

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO
DIVISION DE INGENIERIA**



**PANTANOS CONSTRUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA
RESIDUAL**

POR:

LUCIANO PABLO ALTUNAR

MONOGRAFIA

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRONOMO EN IRRIGACION

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Marzo de 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

División de Ingeniería

Departamento de Riego y Drenaje

PANTANOS CONSTRUIDOS PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL

POR:

LUCIANO PABLO ALTUNAR

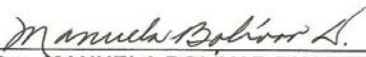
MONOGRAFIA

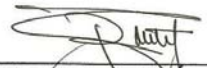
Que se somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero Agrónomo en Irrigación.

APROBADA

EL PRESIDENTE DEL JURADO



M.C. LUIS SAMANIEGO MORENO


Dra. MANUELA BOLÍVAR DUARTE
Sinodal


Dr. JAVIER DE J. CORTÉS BRACHO
Sinodal

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN


M.C. LUIS RODRÍGUEZ GUTIÉRREZ


Coordinación de
Ingeniería

Buenavista, Saltillo, Coahuila. México. Marzo de 2011.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por haberme permitido vivir hasta este momento de mi vida, por librarme de todos los peligros, por haberme dado fuerza y voluntad para concluir lo que un día empecé. Gracias, por ser mi guardián y hacer de mí una persona de bien.

A la **Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”**, mi **“Alma Terra Mater”**, por darme la oportunidad de formarme como un profesionalista, pero sobre todo el haberme cobijado de todos los embates de la naturaleza y darme todas las herramientas necesarias para hacer de esto algo agradable.

A todos los maestro que día con día trabajan, para la formación de nuevos profesionistas y que sin ellos nada de esto sería realidad. Mis más sinceros agradecimientos a los maestros y encargados de laboratorio del **Departamento de Riego y Drenaje**, por su paciencia, confianza y sobre todo por haber compartido su conocimiento de manera desinteresada.

En especial:

M.C. LUIS SAMANIEGO MORENO, por su confianza puesto en mí y su constante asesoramiento para llevar a cabo este trabajo hasta el final.

DR. JAVIER DE J. CORTEZ BRACHO, por su apoyo desinteresado en la elaboración de este trabajo.

DRA. MANUELA BOLIVAR DUARTE, por su apoyo desinteresado en la elaboración de este trabajo.

A todos mis amigos y compañeros de la generación **C** de la carrera de **Ingeniero Agrónomo en Irrigación**.

A mis amigos: Guillermo Cárdenas Medina, Jesús Hernández Pérez, Crispín González Argandar, Vicente Sánchez Alvear, Heber Hernández, Saúl Mazariegos Suarez, por su amistad y confianza, por haber compartido conmigo ese momento tan especial. ¡Gracias!

A mis paisanos: Roque, Tiburcio, Carlos, Delfino, Aurelio. Por su amistad y apoyo durante mi estancia en la universidad.

José Beltrán (JB), Romeo (El flaco) y Andrés (Chico Z), por haberme dado su confianza y su amistad, pero sobre todo por haberme abierto las puertas de su casa, mas aun las de su corazón.

Por aquellos momentos de aventura durante mucho tiempo, a mis camaradas del alma: Olga, Obdulia, Ma. de Lourdes, Estela, Librado, Oscar, Rubelio, Neptali, Alfredo, Agustín, Bernabé. Y a todos aquellos que de alguna manera hicieron que esto fuera posible.

DEDICATORIA

A mis padres con mucho cariño, **Juan Pablo Altunar y Asunción Altunar Cruz**, primero que nada, por haberme permitido ver la luz del día, por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas, por haber puesto su confianza en mí, por sus palabras de aliento. Gracias les doy por creer en mi persona y hacer de mí un hombre de bien. Ahora les puedo decir, que todos sus esfuerzos no fueron en vano. *¡Gracias!*

A mis hermanos, **Virginia (†), Sebastián, Ma. Olivia, Joel (†), Feliciano, Alfonso, Ma. Virginia, Juan Antonio y Josué**. Por compartir conmigo momentos inolvidables, por sus consejos y que una manera u otra intervinieron en mi formación como profesionista, sobre todo gracias por hacerme parte de sus vidas. Gracias por alentarme en decisiones tan importantes para mi vida (**Ing. Joel Pablo Altunar**, Descanse en paz).

A mi esposa con todo mi amor, **Ofelia González Morales**, y a mi hija, **Ellen Yoselin Pablo González**. Por hacer de mi vida una gran felicidad. Por su confianza, por su comprensión y paciencia, por su nobleza, por la gran oportunidad ser parte de sus vidas. Por estar siempre a mi lado, por sonreír aun en los peores momentos y por compartir conmigo los triunfos de la vida. Pero sobre todo ¡Gracias!, por confiar en mí y amarme como me amas.

A mi suegra con cariño, **Felisa Morales Gómez**, por hacer de mi un hijo, pero sobre todo por todo el apoyo que me ha brindado de manera desinteresada. A mis cuñadas: **Araceli, Alma Delia y Gerardo**, por su cariño y comprensión, en todos estos años.

A mis cuñadas: **Primitiva, Asunción, Josefa y Audeli**. A mi cuñado: **Félix**. Y a todos mis sobrinos y sobrinas por su afecto y cariño hacia a mi persona. ¡Gracias!

ÍNDICE

| | | |
|--------|--|----|
| | ÍNDICE DE FIGURAS..... | IV |
| | ÍNDICE DE CUADROS..... | VI |
| I. | INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. | Humedales Artificiales..... | 3 |
| 1.2. | Clasificación de Humedales Artificiales..... | 6 |
| 1.3. | Humedales de Flujo Superficial (HFS)..... | 8 |
| 1.4. | Humedales de Flujo Subsuperficial (HFSS)..... | 9 |
| 1.4.1. | Humedales de flujo subsuperficial horizontal (HFSSh)..... | 9 |
| 1.4.2. | Humedales de flujo subsuperficial vertical (HFSSv)..... | 10 |
| 1.5. | Sistema Híbrido..... | 11 |
| II. | COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES..... | 13 |
| 2.1. | Hidrología..... | 13 |
| 2.2. | Impermeabilización..... | 15 |
| 2.3. | Sustrato..... | 16 |
| 2.4. | Vegetación..... | 19 |
| 2.4.1. | Clasificación de las plantas..... | 20 |
| 2.5. | Microorganismos..... | 27 |
| III. | DISEÑO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL (HFSSh)..... | 28 |
| 3.1. | Reglas de Diseño..... | 29 |
| 3.2. | Ecuaciones de Regresión..... | 32 |
| 3.3. | Modelos de Primer Orden..... | 34 |
| 3.3.1. | Dimensionamiento biológico..... | 34 |
| 3.3.2. | Dimensionamiento hidráulico..... | 40 |
| IV. | PROCESOS DE REMOCIÓN EN HUMEDALES ARTIFICIALES..... | 43 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.1. | Proceso de Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST)..... | 44 |
| 4.2. | Proceso de Remoción de Materia Orgánica (MO)..... | 45 |
| 4.3. | Proceso de Remoción de Nitrógeno (N)..... | 49 |
| 4.4. | Proceso de Remoción de Fósforo (P)..... | 52 |
| 4.5. | Proceso de Remoción de Metales Pesados..... | 53 |
| 4.6. | Proceso de Remoción de Bacterias..... | 54 |
| V. | RENDIMIENTOS ESPERADOS EN LOS HUEMDALES ARTIFICIALES. | 55 |
| 5.1. | Remoción de DBO..... | 58 |
| 5.2. | Remoción de Sólidos Suspendidos Total (SST)..... | 58 |
| 5.3. | Remoción de Nitrógeno (N)..... | 58 |
| 5.4. | Remoción de Fósforo (P)..... | 58 |
| 5.5. | Remoción de Metales Pesados..... | 59 |
| 5.6. | Remoción de Coliformes..... | 59 |
| VI. | CONSIDERACIONES DEL LUGAR PARA LA CONSTRUCCION DE HUMEDALES ARTIFICIALES..... | 60 |
| 6.1. | Suelo..... | 60 |
| 6.2. | Topografía..... | 60 |
| 6.3. | Uso Actual del Suelo..... | 61 |
| 6.4. | Clima..... | 61 |
| 6.5. | Riesgo de Inundación..... | 61 |
| 6.6. | Control de Vectores..... | 61 |
| VII | CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL (HFSSh)..... | 62 |
| 7.1. | Desbroce, Limpieza y Establecimiento de una Plataforma de Trabajo... | 62 |
| 7.2. | Excavación y Movimiento de Tierras..... | 63 |
| 7.3. | Nivelación y Compactación de las Celdas..... | 64 |
| 7.4. | Sistema de Distribución y Recogida..... | 65 |
| 7.5. | Impermeabilización..... | 66 |
| 7.6. | Material Granular..... | 67 |

| | | |
|-------|--|----|
| 7.7. | Vegetación..... | 68 |
| VIII. | ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA..... | 70 |
| IX. | OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO..... | 73 |
| X. | VENTAJAS E INCOVENIENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES..... | 75 |
| XI. | CONCLUSIONES..... | 77 |
| XII. | BIBLIOGRAFIA..... | 78 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-----|---|----|
| 1. | Plantas acuáticas comunes utilizados para humedales construidos..... | 3 |
| 2. | Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas..... | 6 |
| 3. | Tipos de humedales según las plantas predominantes..... | 7 |
| 4. | Humedal artificial de flujo superficial (HFS)..... | 8 |
| 5. | Humedal subsuperficial de flujo horizontal (HFSSh)..... | 10 |
| 6. | Humedal subsuperficial de flujo vertical (HFSSv)..... | 11 |
| 7. | Humedales de flujo mixto..... | 12 |
| 8. | Excavación y recubrimiento de un humedal construido..... | 16 |
| 9. | La distribución de grava dentro de un humedal construido tipo HFSS..... | 17 |
| 10. | Plantas acuáticas emergentes..... | 20 |
| 11. | Plantas acuáticas de hojas flotantes..... | 21 |
| 12. | Plantas acuáticas sumergidas..... | 22 |
| 13. | Plantas acuáticas flotantes..... | 23 |
| 14. | Diagrama del metabolismo del nitrógeno..... | 50 |
| 15. | Procesos de depuración de los humedales artificiales..... | 55 |
| 16. | Reducción media en los sólidos suspendidos totales al fluir el agua por un humedal construido..... | 56 |
| 17. | Comportamiento de la concentración de DBO ₅ del agua residual durante el paso por el humedal..... | 56 |
| 18. | Actividades de desbroce, limpieza y construcción de una plataforma de trabajo..... | 62 |
| 19. | Excavación de zanja y conformación de taludes durante la construcción de un sistema de humedales construidos..... | 63 |
| 20. | Conformación de taludes de las celdas de un sistema de humedales..... | 64 |
| 21. | Colocación de tubería de salida, arqueta de repartición y canal de vertido en un humedal de flujo horizontal..... | 66 |

| | |
|--|----|
| 22. Colocación de geomembrana y geotextil en la construcción de humedal construido..... | 67 |
| 23. Colocación del material granular desde el exterior de la celda y colocación del material granular con maquinaria ligera desde el interior de la celda..... | 68 |
| 24. Operación de plantación de carrizo en un sistema de flujo subsuperficial..... | 69 |
| 25. Diseño para la entrada de los humedales construidos..... | 71 |
| 26. Dispositivo de salida..... | 72 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Principales constituyentes de interés en el tratamiento de aguas residuales..... | 14 |
| 2. | Características del material de soporte..... | 17 |
| 3. | Función de las plantas en sistemas de tratamiento de humedales construidos..... | 19 |
| 4. | Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales..... | 26 |
| 5. | Regla general de criterios de diseño para humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HFSSh)..... | 29 |
| 6. | Parámetros comúnmente utilizados para la construcción de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HFSSh)..... | 30 |
| 7. | Parámetros típicos de diseño para humedales construidos para tratamiento de aguas residuales domésticas..... | 31 |
| 8. | Ecuaciones de regresión para humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal de acuerdo a diferentes autores (expresada en cm d^{-1})..... | 33 |
| 9. | Constante de velocidad de primer orden para humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal de acuerdo a diferentes autores..... | 39 |
| 10. | Órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica (K_s) en función del tipo de material granular utilizado como substrato en el humedal construido de flujo subsuperficial..... | 41 |
| 11. | Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales..... | 43 |
| 12. | Reducción típica del porcentaje y concentraciones efluentes esperadas para contaminantes comunes en humedales de HFSS..... | 57 |

I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento demográfico, nuevos hábitos de vida y el desarrollo urbano e industrial sin una adecuada planificación, ha traído consigo un aumento en la demanda del consumo del agua y por lo tanto, un incremento considerado en la generación de aguas residuales.

De acuerdo con el diagnóstico elaborado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2010), con información hasta el año 2008, en México, se descargan $7.44 \text{ km}^3.\text{año}^{-1}$ ($235.8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) en centros urbanos (descargas municipales) y $6.01 \text{ km}^3.\text{año}^{-1}$ ($190.4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) de usos no municipales, incluyendo industrias.

A nivel nacional se estima que de los $235.8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ y $190.4 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ de aguas residuales colectadas se da tratamiento a solo $2.64 \text{ km}^3.\text{año}^{-1}$ ($83.64 \text{ m}^3/\text{s}$) y $1.07 \text{ km}^3.\text{año}^{-1}$ ($33.7 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), que representan el 35 y el 18 por ciento respectivamente. Del total de aguas residuales tratadas solo el 0.56 por ciento es mediante humedales artificiales, mientras que el resto son tratadas con medios convencionales (CONAGUA, 2010).

Esto ha llevado a buscar nuevas alternativas en el tratamiento de aguas residuales, es decir, que estén al margen de nuestra realidad y sobre todo para los sectores periurbanos y rurales, donde se concentran la mayoría de los puntos de descarga de aguas residuales y en los cuales la demanda de tratamiento es cada vez más urgente (Delgadillo *et al.*, 2010) y se requiere de una solución inmediata.

Actualmente la implementación de los sistemas naturales está ganando fuerza respecto a los convencionales, sobre todo porque producen efluentes de buena calidad, al mismo tiempo que presentan bajos costos de inversión, operación y mantenimiento y no requieren de personal altamente capacitado (Arias y Brix, 2003). Entre las soluciones más atractivas se encuentran los sistemas de tratamiento de aguas residuales por medio de humedales artificiales, que son zonas inundadas o saturadas, bien sea por aguas superficiales o subterráneas, con una frecuencia,

duración y profundidad suficiente para mantener especies de plantas predominantes, adaptadas a crecer en medios saturados (IWA, 2000).

Existen dos tipos de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento del agua residual (Metcalf y Eddy, 1996).

- Humedal de flujo superficial (HFS)
- Humedal de flujo subsuperficial (HFSS)

Los humedales construidos son una alternativa natural a los métodos técnicos de tratamiento de aguas de desecho (Atlas y Bartha, 2002). Son sistemas pasivos de depuración, se caracterizan por su simplicidad de operación, un bajo o nulo consumo energético, una baja producción de residuos, un bajo impacto ambiental y una buena integración al medio ambiente rural (Trinidad, 2006).

El objetivo de este trabajo es el de exponer las generalidades de los sistemas de tratamiento de agua residual por medio de humedales artificiales, con descripciones e investigaciones que se han realizado con respecto al sistema.

PALABRAS CLAVE: Pantanos construidos, diseño y construcción de pantanos artificiales

1.1. Humedales Artificiales

Los humedales artificiales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantenerla en saturación. Regularmente tienen profundidades inferiores de 0.60 m con plantas emergentes como espadañas, carrizos y juncos (Figura 1) (Lara, 1999).

La acción de las macrófitas hace posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas a través de las cuales el agua residual afluyente es depurada progresiva y lentamente. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas y permite la transferencia de oxígeno.

