construidos para la depuración de aguas residuales. In J. García, J. Morató, & J. Bayona, *Nuevos criterios para el diseño y operación de humedales construidos* (pp. 81-88). Barcelona, España: CPET.

- Reddy, K. R., & DeBusk, T. A. (1987). State of the art utilization of aquatic plants in water pollution control. *Water Science and Technology* , 19 (10), 61-79.
- Reed, S., Crites, R., & Middlebrooks, E. (1995). *Natural Systems for waste Management and Treatment* (Segunda ed.). New York, USA: McGraw-Hill, Inc.
- Reef Industries. (2011). Options for retention ponds. *Waterproof* , 14-17.
- Rodríguez, P. (2003). Humedales construidos. Estado del arte. (II). *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* , 24 (3), 42-48.
- Rodríguez, R., Julio, C., & Palma, J. (2000). Valor nutritivo del repollito de agua (*pistia stratiotes* l.) y su posible uso en la alimentación animal. *Zootecnia Trop* , 18 (2), 213-226.
- Rodríguez, S. J., Bocardo, P. J., & Fernandez, C. I. (2007). *Manual de tecnologías no convencionales para la depuración de aguas residuales. Capítulo VI: Humedales Artificiales.*
- Rojas, G. (2012, Febrero 21). Inservibles nueve de cada 10 plantas tratadoras de agua en Puebla: Ssaot. *e-consukta.com* .
- Secretaría de la Convención de Ramsar. (2006). *Manual de la Convención de Ramsar Guía a la Convención sobre los Humedales* (Cuarta ed.). Gland, Suiza.
- Seóanez, M., & Gutiérrez, A. (1999). *Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales. Fundamentos científicos, Tecnologías, Diseño.* Madrid: Mundi-Prensa.
- Sherwood, C., Crites, R., & Middlebrooks, E. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. USA: McGraw-Hill, Inc.
- Shilton, A., & Prasas, J. (1996). Tracer studies of a gravel bed wetland. *Water Science and Technology* , 34 (3-4), 421-425.
- Silva, Á. S., & Zamora, H. D. (2005). *Humedales artificiales. Monografía.* Universidad Nacional de Colombia: Manizales.
- Sociedad Iberoamericana de Información Científica. (2010, Julio). *Resumen objetivo elaborado por el Comité de Redacción Científica de SIIC.* Retrieved from Pistia stratiotes es una Planta con Propiedades Terapéuticas y Preventivas: <http://www.bago.com/BagoArg/Biblio/farmaweb343.htm>
- Steiner, G., & Watson, J. (1993). *General design, construction and operation guidelines: Constructed wetlands wastewater treatment systems for small users including individual residences* (Segunda ed.). Chattanooga, TN, United States: TVA/WM-93/10, Tennessee Valley Authority Resource Group.
- Tchobanoglous, G., & Burton, F. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Re-use, 3rd edition.* New York: McGraw-Hill.
- Tanaka, N., Jinadasa, K., & Ng, W. (2011). *Wetlands for Tropical Applications: Wastewater Treatment by Constructed Wetlands.* London: Imperial College Press.
- The Interstate Technology & Regulatory Council (ITRC). (2003). *Technical and Regulatory Guidance Document for Constructed Treatment Wetlands.*

UN-HABITAT. (2008). *Constructed Wetlands Manual*. Nepal, Kathmandu: UN-HABITAT Water for Asian.

UNI-BELL PVC Pipe Association. (2011). *UNI-TR-7-01. Thermoplastic Pressure Pipe Design and Selection*. Dallas, Texas.

Universidad Nacional de la Plata UNLP. (2013). *Planta depuradora cloacal de San Clemente*. Buenos Aires: Facultad de Ingeniería.

Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). *Environment pollution 14. Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow*. (Ed.) Springer pp. 566 .

Wallace, S., & Knight, R. (2006). *Small-Scale Constructed Wetland Treatment Systems. Feasibility, Design Criteria, and O and M Requirements*. United States: WERF.

Watson, J., Reed, S., Kadlec, R., Knight, R., & Whitehead, A. (1989). *Performance Expectations and loading rates for constructed wetlands in Constructed Wetlands for Wastewater Treatment Municipal, Industrial and Agricultural*. D.A. Hammer, Chelsea, Michigan: Lewis Publishers.