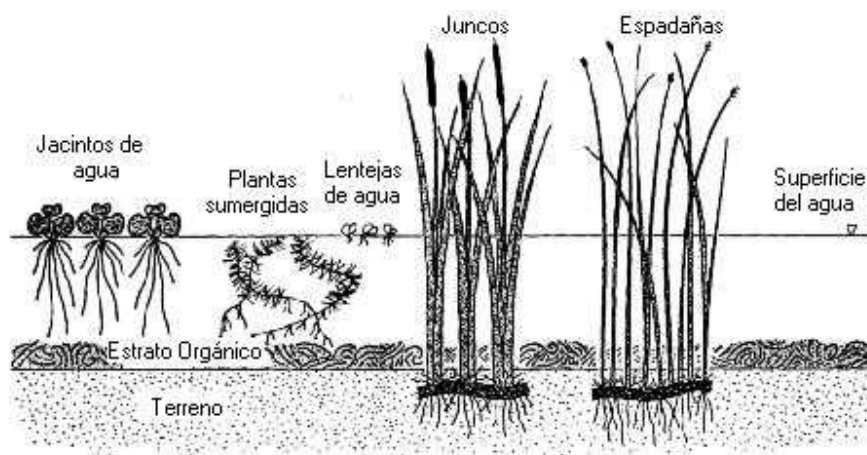


Figura 1. Plantas acuáticas comunes utilizados para humedales artificiales (Lara, 1999).

La depuración del aguas residuales mediante sistemas de humedales artificiales tienen tres partes principales: recogida, tratamiento y evacuación al lugar de restitución (Fernández *et al.*, 2004; citado por Delgadillo *et al.*, 2010).

Estos sistemas se han utilizado para depurar una amplia gama de aguas residuales, dentro de las que destacan: las aguas domésticas y urbanas, aguas industriales (incluyendo fabricación de papel, productos químicos y farmacéuticos, cosméticos, alimentación, refinerías y rastros, entres otros). También son utilizados para el tratamiento de aguas de drenaje de extracciones mineras, aguas de escorrentía superficial agrícola y urbana, y por último en el tratamiento de lodos de depuradoras convencionales (García *et al.*, 2004; citado por Delgadillo *et al.*, 2010).

El proceso mediante el cual los humedales construidos depuran el agua son la remoción de la materia orgánica (medida como DBO₅), oxidación del amonio, reducción de nitratos y remoción de fósforo. Los mecanismos son complejos e involucran oxidación bacteriana, filtración, sedimentación y precipitación química (Cooper *et al.*, 1996).

El funcionamiento de los humedales artificiales se basan en tres principios fundamentales (Delgadillo *et al.*, 2010):

- La actividad bioquímica de microorganismos.
- El aporte de oxígeno a través de las plantas durante el día.
- Y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como soporte para el enraizamiento de las plantas, además de servir como material filtrante.

En conjunto, estos elementos eliminan materiales disueltos y suspendidos en el agua residual y biodegradan materia orgánica hasta mineralizarla y formar nuevos organismos (Reed en Kolb, Hu en Kolb, 1996, citado por Delgadillo *et al.*, 2010).

De acuerdo a Lara (1999) los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales, que son:

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.

- Utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos.
- Lograr niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y bajo mantenimiento.

En general, el tratamiento de las aguas residuales se basa en los principios de los sistemas naturales. Ya que los humedales artificiales se acercan a lo que ocurre en la naturaleza, al imitarla, son denominados genéricamente ecotecnología. Por que aprovechan los componentes del ambiente como el suelo, el aire, las plantas y los microorganismos para depurar los contaminantes presentes en el agua residual.

Las ventajas principales que presenta con respecto a sistemas convencionales radican en sus bajos costos de operación y construcción, aunados a su mantenimiento sencillo y su alta capacidad de remoción de contaminantes como son la materia orgánica, nitrógeno, fósforo y microorganismos patógenos. Esto ha permitido que sean empleados en el tratamiento de aguas residuales no solo de pequeñas y medianas comunidades, sino que también de aguas residuales de tipo agroindustrial y de algunos sectores industriales en específico (Fenoglio, 2000; Fenoglio, 2003).

Por tal motivo, esta ecotecnología resulta altamente atractiva para ser aplicada en México por su versatilidad y rentabilidad económica (Duran-de-Bazua *et al.*, 2005).

En forma general, un humedal artificial se construye haciendo una excavación de forma rectangular que es impermeabilizada con el empleo de geomembranas u otros sistemas que hagan impermeable al humedal, reduciendo la contaminación del subsuelo y de los mantos freáticos. Después se rellena con uno o varios materiales de empaque como arena, grava o tezontle, con la aplicación de cierta granulometría predefinida que funcionan como filtro para el agua y como soporte para las plantas que son sembradas en él. Este material funciona también como hábitat y soporte para la gran cantidad y diversidad de microorganismos que se desarrollan en el interior del reactor.

1.2. Clasificación de Humedales Artificiales

Son diversas las clasificaciones de los humedales artificiales (Figura 2), y se pueden clasificar según el tipo de material vegetativo que utilicen: plantas fijas al sustrato (enraizadas) o plantas flotantes libres (Delgadillo *et al.*, 2010).

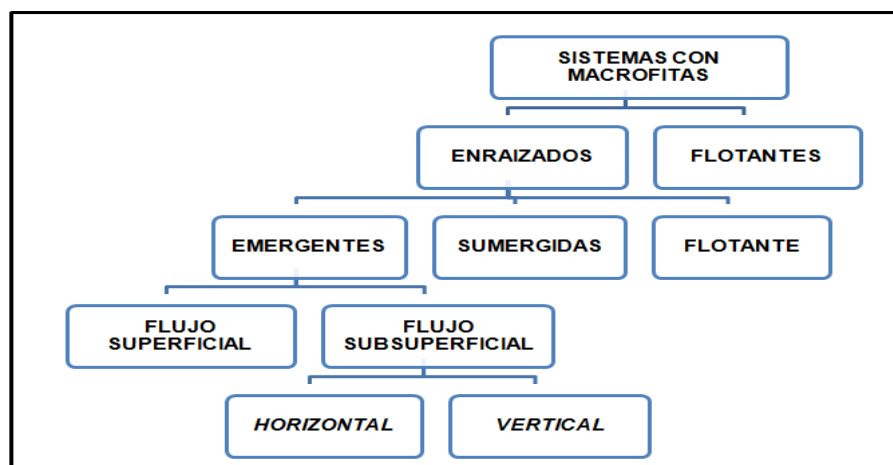


Figura 2. Esquema de clasificación de los sistemas de depuración con macrófitas (Delgadillo *et al.*, 2010).

Considerando la forma de vida de estas plantas, Vymazal (1998), sugiere la siguiente clasificación (Figura 3):

- Humedales construidos, basados en macrófitas flotantes. Ej.: *Eichhornia crassipes*, *Lemna minor*.
- Humedales construidos, basados en macrófitas de hojas flotantes. Ej.: *Nymphaea alba*, *Patamogeton gramineus*.
- Humedales construidos, con macrófitas sumergidas. Ej.: *Littorella uniflora*, *Patamogeton crispus*.

d) Humedal construido, con macrófitas emergentes. Ej.: *Typha latifolia*, *Phragmites australis*.

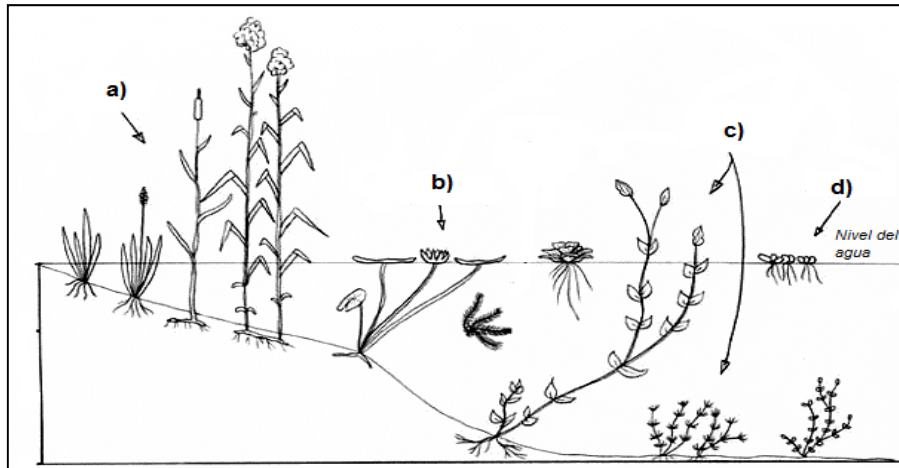


Figura 3. Tipos de humedales según las plantas predominantes: (a) Macrófitas emergentes, (b) Macrófitas de hojas flotantes, (c) Macrófitas sumergidas, (d) Macrófitas flotantes.

Para el tratamiento de aguas residuales existe la posibilidad de usar las diferentes alternativas siempre y cuando las plantas se puedan adaptar a las condiciones ambientales.

De acuerdo a Metcalf y Eddy (1996) los humedales construidos, se dividen tradicionalmente en dos tipologías atendiendo la circulación del agua:

- a) Humedales de flujo superficial (HFS).
- b) Humedales de flujo subsuperficial (HFSS).
 - Humedales de flujo subsuperficial horizontal (HFSSh).
 - Humedales de flujo subsuperficial vertical (HFSSv).

Esto permite combinar diferentes tipos de humedales con diferentes regímenes de flujo, sistemas de alimentación, plantas y sustratos. Por lo tanto, se harán una

descripción de las principales características del sistema, por ser éstas las comúnmente utilizadas:

1.3. Humedales de Flujo Superficial (HFS)

En los humedales de flujo superficial (Figura 4) el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de las macrófitas (Delgadillo *et al.*, 2010). A su vez está compuesto por un canal impermeabilizado para evitar las infiltraciones. Sobre esta capa se sitúa un lecho de arena capaz de mantener las raíces de la vegetación que poblará el humedal. Dicha vegetación está compuesta por una combinación de plantas acuáticas emergentes (carrizo, juncos, entre otras) y plantas flotantes y acuáticas sumergibles, estas tienen niveles de agua poco profundos (0.1 a 0.6 m).

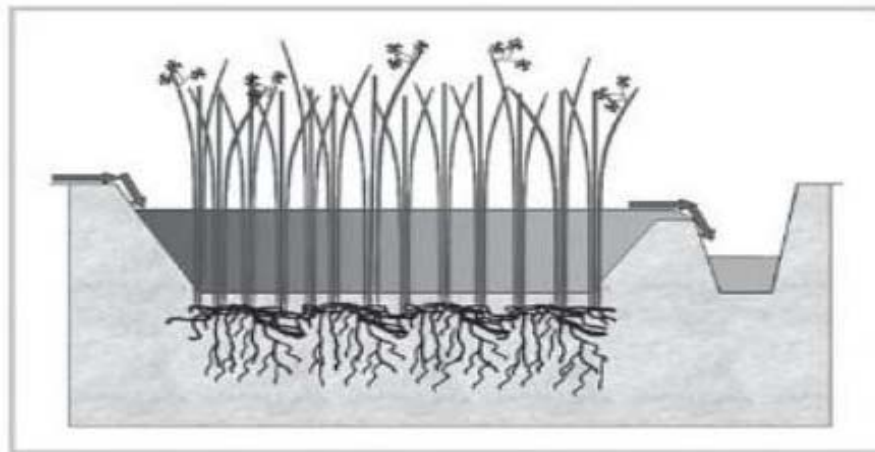


Figura 4. Humedal artificial de flujo superficial (Delgadillo *et al.*, 2010).

Los HFS se diseñan y construyen con el fin de aprovechar los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren naturalmente para reducir la materia orgánica, los sólidos suspendidos totales, nutrientes y organismos patógenos (US EPA, 1999).

1.4. Humedales de Flujo Subsuperficial (HFSS)

Los humedales de flujo subsuperficial consisten en un lecho excavado en el terreno con una lámina impermeabilizante para prevenir la infiltración del agua residual. En este caso el lecho se rellena con un medio granular como por ejemplo gravas, rocas y arena o una combinación de las mismas. En este tipo de sistemas la vegetación emergente se encuentra enraizada en la grava. La circulación del agua es subterránea a través del medio granular (con una profundidad del agua de alrededor de 0,6 m). Por tanto, el agua no se encuentra expuesta directamente a la atmósfera (Delgadillo *et al.*, 2010).

Los sistemas de flujo subsuperficial presentan una serie de ventajas frente a los de flujo superficial como su capacidad de disipar olores, su aislamiento térmico y una mayor cantidad de biopelícula debido a que la grava proporciona una mayor superficie específica (Soriano, 2009). Las mismas especies vegetales se usan en los dos tipos de humedales artificiales (Lara, 1999).

Los humedales de flujo subsuperficial se clasifican en dos tipos según el sentido de circulación del agua:

1.4.1 Humedales de flujo subsuperficial horizontal (HFSSh).

Son los sistemas más utilizados en Europa y tienen su origen en la investigación de Seidel (1967) y Kickuth (1977); citados por Delgadillo y colaboradores, (2010). El agua ingresa de forma permanente. Es aplicada en la parte superior de un extremo y

recogida por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso. La profundidad del lecho varía entre 0.45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0.5 a 1 por ciento. El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortización generalmente formada por grava de gran tamaño (Figura 5).

El sistema de recogida consiste en un tubo de drenaje ranurado, rodeado de grava de igual tamaño que la utilizada al inicio. El diámetro de la grava del ingreso y salida oscilan entre 50 mm a 100 mm. La zona de plantación está constituida por gravas fina de un solo diámetro, entre 3 mm a 32 mm. Es fundamental que el agua que ingrese al sistema se mantenga en un nivel inferior a la superficie (5 – 10 cm), lo cual se logra regulando el nivel del dispositivo de salida en función a este requerimiento.

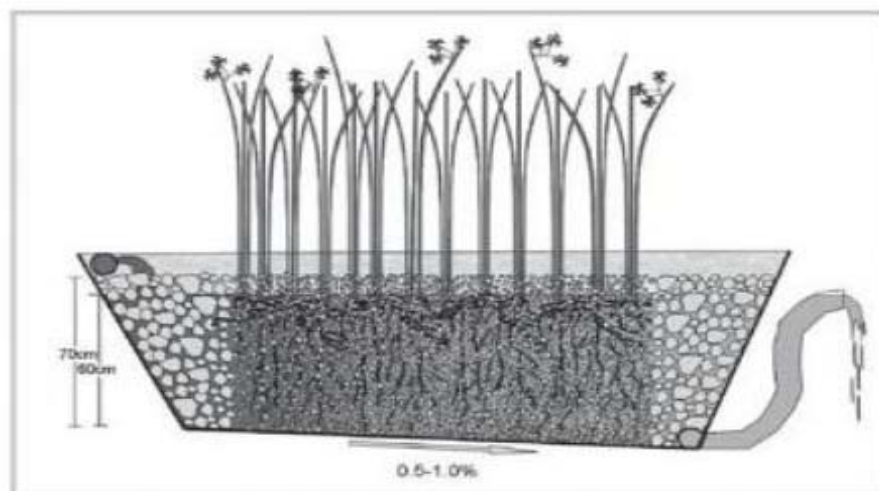


Figura 5. Humedal subsuperficial de flujo horizontal (Delgadillo *et al.*, 2010).

1.4.2. Humedales de flujo subsuperficial vertical (HFSSv)

Los sistemas de flujo subsuperficial vertical (Figura 6) se diseñan con flujo intermitente, este tipo de humedales reciben las aguas residuales de arriba hacia abajo, a través de un sistema de tubería de aplicación de agua (Delgadillo *et al.*, 2010).

Las aguas infiltran verticalmente a través de un sustrato inerte (arena, grava) 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.

Para favorecer las condiciones aerobias del medio poroso, se suele colocar un sistema de aeración con chimeneas, que son tuberías ranuradas 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.

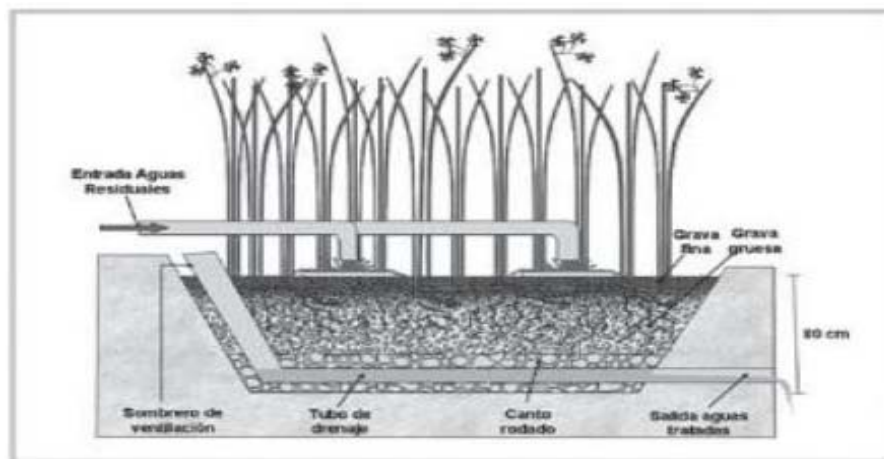


Figura 6. Humedal subsuperficial de flujo vertical (Delgadillo *et al.*, 2010).