Wood, A. (1995). Constructed wetlands in water pollution control, Fundamentals to their understanding. *Water Science and Technology* , 32 (3), 21-29.

GLOSARIO

Afluente. En términos de tratamiento de aguas residuales se refiere al agua cruda (agua sin tratar) que ingresa al sistema de tratamiento. En términos de agua superficial es el agua u otro líquido que ingresa en un embalse o estanque.

Aerobio. Proceso bioquímico que requiere oxígeno molecular, el oxígeno funciona como electrón aceptor terminal. Los organismos aerobios solamente pueden vivir en presencia de oxígeno libre, el que utilizan para degradar los compuestos orgánicos.

Adsorción. Cuando un sólido toma las moléculas en su estructura.

Asimilación. Separación de líquidos, de gases, de coloides o de materia suspendida en un medio por adherencia a la superficie o a los poros de un sólido.

Aguas grises. Aguas domésticas residuales compuestas por agua de lavar proveniente de la cocina, cuarto de baño, aguas de los fregaderos, y lavaderos.

Aguas residuales. Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas.

Aguas residuales municipales. Mezcla de aguas residuales domésticas y descargas indus-

triales originados por una comunidad. Usualmente incluyen las aguas pluviales.

Anaerobio. Un proceso que ocurre en ausencia de oxígeno molecular. Los organismos anaerobios pueden vivir solamente en ausencia de oxígeno libre, utilizan otras sustancias diferentes del oxígeno molecular como aceptores de electrones para la degradación de la materia orgánica como son los nitratos, sulfatos, bióxido de carbono y metales como el fiero (Fe^{3+}) y el manganeso (Mn^{4+}).

Biopelícula. Población de varios microorganismos adheridos a una superficie sólida, donde realizan la biodegradación de la materia orgánica.

Caudal. Es el volumen de agua que fluye a través de una sección transversal de un río o canal en la unidad de tiempo. Normalmente se identifica con el flujo volumétrico o volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

Contaminante. Todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación del ambiente.

Demanda bioquímica de oxígeno. Oxígeno consumido en la degradación de sustancias oxidables del agua por la acción microbiológica.

ca, medido en condiciones estandarizadas. Se expresa en miligramos de oxígeno por litro. Un valor DBO elevado indica un agua con mucha materia orgánica. El subíndice cinco indica el número de días en los que se ha realizado la medida. (DBO). Se determina en laboratorio a una temperatura de 20°C durante un periodo de cinco días. Durante el ensayo, se consume aproximadamente el 70 por ciento de las sustancias biodegradables presentes.

Descarga. Acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor en forma continua, intermitente o fortuita, cuando éste es un bien del dominio público de la Nación.

Descomposición. Desintegración de materiales orgánicos e inorgánicos complejos en sustancias más simples mediante procesos químicos o biológicos.

Desnitrificación. Reducción desasimilatoria de nitrato y/o nitrito a nitrógeno molecular.

Efluente. Agua que fluye fuera de una planta de tratamiento o de un embalse.

Eutroficación. Aumento de nutrientes en el agua que, en general, conlleva un excesivo desarrollo de algas y microorganismos consumidores de oxígeno que afectan principalmente a la vida de la fauna acuática habitual.

Filtración. Proceso físico de separación de un sólido suspendido de un líquido, al hacerlo pasar a través de un medio permeable (poroso) que retiene los sólidos y permite el paso del líquido.

Fotosíntesis. El proceso bioquímico mediante el cual la energía luminosa es transformada en

energía química en especies vegetales, algas y ciertas bacterias. Se realiza la síntesis de carbohidratos a partir de dióxido de carbono, agua y sales inorgánicas. Tiene lugar en presencia de clorofila y luz solar. Durante el proceso se libera oxígeno.

Hidrófita. Especies vegetales que tienen afinidad por el agua. Estas crecen parcial o totalmente sumergidas en agua y requieren una gran cantidad de humedad.

Límite permisible. Valor máximo de concentración de elemento(s) o sustancia(s) en los diferentes componentes del ambiente, determinado a través de métodos estandarizados, y reglamentado a través de instrumentos legales.