De acuerdo a Quipuzco (2002) el sistema de flujo subsuperficial de flujo horizontal presenta un mejor rendimiento con respecto al flujo vertical.

A esta clasificación, Arias y Brix (2003) añaden a los humedales de flujo mixto, el cual se describe como sigue:

1.5. Sistema Híbrido

Son combinación de los humedales anteriores descritos y pueden estar compuestos de diferentes lechos y/o de zonas en donde el agua circula expuesta a la atmosfera, zona donde el flujo es subsuperficial e inclusive con sectores con flujo vertical (Figura 7). Su disposición dependerá de los objetivos del tratamiento, de las características del agua a tratar, de las condiciones de operación y disponibilidad económica. Para obtener una mejor calidad del agua, o si se requiere obtener resultados de calidad especifica, o hacer más eficientes los sistemas.

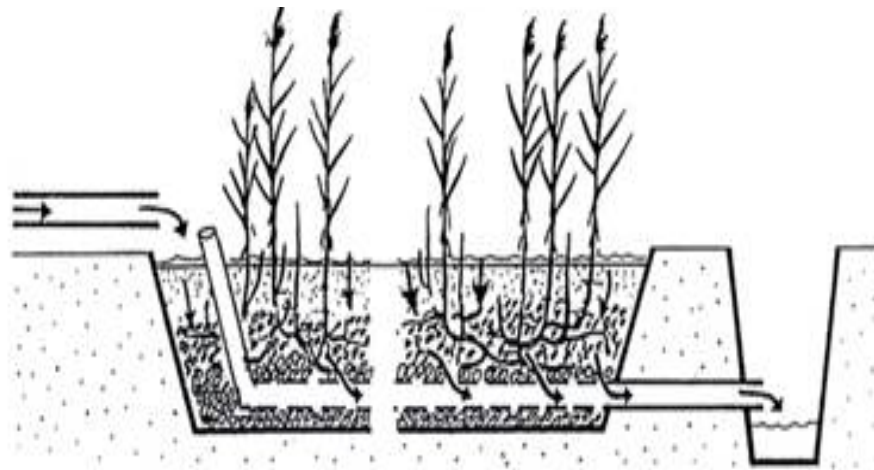


Figura 7. Humedales de flujo mixto (Arias y Brix, 2003).

II. COMPONENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES.

Para la construcción de humedales se deben considerar básicamente, la impermeabilización de la capa superficial del terreno, la selección adecuada del medio granular en caso del sistema de flujo subsuperficial (HFSS), el establecimiento de la vegetación y las estructuras de entrada y salida.

Para el cálculo de la profundidad del humedal esta debe ser acorde al crecimiento que alcanzan las raíces de la especie vegetal (Lara, 1999).

Para los humedales son factores indispensables la hidrología, la hidráulica, la bioquímica, los efectos de la temperatura, las características de los componentes y la especie vegetal (US EPA, 1999).

De igual manera la porosidad y la conductividad hidráulica tienen una influencia importante sobre el tiempo de residencia y la calidad del agua efluente en los humedales para el tratamiento de aguas residuales (Kadlec y Knigh, 1996). Una reducción de la conductividad hidráulica será la indicación de que la porosidad de los humedales disminuye, lo cual provocará la disminución de la capacidad del tratamiento (Francia *et al.*, 2000).

2.1. Hidrología

Es sin duda este el factor más importante para el diseño de humedales construidos (Mitsch y Gosselink, 1993; Hammer, 1992; Kusler y Brooks, 1998; Citado por Silva y Zamora, 2005). Ésta influye y controla directamente los factores abióticos, como la disponibilidad de nutrientes, condiciones aerobias y anaerobias, la condición del suelo, la profundidad y la velocidad del agua. Por ello es considerado el factor primario en el éxito o fracaso del humedal.

Las aguas residuales después de haber sido modificada por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, son recogidas por alcantarillados para ser conducidas posteriormente a los humedales, en este caso. En el Cuadro 1 se presentan los contaminantes de principal interés para el tratamiento de aguas residuales (Crites y Tchobanoglous, 2000).

Cuadro 1. Principales constituyentes de interés en el tratamiento de aguas residuales (Crites y Tchobanoglous, 2000).

| CONSTITUYENTES | RAZON DE INTERES |
|--|---|
| Sólidos suspendidos totales | Formación de depósitos de lodos y condiciones anaerobias. |
| Compuestos orgánicos biodegradables | Agotamiento del oxígeno en fuentes naturales y desarrollo de condiciones sépticas. |
| Constituyentes inorgánicos disueltos (sólidos disueltos totales) | Constituyente inorgánico adicionados por el uso. Aplicación en la reutilización de aguas residuales. |
| Metales pesados | Constituyentes metálicos adicionados por el uso. Muchos metales se clasifican como contaminantes de prioridad. |
| Nutrientes | Crecimiento excesivo de la vida acuática. Indeseable, eutrofización, concentración de nitratos en aguas para consumo humano. |
| Patógenos | Transmisión de enfermedades. |
| Contaminantes orgánicos prioritarios | Sospechosos de ser carcinogénicos, mutagénicos, teratogénicos o de toxicidad aguda alta. Muchos contaminantes prioritarios son resistentes a los métodos de tratamientos convencionales. (Conocidos como contaminantes orgánicos refractarios). |

La hidrología es el factor más importante en el diseño del humedal, ya que reúne todas las funciones del humedal y es un factor primario importante en el funcionamiento adecuado del humedal (Lara, 1999), por las siguientes razones:

- Pequeños cambios en la hidrología pueden tener efectos importantes en un humedal y en la efectividad del tratamiento.
- Debido al área superficial del agua y su poca profundidad, el sistema actúa recíproca y fuertemente con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración (la pérdida combinada de agua por evaporación de la superficie de agua y pérdida a través de la transpiración de las plantas).
- La densidad de la vegetación en un humedal afecta significativamente su hidrología, primero, obstruyendo caminos de flujo siendo sinuoso el movimiento del agua a través de la red de tallos, hojas, raíces, y rizomas, y segundo, bloqueando la exposición al viento y al sol.

2.2. Impermeabilización

Los dos tipos de humedales requieren que se coloque una barrera impermeable (Figura 8) de esa manera se impedirá la contaminación del subsuelo o de aguas subterráneas con aguas residuales. El tipo de barrera dependerá en algunas ocasiones de las condiciones del lugar y del material que se encuentra de manera natural, ya que esta puede ser compactada hasta un estado cercano al impermeable.

Los materiales de recubrimiento pueden ser de tierra o arcilla con una permeabilidad muy baja (menor a 10^{-6} cm.s⁻¹) bentonita, asfalto, o plásticos sintéticos. Este deber ser fuerte, grueso, y liso, y debe ser protegido de la perforación por piedras puntiagudas o grava (US EPA, 1999).

La mayoría de los sistemas utilizan cloruro especialmente fabricado de polivinilo (PVC) o polietileno de alta densidad (HDP). Algunos recubrimientos necesitan ser protegidos de la luz de UV y pueden ser cubiertos con piedras o tierra para este propósito. La carga en el recubrimiento será aproximadamente 2,200 kg.m⁻², incluyendo la masa de la planta.

El fondo del humedal debe ser cuidadosamente alisado antes de la colocación del impermeabilizante, sobre todo si es del tipo de alguna fibra sintética, que pueda llegar a perforarse (Lara, 1999). Los humedales deben tener una ligera pendiente

para asegurar el drenaje, y así asegurar las condiciones hidráulicas necesarias para el flujo del sistema.



Figura 8. Excavación y recubrimiento de un humedal construido.

2.3. Sustrato

Los sustratos en los humedales construidos incluyen suelo, arena, grava, roca y materiales orgánicos. La profundidad del medio granular en los humedales de flujo subsuperficial varía entre 0,3 y 0,9 m. La característica principal del material es que debe tener la permeabilidad suficiente para permitir el paso del agua través de él. En el Cuadro 2 se presenta el diámetro medio utilizado para humedales construidos que oscilan entre 0,5 cm (grava fina) hasta 16 cm (roca rota) (Rodríguez-Monroy y Durandebazua, 2006).

Garantizar la limpieza del granulado antes de su colocación, evita la segregación de finos y posibles estancamientos en un futuro. Esta debe tener cierta resistencia, y estabilidad. Además de garantizar que puede proporcionar permeabilidad en el humedal a largo plazo. Es preferible la utilización de grava de río redondeada y dura sobre piedra aplastada afilada, ya que empaca más flojamente y permite el paso del agua (US EPA, 1999; Hammer y Bastian, 1989).

En el caso de los HFSS, serán colocados directamente sobre la membrana que recubre el humedal, teniendo esta las propiedades mecánicas necesarias para soportar sin sufrir algún daño. Para el caso de HFS, se puede utilizar el terreno que fue retirado de la cubierta vegetal o cualquier otro tipo de sustrato, de igual manera se coloca sobre la membrana, a diferencia del HFSS, esta sirve de base para las raíces de la vegetación.

La Figura 9 muestra un ejemplo del tamaño de la grava y espaciamiento dentro de la célula del humedal (US EPA, 1999).

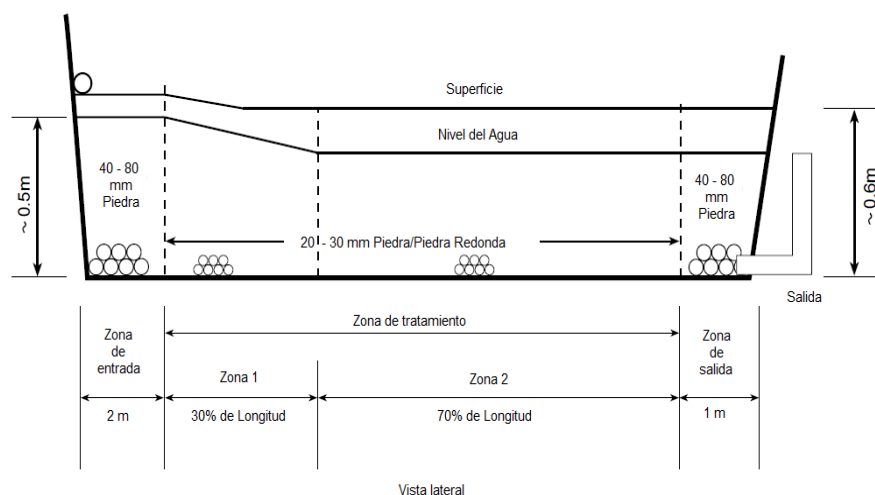


Figura 9. La distribución de grava dentro de un humedal construido tipo HFSS (US EPA, 1999).

Cuadro 2. Características del material de soporte (Rodríguez-Monroy y Duran-de-Bazua, 2006).

| Capa | Diámetro granular (mm) | Altura relativa a la parte inferior de la columna (cm) |
|-------------------|-------------------------------|---|
| <i>Protección</i> | 4-8 | 85-90 |
| <i>Principal</i> | 0.5-4 | 15-85 |
| <i>Transición</i> | 4-8 | 10-15 |

| | | |
|----------------|--------------|-------------|
| <i>Desagüe</i> | <i>12-16</i> | <i>0-10</i> |
|----------------|--------------|-------------|

Los substratos, sedimentos y los restos de vegetación tienen su gran importancia debido, según Lara (1999) a:

- Soportan a muchos de los organismos vivientes en el humedal.
- La permeabilidad del substrato afecta al movimiento del agua a través del humedal.
- Muchas transformaciones químicas y biológicas (sobre todo microbianas) tienen lugar dentro del substrato.
- El substrato proporciona almacenamiento para muchos contaminantes.
- La acumulación de restos de vegetación aumenta la cantidad de materia orgánica en el humedal. Dando lugar al intercambio de materia, la fijación de microorganismos y es una fuente de carbono, que es la fuente de energía para alguna de las más importantes reacciones biológicas del humedal.

Estudios realizados por diversos autores (Francia *et al.*, 2000; Rodríguez-Monroy y Duran-de-Bazua, 2006; Romero *et al.*, 2009) demostraron que los pantanos en los que se utilizó tezontle presentó mejores resultados que los pantanos en los que se maneja grava debido a su alta porosidad.

Dado que el material debe seleccionarse de acuerdo a la disponibilidad en la zona donde se vaya a construir el humedal artificial para reducir los costos, deberán estudiarse la granulometría de las diferentes capas, que conforman el empaque como un factor determinante, para que se tenga una adecuada velocidad hidráulica, y su eficiencia para permitir la transformación de los contaminantes a biomasa y gases.

2.4. Vegetación

Según Llagas y Gómez (2006) la vegetación cumple una función importantísima dentro del sistema de humedales (Cuadro 3), fundamentalmente por las raíces y rizomas enterrados. Por tanto, el beneficio obtenido, es la transferencia de oxígeno desde la atmósfera a través de hojas y tallos hasta el medio donde se encuentran las raíces.

Este oxígeno crea regiones aerobias donde los microorganismos lo utilizan para producir diversas reacciones de degradación de materia orgánica y nitrificación (Arias, 2004, citado por Delgadillo *et al.*, 2010).

La degradación de hojas sumergidas y tallos muertos es de vital importancia en los humedales de flujo superficial (HFS). Estos restos de vegetación sirven como sustrato para el crecimiento de la película microbiana fija, que es en gran parte el responsable del proceso de tratamiento.

Cuadro 3. Función de las plantas en sistemas de tratamiento de humedales construidos (Llagas y Gómez, 2006).

| Partes de vegetación | Funciones |
|---|--|
| Raíces y/o tallos en la columna de agua. | <ol style="list-style-type: none">1. Superficies sobre la cual las bacterias crecen.2. Medio de filtración y adsorción de sólidos. |
| Tallos y/o hojas sobre la superficie del agua. | <ol style="list-style-type: none">1. Atenúan la luz del sol y así previenen el crecimiento de algas.2. Reducen los efectos del viento en el agua. Es decir, transferencia de gases entre la atmósfera y el agua.3. Importante en la transferencia de gases para y desde las parte sumergidas de las plantas. |

2.4.1. Clasificación de la vegetación

En base a la morfología y fisiología Arguello *et al.* (1999) clasifican a las plantas basándose en la forma de fijación:

A). Macrófitas acuáticas fijas al sustrato.

Macrófitas emergentes. Aparecen en los suelos aéreos o sumergidos (Figura 10), desde la zona en que la capa freática se halla a unos 0.5 m por debajo de la superficie del suelo, hasta donde el sedimento queda cubierto aproximadamente por 1.5 m de agua; se trata principalmente de plantas perennes, sea por que conservan los rizomas o todo el edificio vascular. En las especies heterófilas, las hojas sumergidas y/o flotantes preceden a las hojas maduras aéreas; muchas especies pueden vivir sumergidas (normalmente son estériles). Todas producen órganos reproductores aéreos.

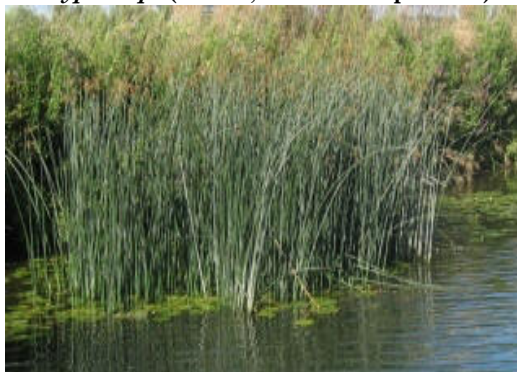


Typha sp. (Eneas, Aneas o Espadaña)



Phragmites australis (Cav.) Trin.
subsp. *chrysanthus* (Nabille) Kerguelen

Phragmites Australis (Carrizo)



Scirpus Lacustris L. (Junco de laguna)



Iris Pseudacorus (Lirio Amarillo)

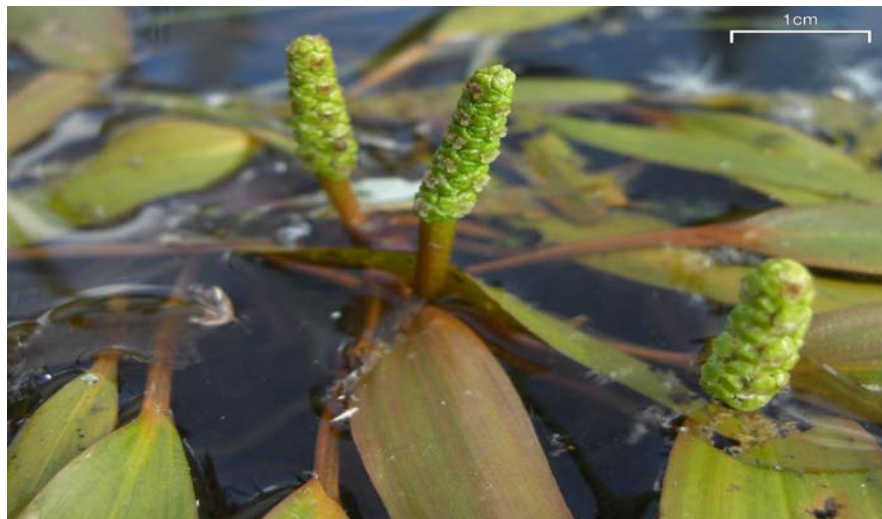
Figura 10. Plantas acuáticas emergentes.

Macrófitas de hojas flotantes.

Son principalmente angiospermas que se encuentran sobre sedimentos sumergidos (Figura 11), desde aproximadamente 0.5 m hasta 3 m; en las especies heterófilas las hojas sumergidas proceden o acompañan a las hojas flotantes; los órganos reproductores son flotantes o aéreos; las hojas flotantes están asentadas sobre peciolo largos y flexibles o sobre peciolo cortos que salen de largos tallos ascendentes.



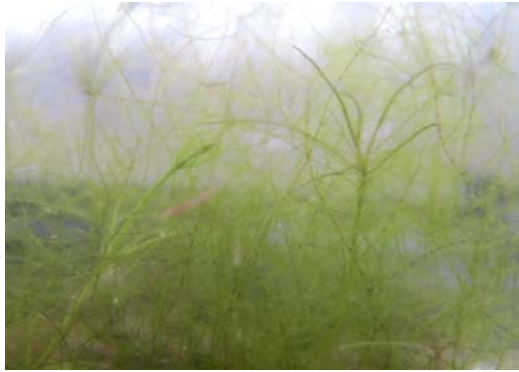
Nymphaea Alba (Azucena de agua, Rosa de Venus o Ninfa Blanco)



Patamogeton Gramimineus

Figura 11. Plantas acuáticas de hojas flotantes.

Macrófitas sumergidas. Comprenden algunos pteridofitos, numerosos musgos y carófitos y muchas angiospermas (Figura 12). Se encuentran en todos los niveles de la zona fótica (a la cual llega la luz solar), pero las angiospermas vasculares solo viven hasta aproximadamente 10 m; sus hojas son muy variadas: desde estrechamente divididas, hasta muy anchas; los órganos reproductores son aéreos, flotantes o sumergidos.



Chara Vulgaris



Utricularia Gibba (Jorobado)



Egeria Densa (Maleza acuática Brasileña)



Littorella Uniflora (shoreweed)

Figura 12. Plantas acuáticas sumergidas.

B). Macrófitas flotantes libres.

Grupo muy variado cuya característica típica consiste en no estar enraizados al sustrato, viviendo libres en el agua (Figura 13); presentan formas y hábitos diversos: desde plantas de gran tamaño con rosetas de hojas aéreas y/o flotantes y con raíces sumergidas bien desarrolladas a pequeñas plantas que flotan en la superficie, con muy pocas raíces o ninguna; los órganos reproductores son flotantes o aéreos, pero muy rara vez están sumergidos. (Wetzel, 1981, citado por Arguello *et al.*, 1999).



Salvinia Molesta (Helecho Acuático)



Pistia Stratiotes (Lechuga de agua)



Eichhornia Crassipes (Jacinto de agua,
Buchón o Lirio de agua)



Lemna Minor (Lenteja acuática o Lenteja de
agua)

Figura 13. Plantas acuáticas flotantes.

Algunos de estas plantas se han utilizado en el tratamiento de aguas contaminadas aprovechando su capacidad para sobrevivir, crecer y reproducirse en condiciones adversas generadas por la contaminación y al mismo tiempo incorporar o favorecer la eliminación de contaminantes.

Sin embargo, el uso de estos vegetales entraña problemas relacionados a aclimatación y adaptación a condiciones artificiales y también a la posibilidad de uso de especies extrañas a los lugares en donde se requiere el tratamiento de aguas, esto puede resultar en un riesgo para los ecosistemas locales, ya que por lo general

se usan especies de un alto potencial biótico y mecanismos eficientes de dispersión que pueden favorecer el desplazamiento de especies nativas (Arguello *et al.*, 1999).

Una de las opciones para evitar estos riesgos es utilizar especies nativas y mediante un proceso de aclimatación y selección de colonias o grupos más adecuados, optimizar los procesos de tratamiento de aguas así como mejorar la calidad y cantidad de subproductos.

De acuerdo a Soriano (2009) las plantas utilizadas frecuentemente en los humedales construidos son plantas emergentes, principalmente el carrizo (*Phragmites australis*), el junco (*Typha latifolia*) o junco de laguna (*Scirpus lacustris*).

Las plantas emergentes contribuyen al tratamiento del agua residual y esorrentía de varias maneras (Lara, 1999):

- Estabilizan el substrato y limitan la canalización del flujo.
- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen.
- Toman el carbono, nutrientes y elementos de traza y los incorporan a los tejidos de la planta.
- Transfieren gases entre y los sedimentos.
- El escape de oxígeno desde las estructura subsuperficial de las plantas, oxigenan otros espacios dentro del substrato.
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos.
- Cuando se mueren y se deterioran dan lugar a restos de vegetación.

En Europa es preferible el carrizo porque es una planta que crece rápidamente, es fuerte y no es fuente de alimento para los animales o pájaros como otras especies. Los juncos de laguna y las espadañas o una combinación de estas dos especies, son las dominantes en la mayoría de los humedales construidos en los Estados Unidos (Cuadro 4) (Lara, 1999). En Marruecos y una comunidad en Brasil ha sido

desarrollado con mucho éxito el jacinto de agua (Roquette *et al.*; Mandi, 1998; citado por Silva y Zamora, 2005).

Estudios realizados por Francia *et al.* (2000); Quipuzco, (2002); Trinidad, (2006); Rodríguez-Monroy y Duran-de-Bazua, (2006) y Romero *et al.* (2009) han determinado que las plantas emergentes con mejores resultados en el tratamiento de aguas residuales, son principalmente los carrizos (*Phragmites australis*) y espadañas (*Typha sp.*). De acuerdo a estos estudios se considera una mejor opción si estas se utilizan de manera conjunta ya que se obtienen resultados aun mejores a las que se obtienen de manera separada, aunque cabe destacar que influye en el tiempo de residencia del agua residual en el sistema. Otras especies que de igual manera demostraron tener buenos resultados en el tratamiento de aguas residuales, fueron *Canna spp*, *Arundo donax* y *Heliconia psittacorum*.

También se han obtenido resultados favorables en plantas sumergidas, según estudios realizados por Arguello *et al.* (1999) y Zetina *et al.* (1999) en especies como *Ergia densa*, del genero *Chara*, *Utricularia gibba*, y algas filamentosas. Estas inducen cambios en las condiciones físicas y químicas del agua, afectando de manera considerable la concentración de oxígeno disuelto y una elevación del pH, lo cual brinda una mejora en la calidad del agua por la oxidación de la materia orgánica y eliminación de microorganismos potencialmente patógenos.

Algunas especies de plantas acuáticas flotantes (*Salvinia herzogii*, *Pistia stratiotes* y *Eichhornia crassipes*) son también consideradas de gran importancia en los sistemas de humedales artificiales ya que han demostrado tener buenos rendimientos, principalmente en la absorción de metales pesados (Paris *et al.*, 2005).

En la construcción de los dos tipos de humedales, es de vital importancia establecer la vegetación con la densidad apropiada. Si están disponibles, deben ser preferidas las plantas locales que estén adaptados a las condiciones del sitio.

Aunque la siembra se puede hacer a partir de semillas, este método requiere bastante tiempo y un control estricto del agua. Adicionalmente, presenta el problema

del posible consumo de la semilla por parte de los pájaros, por lo que lo más aconsejable es plantar mediante trasplante de rizomas al lecho previamente preparado.

Cuadro 4. Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales (Lara, 1999).

| Familia | Nombre latino | Nombres comunes | Temperatura, °C | | Máx. salinidad | Rango PH |
|------------|--|-------------------------------|-----------------|---------------------------|----------------|----------|
| | | | Deseable | Germinación de la semilla | | |
| Ciperáceas | <i>Carex sp.</i> | - | 14-32 | | | 5-7.5 |
| | <i>Elocharis sp.</i> | - | | | | |
| Gramíneas | <i>Scirpus lacustris L.</i> (*) | Junco de laguna | 18-27 | | 20 | 4-9 |
| | <i>Glyceria fluitans (L.) R. Br.</i> | Hierba del mana | | | | |
| | <i>Phragmites australis (cav) Trin. Ex Steudel (*)</i> | Carrizo | 12-23 | 10-30 | 45 | 2-8 |
| Iridáceas | <i>Iris pseudacorus L.</i> | Lirio amarillo, espadaña fina | | | | |
| Juncáceas | <i>Juncus sp.</i> | Juncos | 16-26 | | 20 | 5-7.5 |
| Tifáceas | <i>Thypha sp. (*)</i> | Eneas, aneas, espadaña | 10-30 | 12-24 | 30 | 4-10 |

(*) Especies más utilizadas.

2.5. Microorganismos

Los principales microorganismos presentes en la biopelícula de los humedales son: bacterias, levaduras, hongos y protozoarios. Son los encargados de realizar el tratamiento mediante procesos biológicos, principalmente la digestión aeróbica (presencia de oxígeno) digestión anaeróbica (ausencia de oxígeno), nitrificación, desnitrificación y rizosteras de plantas. Aún que muchas especies bacterianas son

facultativas, es decir, son capaces de funcionar bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas.

De acuerdo a Lara (1999) la actividad microbiana consiste principalmente en:

- Transformar un gran número de sustancias orgánicas e inorgánicas en sustancias inocuas o insolubles.
- Alterar las condiciones de potencial redox del substrato y así afecta la capacidad del proceso del humedal.
- Está involucrada en el reciclaje de nutrientes.

Los principales procesos que llevan a cabo los microorganismos son la degradación de materia orgánica, la eliminación de nutrientes y elementos traza y la desinfección (Arias, 2004; citado por Delgadillo *et al.*, 2010).

Los procesos de tratamiento son llevados a cabo por microorganismos del genero *Nitrosomas*, *Nitrosolobus*, *Nitrobacter*, *Nitrosococcus*, *alcaligenes*, *Paracoccus*, *Pseudonomas* y *Thiosphaera*, por mencionar algunos (Cervantes *et al.*, 2000).

Las poblaciones microbianas pueden ajustarse a los cambios en el agua, como pueden extenderse rápidamente cuando se tiene suficiente energía o inactivarse cuando las condiciones ambientales no son convenientes. Las poblaciones pueden verse seriamente afectadas por la presencia de sustancias tóxicas, como pesticidas y metales pesados, por lo que se debe tener cuidado de no introducir en las cadenas tróficas en concentraciones que sean perjudiciales.

III. DISEÑO DE HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL (HFSSh)

La creciente aplicación de los humedales para el tratamiento de aguas residuales, junto con los estándares de calidad del agua cada vez más estrictas, ha sido un incentivo para el desarrollo de mejores herramientas de diseño. Este trabajo,

describe algunos modelos de diseño más utilizados para humedales construidos de tipo (HFSSh).

La atención se centra en las variables de calidad estándar del agua, tales como la Demanda Química del Oxígeno (DQO), la Demanda Bioquímica del Oxígeno (DBO_5), Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno (N) y Fósforo (P). Todos los modelos han sido probados en un estudio de casos, estos estudios se basan en un conjunto de datos existentes que contienen las concentraciones de los flujos de entrada y salida del agua (Rousseau *et al.*, 2004).

Los modelos empiezan con reglas de diseño y ecuaciones de regresión. Existen también la ya conocida como modelo de primer orden $K - C^*$ (K es la constante de cinética de primer orden y C^* es la concentración de fondo) (Kadlec y Knight, 1996; Kadlec, 1997) y son tratados varios de sus extensiones. Existen modelos que no son descritos en este trabajo, ya que no son comúnmente utilizados, pero que de igual manera contribuyen a la diseño de humedales construidos.

3.1. Reglas de Diseño

La reglas se basan en observaciones de una amplia gama de sistemas, condiciones climáticas y el tipo de aguas residuales, algunas de estas reglas para humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HFSSh) descrito por varios autores en

las cuales se consideran varios parámetros que incluyen: tiempos de retención hidráulica, profundidad y geometría del humedal (ancho y longitud), así también la concentración de DBO₅, sólidos suspendidos, Nitrógeno y Fósforo.

Estas reglas son consideradas las más rápidas, pero también son los métodos de diseño más difíciles, ya que muestran grandes variaciones, es por ello que se recomienda utilizarse solamente para comprobar el diseño (Rousseau *et al.*, 2004).

En los Cuadros 5, 6 y 7 se muestran los parámetros a considerar para el diseño de humedales construidos basados en las experiencias de diferentes autores.

Parámetros descritos por Wood (1995) y Kadlec y Knigth (1996) para la construcción de humedales de flujo subsuperficial horizontal.

Cuadro 5. Regla general de criterios de diseño para humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal (HFSSh) (Rousseau *et al.*, 2004).

| Criterio | Valor de rango | |
|---|----------------|-----------------|
| | Wood | Kadlec y Knight |
| Tiempo de retención hidráulico (Días) | 2-7 | 2-4 |
| Tasa Máxima de carga DBO (Kg DBO ha ⁻¹ día ⁻¹) | 75 | No se da |
| Tasa de carga hidráulica (cm/día ⁻¹) | 0.2 – 3.0 | 8-30 |
| Área requerida (ha/m ³ /día) | 0.001-0.007 | No se da |

De acuerdo a estudios realizados por Hammer y Bastian (1989); Crites y Tchobanoglous (1998); US EPA (1999) y Crites *et al.* (2006) describen los siguientes parámetros comúnmente utilizados para el diseño de HFSSh.

Cuadro 6. Parámetros comúnmente utilizados para la construcción de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal.

| Parámetro | Rango | Valor típico |
|---|--|---------------------|
| Tasa de carga hidráulica | 0.02 – 0.24 m ³ /m ² /día 0.08 – 62 cm/día 100 – 1,000 m/día | 4.7 cm/día |
| Tiempo de retención hidráulico | 4 – 20 días | 6 – 8 días |
| Cantidad de flujo | --- | 0.34 l/s |
| Velocidad del flujo | < 8.6 m/día | --- |
| Profundidad de grava | 0.3 – 0.6 m (más profundo a la salida) | 0.5 – 0.6 m |
| Profundidad de agua | 0.15 – 1m (del fondo) | 0.4 – 0.6 m |
| Profundidad de la zona de raíces | 0.3 – 1 m (abajo de la superficie) | 0.6 m |
| Tamaño de grava (diámetro): | 40 – 100 mm | 40 – 80 mm |
| Entrada | 40 – 100 mm | 40 – 80 mm |
| Salida | 5 – 20 mm | 5 – 20 mm |
| Superficie (el más alto 25% o < 0.1 m del superficie) | 10 – 60 mm | 20 – 30 mm |
| Otro (el más bajo 75%) | | |
| Porosidad de grava | 0.18 – 0.35 | --- |
| Cuesta de cama | 0.5 – 2% | 0.5 – 1% |
| Cuesta de la superficie de grava | 0% | 0% |
| Cuesta de berms | 2:1 – 3:1 (exterior) ≥ 3:1 (interior) | 3:1 |
| Anchura | < 61 m | --- |
| Longitud | > 15 m | --- |
| Longitud: anchura del radio | < 4:1 | 1:1 – 1:2 |
| Longitud de zona de entrada | --- | 2 m |
| Longitud de zona de salida | --- | 1 m |

Arias y Brix (2003) describen algunos valores típicos que se utilizan como parámetros para el diseño de humedales construidos de acuerdo al tipo de flujo.