Lodos residuales. Residuos semisólidos, que contienen microorganismos y subproductos de cualquier sistema de tratamiento de aguas.

Microorganismos. Organismos que sólo pueden ser observados a través del microscopio, por ejemplo bacterias, hongos, levaduras, entre otros.

Nitrificación. Proceso por el cual el amoníaco es oxidado a nitrito y posteriormente a nitrato, mediante reacciones bacterianas (bacterias nitrificantes: nitrosomas y nitrobacter), o químicas.

Nutriente. Cualquier sustancia que sirve de alimento y que promueve el crecimiento de organismos vivos. El término es generalmente aplicado para el nitrógeno y el fósforo en aguas residuales, pero es también aplicado a otros elementos esenciales y elementos traza.

Parámetro. Variable que se utiliza como referencia para determinar la calidad física, química

ca y biológica del agua, por ejemplo, la temperatura, la presión, la densidad, entre otros.

Planta de tratamiento. Instalación construida para tratar el agua residual antes de ser descargada al medio ambiente.

Pretratamiento. Proceso utilizado para reducir o eliminar los contaminantes de las aguas residuales antes de ingresar al tratamiento secundario. Está constituido por una serie de operaciones físicas y mecánicas, que tienen por objetivo separar del agua residual la mayor cantidad posible de materias. Las unidades incluidas son: desbaste (rejillas), desarenado (desarenador) y desengrasado (Trampa de grasas).

Sedimentación. En términos de tratamiento de aguas residuales consiste en la separación, por la acción de la gravedad, de las partículas suspendidas cuyo peso específico es mayor que el del agua.

Sólidos. Es toda materia sólida que permanece como residuo de evaporación y secado bajo una temperatura entre 103-105 grados centígrados. Podemos distinguirlos en sólidos sedimentables, sólidos en suspensión y sólidos disueltos, siendo los sólidos totales la suma de todos ellos.

Tiempo de retención hidráulica. Período durante el cual se retiene un flujo de agua o de aguas residuales en un estanque, tanque o depósito para su almacenamiento o para completar las reacciones físicas, químicas o biológicas.

Tratamiento avanzado. Procesos físicos, químicos o biológicos que reducen la cantidad de contaminantes específicos, como pueden ser los nutrientes, demanda bioquímica de oxígeno y sólidos remanentes en las aguas residuales tras las etapas de tratamiento primario y secundario.



SIMBOLOGÍA

a	=	Ancho, m	Ne	=	Coliformes fecales a la salida
A	=	Área, m ²	N	=	Nitrógeno
A_s	=	Área superficial, m ²	NMP/100mL	=	Número más probable por 100 mL
C_e	=	Concentración deseada de contaminante en el efluente, mg/L	NT	=	Nitrógeno total
CF	=	Coliformes fecales	OD	=	Oxígeno disuelto
C_o	=	Concentración del contaminante en el afluente, en mg/L	P	=	Población a servir
DBO	=	Demanda bioquímica de oxígeno	pH	=	Potencial de hidrógeno
EPA	=	Environment Protection Agency	P	=	Fósforo
h	=	Profundidad, m	PT	=	Fósforo total
H	=	Tirante, m	Q	=	Caudal, m ³ /d
Hab	=	Habitante	Q_{med}	=	Caudal medio, m ³ /d
K_{DBO}	=	Constante de reducción de DBO	$Q_{m \cdot x}$	=	Caudal máximo, m ³ /d
K_{20}	=	Constante de velocidad a 20 °C/d	$Q_{m \cdot x \text{ extraord}}$	=	Caudal máximo extraordinario, m ³ /d
K_b	=	Coefficiente de decaimiento endógeno	rad	=	radianes
L	=	Largo, cm	SS	=	Sólidos suspendidos
m	=	Metro	SST	=	Sólidos suspendidos totales
M	=	Coefficiente de Harmon	TRH	=	Tiempo de retención hidráulica
Ni	=	Coliformes fecales a la entrada	v	=	Velocidad
			V	=	Volumen