Cuadro 7. Parámetros típicos de diseño para humedales construidos para tratamiento de aguas residuales domésticas (Arias y Brix, 2003).

| Tipo de flujo | Horizontal | Superficial | Vertical |
|--------------------------------|--|--|--|
| Carga orgánica afluyente | < 112 DBO ₅ kg ha ⁻¹ día ⁻¹ | < 150 DBO ₅ kg ha ⁻¹ día ⁻¹ | < 112 DBO ₅ kg ha ⁻¹ día ⁻¹ |
| Tasa de carga hidráulica | < 5 cm día ⁻¹ | < 5 cm día ⁻¹ | < 5 cm día ⁻¹ |
| Tiempo de retención hidráulica | 5 – 15 días | > 5 días | 1 – 2 días |
| Área específica | De 5 m ² a 20 m ² | De 5 m ² a 20 m ² | De 1 m ² a 5 m ² |
| Relación largo/ancho | 10:01 | 03:01 | NA |
| Profundidad | < 0.60 cm | < 0.60 cm | > 1.0 m |
| Pendiente del fondo | < 0.1% | < 0.1% | NA |
| Tipo de relleno | NA | Arenas y gravas | Arenas y gravas |
| Vegetación | Variable | Variable | Variable |

Estos valores descritos anteriormente no son estrictamente obligatorios, pero brindan información típica de las condiciones normales de diseño (Arias y Brix, 2003).

Cuando se seleccione el tipo de humedal por diseñar, Cooper (1998) afirma que hay diferencia en el rendimiento entre las diferentes opciones de humedales construidos. Además, que los humedales con flujo horizontal son eficientes para eliminación de sólidos en suspensión y bacterias, reducción de DBO₅; son aceptables para desnitrificar, mientras que su capacidad de nitrificar es pobre (baja disponibilidad de oxígeno dentro de los lechos). Además afirma que los humedales con flujo vertical tiene buena capacidad para nitrificar, lo cual redundará en una buena capacidad para eliminar DBO₅ y DQO, mientras, que su capacidad para retener sólidos es menor y son susceptibles de colmatarse, si no se selecciona los medios filtrantes adecuados.

3.2. Ecuaciones de Regresión

Tomando en cuenta que la mayoría de las investigaciones sobre los humedales construidos se han concentrado principalmente en los datos de entrada y salida del

sistema, en lugar de los datos de los procesos internos, las ecuaciones de regresión parecen ser una herramienta útil en la interpretación y aplicación de estos datos de entrada y salida. Sin embargo estos modelos engloban a los humedales construidos en solo dos o tres parámetros, por lo que factores importantes como el clima, material y diseño del lecho (longitud, anchura, profundidad), no son considerados, esto conduce a una gran variedad de ecuaciones de regresión y por lo tanto una gran incertidumbre en el diseño.

Una visión general de dichas ecuaciones de regresión para DBO₅, DQO, SST, NT y PT, se presentan en el Cuadro 8, que fueron generados por diferentes autores. Las primeras dos columnas mencionan las referencias y una descripción corta del sistema, la tercer columna muestra el estado de la ecuación de regresión, las siguientes tres columnas dan los rangos de concentración tanto en la entrada como en la salida del sistema, y la tasa de carga hidráulica para los que la ecuación es válida. La última columna indica el coeficiente de determinación (Rousseau *et al.*, 2004).

Como se muestra en la tabla, la mayoría de estas ecuaciones de regresión se basan en la concentración de las aguas residuales. Tomando como ejemplo la ecuación de Brix (1994) para la concentración de DBO₅, implica, la concentración de DBO₅ en la entrada, prevé la concentración en la salida para una tasa de carga hidráulica de 0.8 hasta 22 cm.día⁻¹.

Solo un número limitado de ecuaciones de regresión se basa tanto en la concentración de la entrada como en la tasa de carga hidráulica, como insumos para predecir la concentración en la salida del sistema. Por lo tanto, solo las ecuaciones de regresión pueden utilizarse para predecir la máxima tasa de carga hidráulica, basado en una determinada concentración en la entrada del sistema y un determinado estándar en la salida del sistema.

Cuadro 8. Ecuaciones de regresión para humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal de acuerdo a diferentes autores, q en $cm.dia^{-1}$ (Rousseau *et al.*, 2004).

| Referencia | Sistema | Ecuación | Rango de entrada | Rango de salida | q rango | R ² |
|----------------------------|---------------------------------|---|------------------------|-------------------------|------------------|----------------|
| BOD^a | | | | | | |
| Brix [4] | Danish and UK soil-based SSF | $C_{out} = (0.11 * C_{in}) + 1.87$ | $1 < C_{in} < 330$ | $1 < C_{out} < 50$ | $0.8 < q < 22$ | 0.74 |
| Knigth <i>et al.</i> [29] | US gravel beds (NADB) | $C_{out} = (0.33 * C_{in}) + 1.4$ | $1 < C_{in} < 57$ | $1 < C_{out} < 36$ | $1.9 < q < 11.4$ | 0.48 |
| Griffin <i>et al.</i> [23] | US unplanted rock-filter | $C_{out} = 502.20 * \exp(-0.111 * T)$ | $10 < T < 30$ | n.g. | n.g. | 0.69 |
| Vymazal[51] | SSF in Czech Republic | $C_{out} = (0.099 * C_{in}) + 3.24$ | $5.8 < C_{in} < 328$ | $1.3 < C_{out} < 51$ | $0.6 < q < 14.2$ | 0.33 |
| Reed-Brown[38] | 14 US SSF | $L_{removed} = (0.653 * L_{in}) + 0.292$ | $4 < L_{in} < 145$ | $4 < L_{removed} < 88$ | n.g. | 0.97 |
| Vymazal[52] | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.145 * L_{in}) - 0.06$ | $6 < L_{in} < 76$ | $0.3 < L_{out} < 11$ | n.g. | 0.85 |
| Vymazal[51] | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.13 * L_{in}) + 0.27$ | $2.6 < L_{in} < 99.6$ | $0.32 < L_{out} < 21.7$ | $0.6 < q < 14.2$ | 0.57 |
| COD^b | | | | | | |
| Vymazal [52] | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.17 * L_{in}) + 5.78$ | $15 < L_{in} < 180$ | $3 < L_{out} < 41$ | n.g. | 0.73 |
| TSS^c | | | | | | |
| Reed and Brown[38] | 14 US SSF | $C_{out} = C_{in} * (0.1058 + 0.0011 * q)$ | $22 < C_{in} < 118$ | $3 < C_{out} < 23$ | n.g. | n.g. |
| Knigth <i>et al.</i> [29] | Soil-based SSF (NADB) | $C_{out} = (0.09 * C_{in}) + 4.7$ | $0 < C_{in} < 330$ | $0 < C_{out} < 60$ | $0.8 < q < 22$ | 0.67 |
| Knigth <i>et al.</i> [29] | SSF (NADB) | $C_{out} = (0.063 * C_{in}) + 7.8$ | $0.1 < C_{in} < 253$ | $0.1 < C_{out} < 160$ | $1.9 < q < 44.2$ | 0.09 |
| Vymazal[51] | SSF in Czech Republic | $C_{out} = (0.021 * C_{in}) + 9.17$ | $13 < C_{in} < 179$ | $1.7 < C_{out} < 30$ | $0.6 < q < 14.2$ | 0.02 |
| Kadlec <i>et al.</i> [26]. | NADB, Severn Trent | $C_{out} = 0.76 * C_{in}^{0.706}$ | $8 < C_{in} < 595$ | $2 < C_{out} < 58$ | n.g. | 0.55 |
| Brix[4] | Danish soil-based SSF | $C_{out} = (0.09 * C_{in}) + 4.7$ | $0 < C_{in} < 330$ | $0 < C_{out} < 60$ | n.g. | 0.67 |
| Vymazal[52] | SSF in Czech Republic | $C_{out} = (0.048 * L_{in}) + 1.76$ | $3 < L_{in} < 78$ | $0.9 < L_{out} < 6.3$ | n.g. | 0.42 |
| Vymazal[51] | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.083 * L_{in}) + 1.18$ | $3.7 < L_{in} < 123$ | $0.45 < L_{out} < 15.4$ | $0.6 < q < 14.2$ | 0.64 |
| TN^d | | | | | | |
| KadlecKnigth[28] | NADB+others | $C_{out} = 2.6 + (0.46 * C_{in}) + (0.124 * q)$ | $5.1 < C_{in} < 58.6$ | $2.3 < C_{out} < 37.5$ | $0.7 < q < 48.5$ | 0.45 |
| Kadlec <i>et al.</i> [26]. | Danish soil-based SSF | $C_{out} = (0.52 * C_{in}) + 3.1$ | $4 < C_{in} < 142$ | $5 < C_{out} < 69$ | $0.8 < q < 22$ | 0.63 |
| Vymazal[51] | SSF in Czech Republic | $C_{out} = (0.42 * C_{in}) + 7.68$ | $16.4 < C_{in} < 93$ | $10.7 < C_{out} < 49$ | $1.7 < q < 14.2$ | 0.72 |
| Vymazal[52] | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.67 * L_{in}) - 18.75$ | $300 < L_{in} < 2400$ | $200 < L_{out} < 1550$ | n.g. | 0.96 |
| Vymazal[51] | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.68 * L_{in}) + 0.27$ | $145 < L_{in} < 1894$ | $134 < L_{out} < 1330$ | $1.7 < q < 14.2$ | 0.96 |
| TP^e | | | | | | |
| KadlecKnigth[28] | US, European and Australian SSF | $C_{out} = 0.51 * C_{in}^{1.1}$ | $0.5 < C_{in} < 20$ | $0.1 < C_{out} < 15$ | n.g. | 0.64 |
| KadlecKnigth[28] | US SSF | $C_{out} = 0.23 * (q^{0.6} * C_{in}^{0.76})$ | $2.3 < C_{in} < 7.3$ | $0.1 < C_{out} < 6$ | $2.2 < q < 44$ | 0.60 |
| Brix[4] | Danish soil-based SSF | $C_{out} = (0.65 * C_{in}) + 0.71$ | $0.5 < C_{in} < 19$ | $0.1 < C_{out} < 14$ | $0.8 < q < 22$ | 0.75 |
| Vymazal[51] | SSF in Czech Republic | $C_{out} = (0.26 * C_{in}) + 1.52$ | $0.77 < C_{in} < 14.3$ | $0.4 < C_{out} < 8.4$ | $1.7 < q < 14.2$ | 0.23 |
| Vymazal[52] | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.58 * L_{in}) - 4.09$ | $25 < L_{in} < 320$ | $20 < L_{out} < 200$ | n.g. | 0.61 |
| Vymazal[51] | SSF in Czech Republic | $L_{out} = (0.67 * L_{in}) - 9.03$ | $28 < L_{in} < 307$ | $11.4 < L_{out} < 175$ | $1.7 < q < 14.2$ | 0.58 |

n.g.: not given

NADB: North American Treatment Database

^a C_{in} and C_{out} : influent and effluent concentrations (mg BOD L⁻¹); L_{in} and L_{out} : influent and effluent loads (kg BOD ha⁻¹ day⁻¹); $L_{removed}$: load removed (kg BOD ha⁻¹ day⁻¹).

^b C_{in} and C_{out} : influent and effluent loads (kg COD ha⁻¹ day⁻¹).

^c C_{in} and C_{out} : influent and effluent concentrations (mg TSS L⁻¹); L_{in} and L_{out} : influent and effluent loads (kg TSS ha⁻¹ day⁻¹).

^d C_{in} and C_{out} : influent and effluent concentrations (mg TN L⁻¹); L_{in} and L_{out} : influent and effluent loads (g N m⁻² year⁻¹).

^e C_{in} and C_{out} : influent and effluent concentrations (mg TP L⁻¹); L_{in} and L_{out} : influent and effluent loads (g P m⁻² year⁻¹).

3.3. Modelos de Primer Orden

En la actualidad, los modelos más empleados para el dimensionamiento de los humedales artificiales, tanto de flujo superficial como subsuperficial, parten de la base de considerarlos como reactores de flujo pistón, que siguen cinéticas de primer orden para la eliminación de los distintos contaminantes.

El dimensionamiento de humedales de flujo horizontal se realiza en dos etapas: en la primera se determina la superficie necesaria de tratamiento (dimensionamiento biológico) y en la segunda se establecen las dimensiones geométricas del sistema (dimensionamiento hidráulico) (García y Corzo, 2008).

3.3.1. Dimensionamiento biológico

Para la obtención de las ecuaciones de diseño se supone que los humedales se comportan como reactores de flujo ideal en pistón en los cuales los contaminantes se degradan siguiendo modelos cinéticos de primer orden (Brix, 1994). Por tanto, el balance de masa para un contaminante es simplemente:

$$\frac{dC}{dt} = -K_V C \quad (1)$$

Donde:

C : La concentración del contaminante, ml/l

K_V : La constante de cinética de primer orden, en días⁻¹. El signo negativo en la expresión indica que la concentración de contaminante disminuye a lo largo del tiempo.

Si se integra esta ecuación entre la concentración inicial de contaminante o afluente (C_0 para $t = 0$) y la final o efluente (C_1 para $t = t$ siendo este último el tiempo medio de retención hidráulico, en días) se obtiene:

$$\frac{C_1}{C_0} = \exp(-K_V t) \quad (2)$$

El tiempo medio de retención hidráulico es:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{\varepsilon x S x h}{Q} \quad (3)$$

Donde:

V : Volumen del humedal, en m^3 .

Q : Caudal del medio, $m^3 \cdot día^{-1}$.

ε : Porosidad, en tanto por uno.

S : Superficie del humedal, en m^2 .

h : Profundidad media del humedal, en m.

Sustituyendo t en las dos ecuaciones anteriores y definiendo una nueva constante cinética de primer orden (K_A , en $m \cdot d^{-1}$):

$$K_A = K_V x \varepsilon x h \quad (4)$$

$$\frac{C_1}{C_0} = \exp\left(-\frac{K_A S}{Q}\right) \quad (5)$$

Despejando S :

$$S = \frac{Q}{K_A} \ln \left[\frac{C_0}{C_1} \right] \quad (6)$$

Esta es la ecuación de diseño recomendada para dimensionar la superficie de humedales de flujo horizontal. Los valores de Q y C_0 se determinan a partir de los estudios de caracterización del afluente y el de C_1 se define a partir de los límites de vertido o los objetivos de calidad establecidos por la normativa ambiental vigente.

El valor de K_A lógicamente variará según el contaminante. Para eliminar la DBO es adecuado un valor de $0,08 \text{ m.día}^{-1}$ (García *et al.*, 2004). Además, si el sistema se dimensiona para eliminar DBO, a la vez también se va a reducir la materia en suspensión de forma suficiente, ya que estos sistemas son más eficaces para eliminar la materia en suspensión que la DBO. Por otra parte, este mismo dimensionamiento va a permitir reducir el nitrógeno en aproximadamente un 30-60 por ciento, si el sistema se diseña con una profundidad media de la lámina de agua de $0,3 \text{ m}$. Para estimar qué concentración de nitrógeno total va a haber en el efluente de un sistema diseñado para eliminar DBO se puede usar la ecuación (5) con un valor de K_A de $0,025 \text{ m.día}^{-1}$. Alternativamente también se puede dimensionar el sistema para eliminar nitrógeno utilizando el valor de K_A de $0,025 \text{ m.día}^{-1}$ y la expresión (6).

Los anteriores valores de K_A son válidos para aguas residuales que llegan al humedal (después de los tratamientos previos) con carga media o baja (DBO₅ menor a 250 mg.L^{-1}). Para cargas más elevadas es conveniente reducir el valor de K_A en un 20 por ciento.

Para llevar a cabo un buen dimensionamiento es importante plantearse diferentes escenarios en cuanto a caudales y concentraciones, y observar si para la superficie

de diseño determinada con la ecuación (6) se cumplen los valores límites de vertido establecidos. En general se acepta que la superficie de diseño es correcta cuando un 95 por ciento de las concentraciones de contaminante de los efluentes se encuentran por debajo del límite de vertido.

Una vez determinada la superficie de tratamiento se realiza una verificación final consistente en comprobar que la carga orgánica superficial sea menor de 6 g DBO m⁻².d⁻¹. En el caso que el valor obtenido sea superior a éste, se deberá incrementar la superficie necesaria para cumplir este criterio.

Una característica notable de los humedales construidos de flujo subsuperficial es su poca sensibilidad a los cambios de temperatura para eliminar DBO₅. Numerosos estudios han demostrado que la eficiencia de eliminación de la DBO₅ de los humedales no mejora en verano ni empeora en invierno de forma significativa (Kadlec y Knigh, 1996). No obstante, de forma práctica, si el humedal de flujo horizontal se dimensiona para eliminar nitrógeno se debe tener en cuenta que la eficiencia en invierno puede reducirse en un 30 por ciento (la temperatura sí afecta a la eliminación de nitrógeno).

En los humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal que actúan como tratamiento secundario la concentración de fondo de los contaminantes (aquella generada por el propio sistema) puede considerarse despreciable frente a los niveles de los contaminantes presentes en el agua afluente. Sin embargo, cuando el humedal forma parte de un tratamiento de afine (por ejemplo de una planta de fangos activados o de un sistema vertical) es conveniente tener en cuenta la concentración de fondo, y en ese caso, la ecuación (6) se modifica de la siguiente manera (Kadlec y Knigh, 1996):

$$S = \frac{Q}{K_A} \ln \left[\frac{C_0 - C^*}{C_1 - C^*} \right] \quad (7)$$

Donde:

C^* : La concentración de fondo, en las unidades que corresponda según el contaminante.

Para calcular la concentración de fondo se dispone de las siguientes expresiones:

$$\text{Para la DBO}_5 \quad C^* = 3.5 + 0.053C_0, \quad 0 < C_0 < 200 \text{mg/L} \quad (8)$$

$$\text{Para MES} \quad C^* = 7.8 + 0.063C_0 \quad (9)$$

Para nitrógeno total: $C^* = 1.5 \text{mg/L}$

Para el fosforo total: $C^* = 0.02 \text{mg/L}$

El corto circuito y las zonas muertas son fenómenos comunes en el tratamiento de humedales construidos causando condiciones no ideales para el flujo pistón, poniendo así en peligro el uso del modelo de primer orden. En la Cuadro 9 se presenta una visión general de las constantes de velocidad (K_A y K_V) de primer orden para humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal, propuesto por varios autores (Rousseau *et al.*, 2004).

Cuadro 9. Constante de velocidad de primer orden para humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal de acuerdo a diferentes autores (Rousseau *et al.*, 2004).

| Referencia | No. cama | K_A (m día ⁻¹) | K_V (día ⁻¹) | Observaciones |
|-------------------------|----------|------------------------------------|----------------------------|---|
| BOD | | | | |
| Crites [13] | | | 0.8 – 1.1 | 0.8 = sand; 1.1 gravel (T°C) |
| Reed & Brown[38] | | | 1.104 | K_{20} whit $\theta = 1.06$ |
| Tanner et al. [45] | 8 | | 0.17 | K_T - gravel beds |
| Tanner et al. [45] | 8 | | 0.22 | K_{20} whit $\theta = 1.06$ gravel beds |
| Wood[54] | | | 1.84 | =0.42 medium sand (20 °C) |
| Wood[54] | | | 1.35 | =0.39 coarse sand (20 °C) |
| Wood[54] | | | 0.86 | =0.35 medium sand (20 °C) |
| Kadlec & Knight[28] | | 0.085 – 1 | 0.3 – 6.11 | |
| Kadlec [27] | | 0.49 | | $C^* > 3\text{mg L}^{-1}$ and $\theta = 1.00$ (20 °C) |
| Vymazal et al. [50] | | 0.19 | | Proposed by Kickuth |
| Brix [5] | | 0.118 ± 0.022 | | Mean ± 95% limits – depends on load |
| Schierup et al [42] | 49 | 0.083 | | Danish systems |
| Cooper [10] | | 0.067 – 0.1 | | UK systems |
| Brix [4] | 70 | 0.16 | | $C^* = 3.0\text{ mg L}^{-1}$ soil based |
| Brix [4] | 70 | 0.068 | | $C^* = 0\text{ mg L}^{-1}$ soil based |
| Kadlec et al. [26] | | 0.133 | | Czech republic wetlands |
| Kadlec et al. [26] | 1 | 0.07–0.097–0.13–0.18– 0.31–0.17 | | 6 consecutive years, Czech republic wetlands |
| Cooper et al. [11] | | 0.06 | | $C^* = 0\text{ mg L}^{-1}$ secondary wetlands |
| Cooper et al. [11] | | 0.31 | | $C^* = 0\text{ mg L}^{-1}$ tertiary wetlands |
| Kadlec et al. [26] | 14 | 0.17 | | $C^* = 0\text{ mg L}^{-1}$ tertiary wetlands USA |
| Liu et al. [31] | | | 0.86 | Gravel beds – soluble cBOD, 20 °C |
| TSS | | | | |
| Kadlec & Knight[28] | | 2.74 | | K_{20} whit $\theta = 1$ and $C^* > 7\text{ mg L}^{-1}$ |
| Kadlec [27] | | 8.22 | | K_{20} whit $\theta = 1$ and $C^* > 7\text{ mg L}^{-1}$ |
| Kadlec et al. [26] | | 23.1 | | Laboratory columns |
| Kadlec et al. [26] | | 31.6 | | Large scale pilot wetland |
| Kadlec et al. [26] | 33 | 0.119 | | Data from Czech republic |
| TN | | | | |
| Tanner et al. [46] | | | 0.16 | K_T - gravel beds |
| Kadlec & Knight[28] | | 0.074 | | K_{20} whit $\theta = 1.05$ and $C^* = 1.5\text{ mg L}^{-1}$ |
| Kadlec & Knight[28] | | 0.007 – 0.1 | | K_T whit $C^* = 1.5\text{ mg L}^{-1}$ |
| Wittgren & Maehlum [53] | 73 | | 0.06 | K_T - Norway |
| Kadlec et al. [26] | | 0.028 | | Czech systems |
| TP | | | | |
| Tanner et al. [46] | | | 0.14 | K_T - gravel beds |
| Kadlec & Knight[28] | | 0.033 | | K_{20} whit $\theta = 1.00$ and $C^* = 0.02\text{ mg L}^{-1}$ |
| Wittgren & Maehlum [53] | 71 | | 0.28 | K_T - Norway |

3.3.2. Dimensionamiento hidráulico

El dimensionamiento hidráulico sirve para determinar las dimensiones del sistema (anchura y longitud) una vez conocida su superficie. El dimensionamiento hidráulico se realiza aplicando la Ley de Darcy, que describe el régimen del flujo en un medio poroso, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = K_S * A_S * S \quad (10)$$

Donde:

Q : Caudal, $m^3 d^{-1}$.

K_S : La conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo, en $m^3.m^{-2}.d^{-1}$.

A_S : es la sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo, en m^2 .

S : es el gradiente hidráulico o pendiente (dh/dL), en m/m .

Como caudal se recomienda tomar el máximo diario para asegurarse de que el sistema absorberá bien las puntas de caudal. No se deben utilizar caudales puntas horarios ya que originan sistemas excesivamente anchos y poco largos.

La conductividad hidráulica varía en función de la cantidad y del tamaño de los huecos del medio granular utilizado. En el Cuadro 10 se muestran órdenes de magnitud estimados de la conductividad hidráulica (K_S) para algunos materiales granulares limpios que podrían utilizarse como substrato en estos sistemas. La conductividad hidráulica con el paso del tiempo se va reduciendo por retención de sólidos y crecimiento del biofilm, especialmente en la zona de entrada. Es por ello que se recomienda adoptar un factor de seguridad para K_S de 7 como mínimo.

Cuadro 10. Órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica (K_S) en función del tipo de material granular utilizado como sustrato en el humedal construido de flujo subsuperficial (Reed y Brown, 1995).

| Tipo de sustrato | Tamaño efectivo D_{10} (mm) | Porosidad (%) | Conductividad hidráulica K_S ($m^3 \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$) |
|------------------|----------------------------------|------------------|--|
| Arenas graduadas | 2 | 28-32 | 100-1000 |
| Arenas gravosas | 8 | 30-35 | 500-5000 |
| Gravas finas | 16 | 35-38 | 1000-10 000 |
| Gravas medianas | 32 | 36-40 | 10 000-50 000 |
| Rocas pequeñas | 128 | 38-45 | 50 000-250 000 |

Los valores de la pendiente (S) que se suelen utilizar varían en el rango de 0,01 a 0,02 m/m (Cooper *et al.*, 1996). Es conveniente que la pendiente no sea superior a 0,02 m/m para evitar que los costes de excavación sean elevados. No obstante, esto se debe evaluar en cada proyecto en particular, ya que dependiendo de la longitud del sistema quizá una pendiente algo mayor no aumenta excesivamente estos costes.

Las dimensiones del humedal se determinan entonces:

$$A_S = \frac{Q_{med,d}}{K_S * S} \quad (11)$$

Donde:

$Q_{med,d}$: Caudal medio diario, $m^3 \cdot día^{-1}$.

Calcular el área de la sección transversal, y una vez fijada la profundidad (h), se determina el ancho del humedal:

$$W = \frac{A_s}{h} \quad (12)$$

Donde:

W: ancho, en m.

h: profundidad, m.

Conocido el ancho y teniendo en cuenta la superficie determinada con el dimensionamiento biológico se determina la longitud del sistema:

$$L = \frac{S}{W} \quad (13)$$

Donde:

L: longitud, en m.

Por último se debe verificar que la relación largo-ancho sea como mínimo 1:1. En caso de que no se cumpla esta condición, es decir, que el largo sea mayor que el ancho (que es lo que suele suceder en la mayoría de los casos), se debe dividir la superficie total en diferentes celdas que funcionarán en paralelo, que sí cumplan este criterio.

IV. PROCESOS DE REMOCIÓN EN HUMEDALES ARTIFICIALES

En el humedal artificial se llevan a cabo diferentes mecanismos de remoción de contaminantes del agua residual. En el Cuadro 11, Arias y Brix (2003) presentan un resumen de los principales procesos y mecanismos que ocurren en los humedales construidos.

Cuadro 11. Procesos que contribuyen a la depuración de las aguas residuales en SPA¹: sistema de plantas acuáticas, HFS²: humedales de flujo superficial, HFSS³: humedales de flujo subsuperficial, y HFV⁴: humedales con flujo vertical (Arias y Brix, 2003).

| Contaminante | SPA ¹ | HFS ² | HFSS ³ | HFV ⁴ |
|----------------------------------|--|---|--|---|
| Materia orgánica | Conversión biológica por intervención de las bacterias aerobias, facultativas y anaerobias adheridas a las superficies de las plantas y de los detritos. | Reducción de DBO solubles por conversión biológica por efectos de bacterias aerobias, facultativas y anaerobias que crecen en las superficies de las plantas y sobre los detritos. La DBO particulada se elimina por adsorción, por filtración y por sedimentación. | Reducción por conversión biológica por intervención de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a las superficies de las plantas y los detritos del medio del relleno del humedal. | Reducción por conversión biológica por medio de bacterias facultativas y anaeróbicas adheridas a la superficie de las plantas y detritos. |
| Materia en suspensión | Sedimentación | Filtración y sedimentación. | Filtración y sedimentación. | Filtración |
| Nitrógeno | Proceso de nitrificación/desnitrificación. | Procesos de nitrificación/desnitrificación, asimilación por las plantas y volatilización. | Proceso de nitrificación/desnitrificación, asimilación por plantas y volatilización. | Proceso de nitrificación/desnitrificación, asimilación por plantas y volatilización. |
| Fosforo | Reducción por precipitación, por asimilación por plantas y microorganismos. | Reducción por sedimentación y por asimilación por medio de las plantas y microorganismos. | Reducción por filtración, sedimentación, absorción, por asimilación por parte de las plantas y microorganismos. | Reducción por filtración, sedimentación, absorción, por asimilación por las plantas. |
| Metales pesados | Sedimentación, por absorción y absorción por plantas. | Absorción de plantas, superficie de detritos y por sedimentación. | Absorción a las raíces de las plantas y los detritos y por sedimentación. | Absorción a las raíces de las plantas, sedimentación y filtración. |
| Traza de contaminantes orgánicos | Volatilización, absorción y biodegradación. | Volatilización, absorción y biodegradación. | Absorción y biodegradación. | Volatilización, absorción y biodegradación. |
| Patógenos | Muerte natural, radiación U.V. depredación por otros organismos. | Muerte natural, depredación, radiación UV, sedimentación, secreción de antibióticos de las raíces de las plantas. | Por muerte natural, por depredación, sedimentación, secreción de antibióticos desde las raíces de las plantas. | Por muerte natural, por depredación, sedimentación, secreción de antibióticos desde las raíces de las plantas. |

Una gran variedad de procesos físicos, químicos y biológicos están presentes a lo largo de un humedal, Soriano (2009) considera las de mayor importancia:

- La filtración y la adsorción de contaminantes por la matriz del lecho.
- La degradación aeróbica y anaeróbica de la materia orgánica degradable por parte de los microorganismos.
- La nitrificación y desnitrificación por parte de los microorganismos y de las plantas.

A continuación se explican los mecanismos de remoción de contaminantes que ocurren en los humedales construidos, cuyo contenido está basado principalmente en el texto de Soriano (2009) y Delgadillo *et al.* (2010).

4.1. Proceso de Remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST)

En la eliminación de la materia en suspensión (MES) mediante humedales artificiales intervienen procesos de:

- Sedimentación: la materia en suspensión sedimentable (principalmente de naturaleza orgánica), presente en las aguas a tratar decanta por la acción exclusiva de la gravedad.
- Floculación: permite la sedimentación de partículas de pequeño tamaño, o de menor densidad que el agua, al producirse agregados de las mismas con capacidad para decantar.
- Filtración: se produce la retención de materia en suspensión al pasar las aguas a través del conjunto que forma el sustrato, los rizomas, las raíces y los tallos de la vegetación.

La eliminación de la materia en suspensión tiene lugar, principalmente, por fenómenos de sedimentación y de filtración de las aguas a su paso por toda la masa de tallos y de los restos de vegetación caídos en el agua. En este tipo de humedales para conseguir elevados rendimientos de eliminación de materia en suspensión se

requiere disponer de zonas con abundante vegetación, que faciliten la sedimentación y la filtración.

En los HFSS la eliminación de materia en suspensión tiene lugar, principalmente, por fenómenos de filtración a través del conjunto que forman el sustrato (sobre el que crecen las plantas), los rizomas y las raíces. Según estudios realizados, la mayor parte de la eliminación de la materia en suspensión se lleva a cabo en los primeros metros del humedal y la concentración de sólidos va disminuyendo de forma exponencial a medida que recorre el humedal.

Para evitar la rápida colmatación de los sustratos filtrantes es aconsejable la existencia previa de un pre-tratamiento y de un tratamiento primario, que elimine un alto porcentaje de la materia en suspensión presente en las aguas residuales a tratar.

Por lo anterior se puede concluir que en las zonas cercanas a la entrada del lecho se encuentra una mayor concentración de MES. La carga superficial de la MES que llega al humedal no debería ser superior a los 20 g de MES/m²d⁻¹ para evitar la colmatación y asegurar la vida del sistema.

4.2. Proceso de Remoción de Materia orgánica

La remoción de materia orgánica tiene lugar principalmente mediante biodegradación aeróbica o anaeróbica. Una pequeña porción también es removida por procesos físicos como la sedimentación y la filtración, cuando la materia orgánica es fijada a los sólidos suspendidos. La biodegradación es realizada por los microorganismos, los cuales están adheridos, a la planta, en particular a las raíces y a la superficie de los sedimentos (Brix y Kolb, 1998; citado por Delgadillo *et al.*, 2010).

Todos los microorganismos involucrados en este proceso de tratamiento requieren una fuente de energía y carbono para la síntesis de nuevas células, como también otros nutrientes y elementos traza. De acuerdo a su fuente de nutrientes, están clasificados como heterótrofos y autótrofos. Los heterótrofos requieren material

orgánico como fuente de carbono para la síntesis de nuevos microorganismos, en cambio, los autótrofos no utilizan materia orgánica sino dióxido de carbono como fuente de carbono (Grey y Kolb, 1998; citado por Delgadillo *et al.*, 2010).

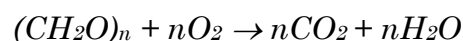
Ambos grupos usan luz o una reacción química de oxidación – reducción como fuente de energía para toda la síntesis y son llamados fotótrofos y quimiótrofos, respectivamente (Cooper *et al.*, 1996). Dos clases diferentes de biodegradación microbial, la aeróbica o la anaeróbica, tienen lugar en los humedales construidos, dependiendo de la presencia de oxígeno disuelto.