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

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

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

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	1.176	1.143	1.168	1.194
4	1.219	1.245	1.270	1.295	1.321	1.346	1.372	1.397	1.422	1.448	1.473	1.499
5	1.524	1.549	1.575	1.600	1.626	1.651	1.676	1.702	1.727	1.753	1.778	1.803
6	1.829	1.854	1.880	1.905	1.930	1.956	1.981	2.007	2.032	2.057	2.083	2.108
7	2.134	2.159	2.184	2.210	2.235	2.261	2.286	2.311	2.337	2.362	2.388	2.413
8	2.438	2.464	2.489	2.515	2.540	2.565	2.591	2.616	2.642	2.667	2.692	2.718
9	2.743	2.769	2.794	2.819	2.845	2.870	2.896	2.921	2.946	2.972	2.997	3.023
10	3.048	3.073	3.099	3.124	3.150	3.175	3.200	3.226	3.251	3.277	3.302	3.327
11	3.353	3.378	3.404	3.429	3.454	3.480	3.505	3.531	3.556	3.581	3.607	3.632
12	3.658	3.683	3.708	3.734	3.759	3.785	3.810	3.835	3.861	3.886	3.912	3.937
13	3.962	3.988	4.013	4.039	4.064	4.089	4.115	4.140	4.166	4.191	4.216	4.242
14	4.267	4.293	4.318	4.343	4.369	4.394	4.420	4.445	4.470	4.496	4.521	4.547
15	4.572	4.597	4.623	4.648	4.674	4.699	4.724	4.750	4.775	4.801	4.826	4.851
16	4.877	4.902	4.928	4.953	4.978	5.004	5.029	5.055	5.080	5.105	5.131	5.156
17	5.182	5.207	5.232	5.258	5.283	5.309	5.334	5.359	5.385	5.410	5.436	5.461
18	5.486	5.512	5.537	5.563	5.588	5.613	5.639	5.664	5.690	5.715	5.740	5.766
19	5.791	5.817	5.842	5.867	5.893	5.918	5.944	5.969	5.994	6.020	6.045	6.071
20	6.096	6.121	6.147	6.172	6.198	6.223	6.248	6.274	6.299	6.325	6.350	6.375
21	6.401	6.426	6.452	6.477	6.502	6.528	6.553	6.579	6.604	6.629	6.655	6.680
22	6.706	6.731	6.756	6.782	6.807	6.833	6.858	6.883	6.909	6.934	6.960	6.985
23	7.010	7.036	7.061	7.087	7.112	7.137	7.163	7.188	7.214	7.239	7.264	7.290
24	7.315	7.341	7.366	7.391	7.417	7.442	7.468	7.493	7.518	7.544	7.569	7.595
25	7.620	7.645	7.671	7.696	7.722	7.747	7.772	7.798	7.823	7.849	7.874	7.899
26	7.925	7.950	7.976	8.001	8.026	8.052	8.077	8.103	8.128	8.153	8.179	8.204
27	8.230	8.255	8.280	8.306	8.331	8.357	8.382	8.407	8.433	8.458	8.484	8.509
28	8.534	8.560	8.585	8.611	8.636	8.661	8.687	8.712	8.738	8.763	8.788	8.814
29	8.839	8.865	8.890	8.915	8.941	8.966	8.992	9.017	9.042	9.068	9.093	9.119
30	9.144	9.169	9.195	9.220	9.246	9.271	9.296	9.322	9.347	9.373	9.398	9.423
31	9.449	9.474	9.500	9.525	9.550	9.576	9.601	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	epm a ppm	ppm a epm	epm 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
nitrate (NO ₃) ⁻¹	62.01	0.01613	3.6263	0.2758	0.8070
fosfato (PO ₄) ⁻³	31.67	0.03158	1.8520	0.5400	1.5800
sulfato (SO ₄) ⁻²	48.04	0.02082	2.8094	0.3559	1.0416
bicarbonato de calcio Ca(HCO ₃) ₂	805.00	0.01234	4.7398	0.2120	0.6174
carbonato de calcio (CaCO ₃)	50.04	0.01998	2.9263	0.3417	1.0000
cloruro de calcio (CaCl ₂)	55.50	0.01802	3.2456	0.3081	0.9016
hidróxido de calcio Ca(OH) ₂	37.05	0.02699	2.1667	0.4615	1.3506
sulfato de calcio (CaSO ₄)	68.07	0.01469	3.9807	0.2512	0.7351
bicarbonato férrico Fe(HCO ₃) ₃	88.93	0.01124	5.2006	0.1923	0.5627
carbonato férrico Fe ₂ (CO ₃) ₃	57.92	0.01727	3.3871	0.2951	0.8640
sulfato férrico Fe ₂ (CO ₄) ₃	75.96	0.01316	4.4421	0.2251	0.6588
bicarbonato magnésico Mg(HCO ₃) ₂	73.17	0.01367	4.2789	0.2337	0.6839
carbonato magnésico (MgCO ₃)	42.16	1.02372	2.4655	0.4056	1.1869
cloruro de magnesio (MgCl ₂)	47.62	0.02100	2.7848	0.3591	1.0508
hidróxido de magnesio Mg(OH) ₂	29.17	0.03428	1.7058	0.5862	1.7155
sulfato de magnesio (MgSO ₄)	60.20	0.01661	3.5202	0.2841	0.6312

epm = equivalentes por millón

ppm = partes por millón

gpg = granos por galón

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



ILUSTRACIONES

Ilustración 1.1 Componentes principales de un humedal de flujo subsuperficial	3
Ilustración 1.2 Bosquejo de corte transversal de un humedal de flujo superficial	3
Ilustración 1.3 Clasificación de macrófitas: Emergentes (1-4), sumergidas (5-7), flotantes (8) (Odum, 1972)	10
Ilustración 1.4 Desarrollo de especies vegetales en humedales artificiales	13
Ilustración 2.1 Tren de tratamiento típico	18
Ilustración 2.2 Ejemplo de combinación con otro proceso unitario	18
Ilustración 2.3 Combinación de humedal con laguna de maduración	19
Ilustración 2.4 a) Tuberías ubicadas en zonas inundables, b) Pretratamiento deficiente	25
Ilustración 2.5 Suficiente disponibilidad del terreno	25
Ilustración 2.6 Tuberías de llegada y control de caudal en la entrada del humedal: a) Colector encofrado, b) Caja de llegada, c) válvula de control, d) tubería en mediacaña	26
Ilustración 2.7 Alejado de aeropuertos por la vida silvestre	26
Ilustración 2.8 Ubicación contraria a la dirección del viento	27
Ilustración 2.9 Cementos de baja calidad. a) Paredes de un registro de llegada, b) Vertedor rectangular	31
Ilustración 2.10 Bordos construidos con materiales inadecuados	31
Ilustración 2.11 Uso de rejillas. a) rejillas en serie, b) serie de rejillas con diferentes aberturas entre barras	32
Ilustración 2.12 Problemas de azolve en humedales artificiales (Fuente b: Conagua, 2014)	33
Ilustración 2.13 Aforador Parshall	33
Ilustración 2.14 Tubería deteriorada	34
Ilustración 2.15 Disposición de excedencias. a) Uso de canal, b) Uso de cunetas	35
Ilustración 2.16 Construcción de taludes mediante arcilla	36
Ilustración 2.17 Bordos de concreto	36
Ilustración 2.18 Construcción de bordos mediante geomembrana anclada	37
Ilustración 2.19 Protección de los bordos mediante el uso de: a) pastos, b) carpetas de asfalto o de geomembrana y c) pasillos de cemento	38
Ilustración 2.20 Uso de mallas ciclónicas para protección de las instalaciones	39
Ilustración 2.21 Esquema del flujo a través de un humedal artificial	40
Ilustración 2.22 Formas y tamaños de los humedales artificiales de flujo subsuperficial	41
Ilustración 2.23 Impermeabilización mediante geomembranas. a) Con protección contra el sol con de grava, b) antes del relleno con grava	42
Ilustración 2.24 Impermeabilización a) con concreto, b) con arcilla	42
Ilustración 2.25 Efecto de las estructuras de salida en la distribución del flujo en humedales de flujo superficial (Kadlec y Knight, 1996)	45