Biodegradación aeróbica de la materia orgánica

La eliminación del material carbónico de origen orgánico de las aguas residuales se mide por la reducción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) en las aguas residuales. La eliminación de la materia orgánica, o reducción de la DBO₅ de un flujo de aguas residuales, se da en cuatro fases:

1. La solubilización de las grandes moléculas orgánicas.
2. La absorción de materia orgánica (los pequeños compuestos) del agua residual por los microorganismos.
3. La conversión de materia orgánica en materia celular (las bacterias) y CO₂ a través de los procesos metabólicos de los microorganismos.
4. La transformación del carbono en CO₂ por una cadena trófica, a través de la predación, la alimentación y el metabolismo de protozoarios, rotíferos y otros microorganismos.

La biodegradación aeróbica de la materia orgánica disuelta se produce gracias a la presencia de bacterias heterótrofas aerobias. La reacción simplificada que tiene lugar es la siguiente:



Para poder descomponer las grandes moléculas orgánicas, las bacterias suelen producir exoenzimas que descomponen los sólidos en el exterior del cuerpo del organismo. Tras la descomposición de los sólidos, los heterótrofos convierten la DBO carbonosa en biomasa bacteriana y CO₂ (50-80 por ciento).

Las bacterias que suelen llevar a cabo estos procesos son, entre otras, las *Aerobacter aerogene*, *Bacillus subtilis*, *Cellulomonas biazotea*, *Pseudomonas denitrificans*, *P. Stutzeri*, *Nitrobacter winogradskyi*, *Rhodopseudomonas palustris*, y *Nitrosomonas sp.* Estos organismos llegarán por si mismos al humedal desde el entorno. La descomposición (solubilización) de los sólidos es un precursor de la nitrificación que requiere oxígeno y una fuente de carbono inorgánica. La transferencia de materia orgánica a la célula y su posterior conversión en material celular, ocurre generalmente en la zona aeróbica de un humedal artificial.

Si la presencia de oxígeno es muy baja o nula, las bacterias que llevan a cabo esta reacción no pueden desarrollarse bien y pasa a predominar la degradación anaeróbica de la materia orgánica.

Biodegradación anaeróbica de la materia orgánica

Este proceso se caracteriza por un conjunto de reacciones asociadas al metabolismo de distintas bacterias de tipo anaerobios estrictos (bacterias metanogénicas, convierten los ácidos y los alcoholes en metano) y facultativos (bacterias acidificantes, descomponen los sólidos orgánicos a través de la hidrólisis) que utilizan como aceptores finales de electrones los nitratos, los sulfatos o los carbonatos. Los microorganismos que utilizan los sulfatos o los carbonatos son anaeróbicos estrictos y los que utilizan nitratos son anaeróbicos facultativos.

- Hidrólisis – Acidogénesis

En esta primera etapa los compuestos orgánicos complejos del agua residual (proteínas, grasas, lípidos, hidratos de carbono entre otras) se hidrolizan en compuestos solubles por la acción de enzimas hidrolíticas. Estos compuestos a su

vez son fermentados a ácidos orgánicos de cadena corta, tales como acético, propiónico y butílico. Una población heterogénea de bacterias facultativas y anaerobias es responsable de estas reacciones de hidrólisis y oxidación. En esta etapa no se produce una reducción importante de la DQO, ya que lo que ocurre es la conversión de moléculas orgánicas complejas en ácidos orgánicos de cadena corta. El primero de los ácidos en formarse y el más abundante en los humedales de flujo subsuperficial es el ácido acético.

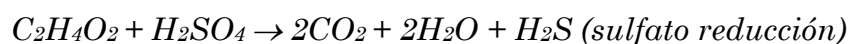
- Acetogénesis

En la fase de acetogénesis se metabolizan los productos terminales de la etapa acidogénica, es decir, alcoholes, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos que son convertidos en acetatos, CO₂ y H₂.

A partir de esta etapa empiezan a actuar las bacterias sulfato-reductoras y las metanogénicas que compiten por el mismo sustrato. Dependiendo de las condiciones del medio, unas predominarán más que otras.

Las bacterias metanogénicas son anaerobias estrictas y son las responsables de la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H₂-CO₂, formato, metanol y algunas metilaminas.

Las bacterias sulfato-reductoras son anaerobias estrictas y utilizan como aceptor de electrones el sulfato u otros compuestos oxidados del azufre y lo reducen a sulfhídrico, producto final de su respiración anaeróbica.



Las bacterias que transforman la glucosa en ácidos grasos pueden adaptarse mejor a las diferentes condiciones ambientales de pH y temperatura que las bacterias metanogénicas. Las bacterias acidogénicas actúan a una velocidad superior a las metanogénicas, la acumulación de ácidos hará disminuir el pH inhibiendo la actuación de las bacterias metanogénicas. Se trata de un proceso de equilibrio el cual es inestable y puede ocasionar que no se complete todo el proceso de degradación en el caso que sólo se realice en la primera fase de la fermentación.

4.3 Proceso de Remoción de Nitrógeno

Considerado uno de los contaminantes más importantes del agua residual, pues las actividades agrícolas e industriales han aumentado casi el doble la concentración del nitrógeno fijado anualmente en la biósfera. Parte importante de este nitrógeno llega a los diferentes cuerpos de agua en forma de amonio, nitrato y nitrito, creando un problema de toxicidad para los organismos acuáticos, además de cambios ambientales como la eutrofización de lagos (Laws, 1993; Vitousek *et al.*, 1997; citado por Cervantes *et al.*, 2000).

Cuando ingresa el agua residual dentro del sistema de humedal construido, la mayor parte del nitrógeno está presente como amonio o en forma de compuestos inestables, que son fácilmente transformados en amonio. Los principales mecanismos de remoción de nitrógenos en los humedales construidos son la nitrificación y la desnitrificación, que ocurre en diferentes zonas del sustrato. Todo el proceso puede ser dividido en pasos (Figura 14), iniciando con la amonificación, seguido por la nitrificación y la desnitrificación (Delgadillo *et al.*, 2010).

La amonificación ocurre en las zonas aeróbicas, como también en zonas anaeróbicas, por la mineralización del nitrógeno contenido en los orgánicos.

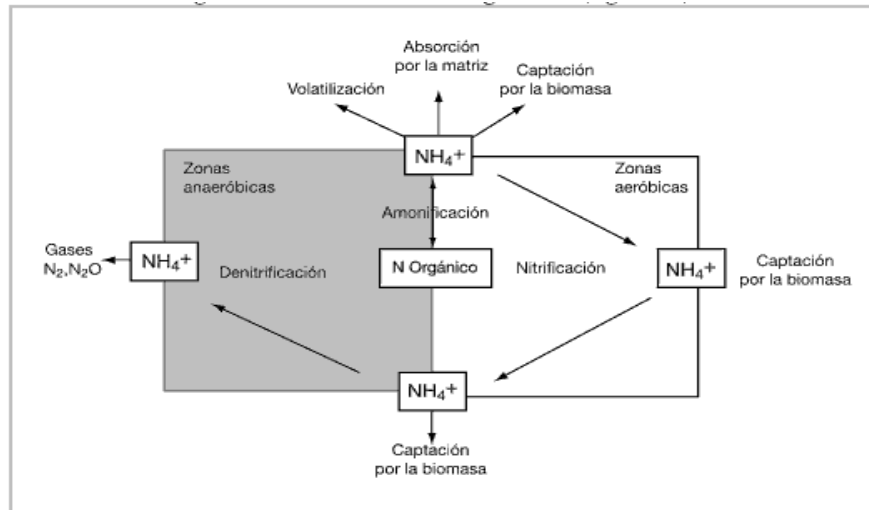
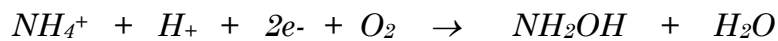


Figura 14. Diagrama del metabolismo del nitrógeno (Delgadillo *et al.*, 2010).

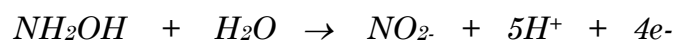
La nitrificación requiere la presencia de oxígeno disuelto (condiciones aeróbicas), amonio o nitritos como fuente de energía y dióxido de carbono como fuente de carbono. La oxidación en sí ocurre en dos estadios, cada uno involucra diferentes espacios nitrificantes quimioautótrofos.

El primer paso es la oxidación de iones amonio a nitrito (nitrosificación), la enzima amonio mono-oxigenasa (AMO) transforma al amonio en hidroxilamina, que posteriormente se convierte en nitrito, mediante la hidroxilamina óxidoreductasa (HAO).

(AMO)



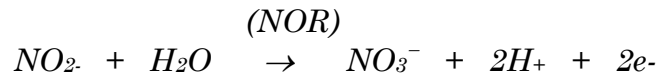
(HAO)



En este paso, la liberación de iones de hidrogeno baja el pH, por lo que es necesario un medio fuertemente alcalino para mantener un pH en el rango de 7.5 a 8.6 (Cooper *et al.*, 1996). El género bacterial que es considerado para catalizar esta reacción es

Nitrosomas, en cambio el género *Nitrobacter* es responsable para la transformación de nitrito a nitrato.

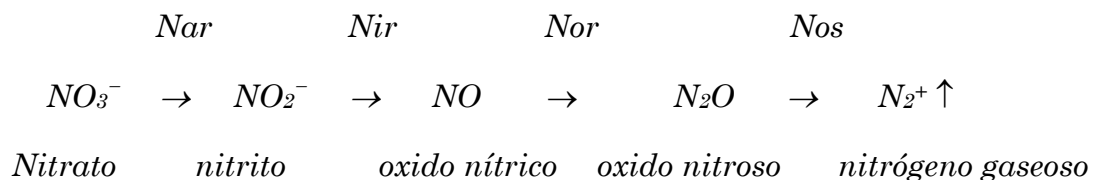
Mediante la acción del nitrito óxido-reductasa (NOR):



Toda la reacción necesitaría un alto ingreso de oxígeno: alrededor de 4.5 kg por cada kg amonio-nitrógeno ($\text{NH}_4^+ -\text{N}$) oxidado. Las bacterias son sensibles a un amplio rango de inhibidores; así, alta concentración de nitrógeno amoniacal es inhibidora. También concentraciones de oxígenos disueltos por más de 1 mg $\text{O}_2\cdot\text{L}^{-1}$ son requeridos y temperaturas por debajo de 100 °C reduce el desempeño significativamente.

La desnitrificación es el paso final en la remoción de nitrógeno. Ocurre bajo condiciones anóxicas, esto significa, que no hay oxígeno disuelto presente (o con una concentración menores a 2 por ciento de saturación) pero donde el oxígeno está disponible en fuentes tales como el nitrato, nitrito o incluso sulfato.

Un amplio rango de bacterias anaeróbicas facultativas, siendo las más comunes *Pseudomonas sp.*, *Achromobacter sp.*, *Aerobacter sp.*, *P. denitrificans* y *Alcaligenes sp.*, que realizan el proceso. Toda la reacción que incluye como primer paso la conversión de nitrato a nitrito, seguida por la producción de óxido nítrico y gas nitrógeno, puede ser resumida como sigue:



Nar: nitrato reductasa; Nir: nitrito reductasa; Nor: oxido nítrico reductasa; Nos: oxido nitroso reductasa.

Los tres productos son gaseosos, pero mayormente el gas nitrógeno es perdido en la atmósfera debido a que los primeros dos productos son pasajeros en la mayoría de los casos. Similar al proceso de nitrificación, la desnitrificación es también fuertemente dependiente de la temperatura y es necesario suficiente carbono como fuente de energía para que la bacteria realice la conversión.

4.4. Procesos de Remoción de Fósforo

El fósforo se encuentra principalmente en tres distintas formas: como ortofosfato, polifosfato y fosfato orgánico. El último es constituyente menor y como los polifosfatos, requieren una posterior descomposición a una forma de ortofosfato más asimilable. Cerca del 25 por ciento del fósforo total fijado está presente como ortofosfato tales como: PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4 , H_3PO_4 , que están disponible para el metabolismo biológico inmediato. Por lo tanto, en términos de utilización, en la planta de tratamiento lo que importa es la concentración de fosforo orgánico antes que la concentración del fósforo total (Gray, 1989; citado por Delgadillo *et al.*, 2010).

La remoción de ortofosfatos ocurre principalmente como una consecuencia de la adsorción, complejización y reacciones de precipitación con *Al*, *Fe*, *Ca* y materiales arcillosos en la matriz del sustrato. El consumo de fósforo en las plantas pueden ser considerados insignificante comparados con los efectos de adsorción, valores alrededor del 3 por ciento de la carga anual han sido reportados (Boerner y Kolb, 1998; citado por Delgadillo *et al.*, 2010). Dependiendo del valor de pH dentro del sustrato, el fósforo está presente en la forma de sal soluble o minerales insolubles, lo cual significa que el fósforo puede ser transferido dentro de un humedal construido. Debido al contenido de óxido metálico en el sustrato, la fijación de fósforo como fosfatos por medio de la adsorción varia (Wissing y Kolb, 1998; citado por Delgadillo *et al.*, 2010).

4.5. Procesos de Remoción de Metales Pesados

Los metales traza tienen una alta afinidad para la adsorción y la complejización con material orgánico y se acumulan en la matriz de un humedal construido. Los metales pueden encontrarse en formas solubles o como partículas asociadas, siendo la primera la forma más biodisponibles.

Los procesos físico químicos tales como la adsorción, precipitación, complicación, sedimentación, erosión y difusión, determinan la distribución entre las partículas y las fases disueltas. Los parámetros específicos que controlan la sedimentación en el agua incluyen la relación de flujo/sólidos suspendidos, condiciones óxicas/anóxicas, fuerza iónica, pH, contenido de carbono orgánico particulado y disuelto, concentraciones de ligantes inorgánicos y orgánicos, y movilización de metales mediante reacciones bioquímicas. Desafortunadamente, la resolubilización de metales desde los humedales construidos es una causa de preocupación (Cooper *et al.*, 1996).

La adsorción involucra la unión de las partículas (o sustancias disueltas en solución), en partes de la planta o a la superficie de la matriz. En una reacción de intercambio catiónico, los iones metálicos positivamente cargados en solución se unen a los sitios negativamente cargados en la superficie del material adsorbente.

En cuanto a los procesos microbianos mediados, es necesario tener en cuenta que en un humedal construido se pueden distinguir dos zonas: la zona aeróbica, que contiene una alta proporción de material orgánico y la zona anaeróbica, dominada por materia orgánica. Entre estas dos principales zonas también existen zonas anóxicas. La presencia de bacterias que oxidan metales en las zonas aeróbicas y bacterias que reducen sulfatos en las zonas anaeróbicas, que causarán la precipitación del óxido de metal y sulfatos respectivamente (Cooper *et al.*, 1996).

4.6. Proceso de Remoción de Bacterias

Las bacterias patógenas y virus son organismos importantes en cuestiones de salud pública, debido a que estas son capaces de sobrevivir al menos un corto tiempo en agua natural, pero aun más en aguas con temperaturas frías y con presencia de polución orgánica, como en aguas residuales.

La remoción de estos microorganismos está basada en una combinación de factores físicos, químicos y biológicos. Los factores físicos incluyen la filtración, sedimentación, agregación y acción de la radiación ultravioleta. Los mecanismos biológicos incluyen, la predación y ataques por bacteriófagos, y la muerte. Finalmente los factores químicos son la oxidación, adsorción y la exposición a toxinas fijadas por otros microorganismos y exudadas por las raíces de las plantas (aunque la cantidad de estos antibióticos causa duda respecto a su efectividad para afectar a los patógenos).

Estudios realizados han demostrado una eficiencia de remoción entre 98% a 99% de bacterias (coliformes fecales) y enterobacterias en humedales artificiales (Vymazal *et al.*, 1998).

V. RENDIMIENTOS ESPERADOS DE LOS HUMEDALES

Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno (N), así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos. La remoción de fósforo (P) es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo (Lara, 1999).

En la Figura 15 se puede observar los principales procesos que se llevan a cabo dentro del sistema de humedal, la cual permite la depuración del agua residual.