Ilustración 2.26 Diseño típico de una estructura de salida con control de nivel (Kadlec y Knight, 1996; Crites <i>et al.</i> , 2006)	46
Ilustración 2.27 Diseños entrada de para la distribución del caudal (McBrien, 2000)	47
Ilustración 2.28 Alternativas para distribución de caudal (Kadlec y Knight, 1996)	48
Ilustración 2.29 Flujos preferenciales mediante el uso de trazadores: a) Zona de entrada al humedal, mediante tubería perforada, b) flujo preferencial superficial sobre el lecho del humedal	49
Ilustración 2.30 Ubicación de las estructuras de entrada y salida	50
Ilustración 2.31 Variantes de configuración para la distribución de flujo en un humedal	51
Ilustración 2.32 Colocación del medio filtrante. a) grava con diámetro de 1 a 1.5 cm colocada sobre grava con diámetros de 2 a 3 cm, b) Colocación de diversas capas de grava (arcilla en el fondo, y grava de 2 a 5 cm en la superficie)	51
Ilustración 2.33 Uso de piedras de río como medio filtrante	52
Ilustración 2.34 Colocación del cabezal de distribución de caudal	53
Ilustración 2.35 Esquema de la distancia de siembra en un humedal artificial	53
Ilustración 2.36 Plantado de especies vegetales. a) siembra de especies, b) humedal terminado de sembrar	54
Ilustración 2.37 Componentes del balance hidráulico del humedal de flujo subsuperficial de tipo horizontal	58
Ilustración 2.38 Diagrama de flujo, ejemplo 1	59
Ilustración 2.39 Diagrama de flujo del sistema a diseñar	67
Ilustración 2.40 Zonas de tratamiento en un humedal artificial de flujo superficial propuesto por la EPA (1998)	68
Ilustración A.1 Actividades de rutina: a) Limpieza de las rejillas, b) Limpieza del desarenador, c) Poda de la vegetación y d) Medición de caudal	88
Ilustración A.2 a) Disposición del material podado, b) disposición de los sólidos extraídos en el desarenador	89
Ilustración A.3 Formato para el registro de las actividades de operación y mantenimiento	89
Ilustración A.4 a) Pruebas de infiltración, b) llenado de los estanques	90
Ilustración A.5 Tendencia de los lechos a secarse. a) Taponamiento o roturas del colector, antes de llegar al sistema, b) Ordeña del agua de los lechos, c) Azolve del pretratamiento, d) Corrosión de estructuras de distribución de caudal	91
Ilustración A.6 Presencia de color rojizo. a) Pulgas de agua, b) Bacterias sulfato reductoras	92

TABLAS

Tabla 1.1 Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales de flujo subsuperficial	5
Tabla 1.2 Mecanismos de remoción de contaminantes en humedales de flujo superficial	5
Tabla 1.3 Importancia de los componentes de las macrófitas en los humedales artificiales	8
Tabla 1.4 Especies vegetales utilizadas en los humedales artificiales	9
Tabla 1.5 Eficiencia de transporte de oxígeno y tolerancia a cargas orgánicas de diferentes macrófitas	11
Tabla 1.6 Tipos de fitorremediación (Frers, 2001)	12
Tabla 1.7 Características de especies vegetales	13
Tabla 2.1 Recomendaciones para el diseño empírico	19
Tabla 2.2 Constantes cinéticas, concentraciones en el fondo y factores θ	22
Tabla 2.3 Materiales recomendados para tubería de un humedal artificial	30
Tabla 2.4 Características del suelo y su utilidad para el uso en la construcción del terraplén	37
Tabla 2.5 Ventajas y desventajas para los diferentes tipos de materiales para impermeabilización (Reef Industries, 2011)	42
Tabla 2.6 Resumen de algunas recomendaciones de diseño para humedales de flujo subsuperficial (EPA, 2000a)	55
Tabla 2.7 Características típicas del medio filtrante para humedales artificiales de flujo subsuperficial (EPA, 1993a)	57
Tabla 2.8 Valores típicos de conductividad hidráulica para materiales de los suelos	57
Tabla 2.9 Datos para el diseño del humedal	59
Tabla 2.10 Método de siembra de diferentes macrófitas en HFSS y HFS	66
Tabla 2.11 Criterios de diseño de los humedales con flujo libre (Rodríguez, 2003)	67
Tabla 2.12 Datos para el diseño del humedal	68
Tabla 2.13 Datos para el diseño del humedal	71
Tabla 2.14 Valores de $K_{A,20}$ y C^* para humedal de flujo superficial	71
Tabla 2.15 Resumen de los resultados obtenidos	74