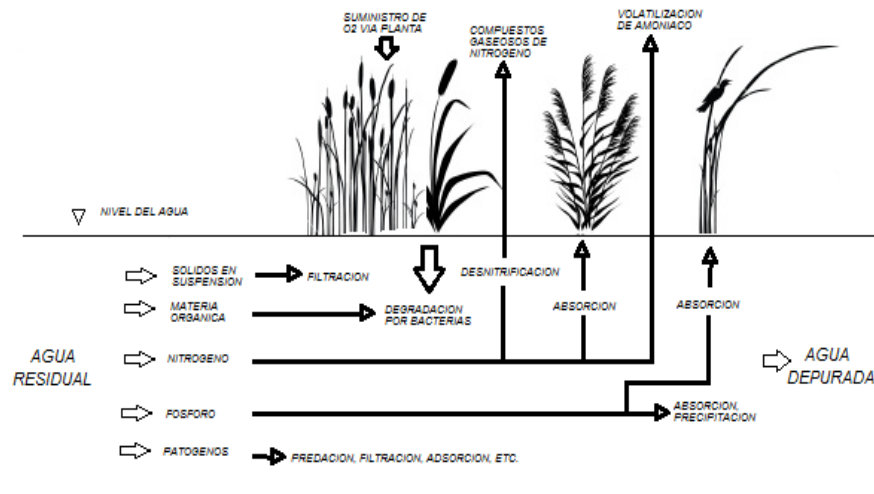


Figura 15. Procesos de depuración de los humedales artificiales (Lara, 1999).

Para la establecer la efectividad de los humedales construidos se consideran los valores típicos de concentración de entrada y salida dentro del sistema. Tomando como ejemplo, la remoción de sólidos suspendidos totales durante el paso del agua dentro del humedal mostrado en la Figura 16. De igual manera, la reducción en la concentración de DBO es significativa cuando el agua fluye por el humedal como se muestra en la Figura 17 (US EPA, 1999).

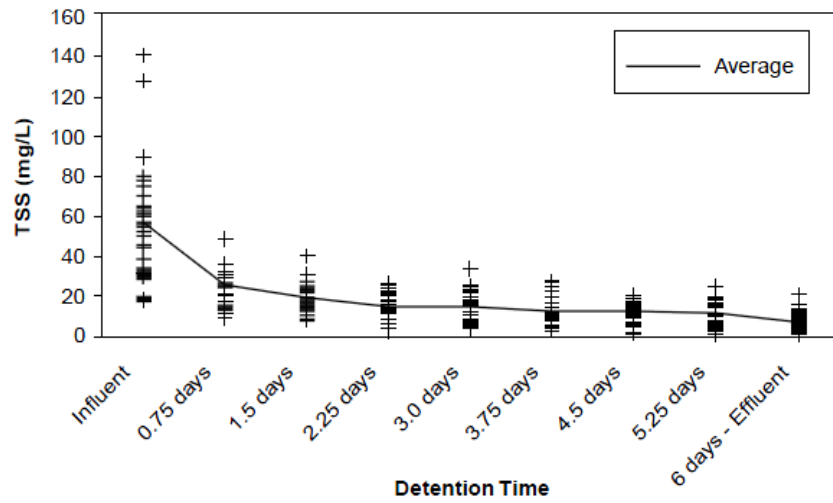


Figura 16. Reducción media en los sólidos suspendidos totales al fluir el agua por un humedal construido (US EPA, 1999).

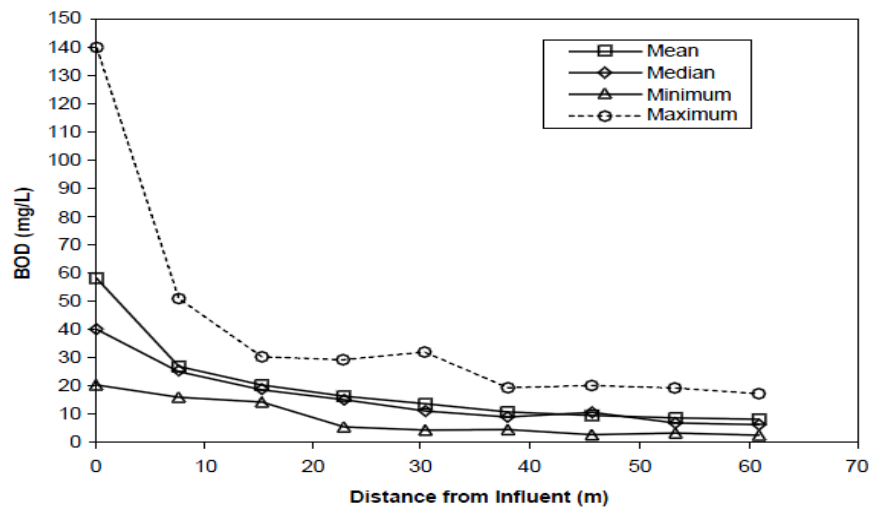


Figura 17. Comportamiento de la concentración de DBO del agua residual durante el paso por el humedal (US EPA, 1999).

Los humedales construidos tipo HFSS pueden disminuir varias de las características perjudiciales del agua residual. Los estudios han mostrado el desempeño adecuado del tratamiento para la mayoría de los componentes de aguas residual, incluyendo DBO, SST, y coliformes fecales (US EPA, 1999). La eliminación de nitrógeno y fósforo varía a través del año con el crecimiento de planta y senectud, pero es generalmente pobre. La mayoría de las enfermedades relacionadas con los excrementos resultan de bacterias y virus, ambos son eliminados efectivamente por este tipo del tratamiento de aguas residuales (Hammer y Bastian, 1989).

De acuerdo a los estudios realizados en humedales construidos de tipo HFSS principalmente (Romero *et al.*, 2009; Rodríguez-Monroy y Duran-de-Bazua, 2006; Bravo *et al.*, 2005; y Quipuzco, 2002) han demostrado tener buenos resultados en la remoción de contaminantes de aguas residuales y han llegado a obtener resultados similares a las de la Cuadro 12 reportados por Hammer y Bastian, (1989); Crites y Tchobanoglous (1998); US EPA (1999) y Crites *et al.* (2006).

Cuadro 12. Reducción típica del porcentaje y concentraciones efluentes esperadas para contaminantes comunes en humedales de HFSS.

| Parámetros | Reducción esperado (%) | Concentración esperado del efluente (mg.L ⁻¹) |
|--|------------------------|---|
| <i>Sólidos Suspendidos</i> | | |
| <i>Totales (SST)</i> | 85 – 90 | 3.7 – 64 (<i>típicamente < 10</i>) |
| <i>Coliformes</i> | 90 – 99 | MPN 50 – 577, 000/100 ml |
| <i>Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)</i> | 80 – 90 | 5.3 – 90 |
| <i>Nitrógeno</i> | 20 – 40 | 6.3 – 29.6 |
| <i>Fosforo</i> | 15 – 30 | 0.5 - 9.6 |
| <i>Metales:</i> | | |
| <i>Al, Cu, Zn, Cd</i> | 84 – 99 | < 0.01 – 0.05 |
| <i>Fe, Mn</i> | -10% | 0.288 – 1.234 |

A continuación se resumen los principales aspectos considerados para determinar el rendimiento del sistema de humedales tomado principalmente del texto de Silva y Zamora (2005):

5.1. Remoción de DBO

La remoción de la materia orgánica sedimentable dentro de los sistemas de humedales es muy rápida debido a la poca velocidad del flujo en los sistemas de HFS y a la deposición y filtración en los sistemas de HFSS, donde cerca del 50 por ciento de la DBO_5 aplicada es removida en los primeros metros del humedal. Esta materia orgánica es descompuesta de manera aeróbica o anaeróbica, dependiendo del oxígeno disuelto, y una parte de esta materia orgánica que se encuentra disuelto de manera coloidal es removida por microorganismos que crecen en el sistema.

5.2. Remoción de Sólidos Suspendedos Totales (SST)

Es muy efectiva en los dos tipos de humedales. Al igual que en la remoción de DBO_5 en los primeros metros a la entrada, debido a las condiciones lentas de flujo y a la poca profundidad del agua en el sistema. La dispersión del flujo en la entrada puede controlarse con un difusor para mantener bajas velocidades incluso para evitar condiciones anóxicas.

Si el agua en el humedal no se protege de la luz solar con la vegetación, las algas causan grandes fluctuaciones en los niveles de oxígeno en la columna de agua.

5.3. Remoción de Nitrógeno

La nitrificación/desnitrificación es la principal vía para remover nitrógeno. Los humedales artificiales alimentan el proceso de desnitrificación usando fuentes de carbón derivadas de la biomasa producida dentro del humedal. Las remociones de nitrógeno (NKT) que han sido reportadas para tiempos de retención de 5 a 7 días generalmente producen un efluente con NKT menor a 10 Mg.L^{-1} .

5.4 Remoción de Fósforo

Igual que en los sistemas de depuración biológicos convencionales, la eliminación de fósforo en los humedales es complicada. En general no se suele eliminar más del 10-20 por ciento, y sin haber grandes diferencias entre sistemas horizontales y verticales

(García y Corzo, 2008). En muchos humedales la remoción no es muy efectiva porque el contacto entre el agua residual y el suelo (cuando el sistema está en contacto con la tierra) es limitada. Por lo tanto se puede diseñar lechos sumergidos que sirvan de material de soporte. La presencia de arcilla, hierro y aluminio aumenta el potencial para remover fósforo. El uso de tal medio, sin embargo, reduce la capacidad hidráulica y requiere un área más grande para el tratamiento.

5.5. Remoción de Metales Pesados

Hay pocos datos disponibles sobre la capacidad de remoción de los humedales HFS; porque el mecanismo de remoción es similar al descrito anteriormente para el fósforo, la respuesta no es muy efectiva. En sistemas HFSS la remoción de metales puede ser muy efectiva porque hay más oportunidad de contacto y absorción. El mecanismo de remoción predominante en el humedal artificial es atribuido al fenómeno de precipitación-absorción. La precipitación aumenta con el metabolismo del humedal el cual incrementa el pH del agua ácida afluyente para alcanzar la neutralización. La remoción de Cu, Zn y Cd son del 99, 97 y 99 por ciento respectivamente, para un tiempo de detención de 5.5 días en humedales en Santee, California.

5.6. Remoción de Coliformes Fecales

Los humedales artificiales son capaces de una reducción de coliformes fecales de entre uno y dos logaritmos con tiempos de retención hidráulica de 3 a 7 días que en muchos casos no es suficiente para satisfacer los requisitos de vertido que a menudo especifican menores a 200 NPM/100 ml. Serian necesarios tiempos de retención superiores a los 14 días para lograr la reducción de 3 a 4 logaritmos.

VI. CONSIDERACIONES DEL LUGAR PARA LA CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales son situados en lugares de áreas disponibles relativamente largas con fuentes de aguas contaminadas, dicha área dependerá del flujo, del volumen, la concentración de contaminantes y metas del tratamiento.

Las consideraciones principales que se deben tomar en cuenta para la localización y diseño preliminar de sistemas de humedales artificiales son: topografía, suelo, uso actual del suelo, riesgos de inundación, clima y el control de vectores (Metcalf y Eddy, 1996; Citado por Silva y Zamora, 2005).

6.1. Suelo

El sistema debe poseer un aislante que garantice la permanencia del agua residual en el humedal, para así prevenir la infiltración al terreno, el material de soporte podrá ser grava, con paredes y bases de concreto que corresponden a las terrazas o canales horizontales que posee la estructura civil.

6.2. Topografía

El terreno apto para la instalación de un sistema de humedal artificial es uno de topografía uniforme horizontal o ligera pendiente. Esto se debe a que el sistema de flujo superficial (HFS) se suele diseñar con depósitos o canales horizontales, y los sistemas de flujo subsuperficial (HFSS) se suelen diseñar y construir con pendientes del 1 por ciento o superiores. A pesar de que es posible construir en terrenos de mucha pendiente y con topografía más irregular, esto afectaría directamente al costo de construcción del sistema. En general la construcción de sistemas de humedales artificiales se debe construir con pendientes inferiores al 5 por ciento.

6.3. Uso Actual del Suelo

El tipo de terreno preferido para la instalación de sistemas de humedal artificial es de espacios abiertos o uso agrícola.

6.4. Clima

Es posible utilizar sistemas de terrenos pantanosos en zonas de climas fríos. Sin embargo, la viabilidad del funcionamiento de los sistemas durante el invierno depende de la temperatura del agua en el interior del depósito y de los objetivos de tratamiento. El rendimiento del proceso de tratamiento es muy sensible a la temperatura, ya que los principales mecanismos de tratamiento son biológicos. En los casos en los que las bajas temperaturas no permitan alcanzar los objetivos de tratamiento preestablecidos, será necesario almacenar el agua (Metcalf y Eddy, 1996). Los sistemas construidos en climas fríos podrían requerir grandes áreas o especial operación para conseguir las metas esperadas. Los climas cálidos podrían requerir fuentes de agua suplentes para prevenir el secado del humedal.

6.5. Riesgo de Inundación

Los humedales se deben ubicar lejos de las comunidades especialmente las que se encuentran por debajo de este. Además se debe contar con un caudal conocido para tratar, con el fin de no superar la capacidad del canal horizontal.

6.6. Control de Vectores

Los sistemas HFS en particular, proporcionan el hábitat ideal para la proliferación de mosquitos. El aspecto del control de vectores puede ser el factor crítico a la hora de determinar la viabilidad del uso de sistemas pantanosos artificiales. En el diseño de este tipo de sistemas se deben incluir medidas para el control biológico de la presencia de mosquitos por medio de peces y de la aplicación de agentes químicos de control. Para mantener la población de peces es necesario que el nivel de oxígeno disuelto sea superior a 1 mg.L^{-1} . También puede ser necesario reducir la densidad de la vegetación (Metcalf y Eddy, 1996).

VII. CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES DE FLUJO SUPSUPERFICIAL HORIZONTAL (HFSSh)

En este capítulo se describen las principales actividades que son llevados a cabo para la construcción de humedales de tipo HFSS (García y Corzo, 2008).

7.1. Desbroce, Limpieza y Establecimiento de una Plataforma de Trabajo.

Con esta actividad se da inicio a la construcción del sistema de tratamiento. Su finalidad es la de retirar toda la vegetación, objetos, construcciones existentes, y la capa vegetal superficial (aproximadamente 0,2 m de espesor) que se encuentren en el sitio donde se construirá la instalación (Figura 18). También incluye el acondicionamiento y transporte de todo el material recogido. El resultado final de las actividades de desbroce y limpieza será la obtención de una plataforma de trabajo.



Figura 18. Actividades de desbroce, limpieza y construcción de una plataforma de trabajo (García y Corzo, 2008).

Una vez conformada la plataforma de trabajo se realiza el replanteo del tratamiento completo según las dimensiones especificadas en el diseño, utilizando indicadores (estacas o banderillas por ejemplo) que señalen los puntos más singulares e importantes de la construcción, que sirven a su vez para marcar las cotas básicas de la excavación y para determinar la línea piezométrica de la instalación.

7.2. Excavación y Movimiento de Tierras.

Una vez definida en el terreno la situación de cada elemento de la instalación, se procede a excavar o rellenar según sea el caso, y en la medida de lo posible cuando sea preciso rellenar utilizando el material procedente del propio terreno.

La excavación se realizará con medios mecánicos convencionales o métodos de excavación más avanzados (Figura 19), según los datos del estudio geotécnico realizado durante la redacción del proyecto y del reconocimiento previo de la zona.

En los taludes de excavación permanentes se realizará una limpieza de su superficie para evitar desprendimientos de rocas. La inclinación de los taludes de excavación se deberá definir en la fase de proyecto, mediante el correspondiente estudio geotécnico. En todo caso, se recomienda mantener una relación conservadora de 1H:1V en los taludes de desmonte.

Los taludes de excavación temporales y las zanjas para la colocación de tuberías y arquetas se pueden realizar con una relación de hasta 1H:2V en el caso de que se excave hasta una profundidad de 1,5 m, y con una relación de hasta 1H:1,5V si se sobrepasa esa cota. Si el material procedente de las excavaciones es un suelo tolerable (como mínimo) se podrá utilizar para la formación de los taludes que delimitan las celdas del sistema de humedales.



Figura 19. Excavación de zanja y conformación de taludes durante la construcción de un sistema de humedales construidos (García y Corzo, 2008).

Cuando se dispone de los taludes y terraplenes de toda el área donde se instalará la planta de tratamiento se procede a realizar las excavaciones necesarias para cada elemento del sistema. En la conformación de los taludes que rodearán cada lecho (Figura 20), es importante controlar la inclinación definitiva, de forma que se controle su estabilidad, generalmente dicha inclinación es de 45° (1H:1V), igualmente se debe dar un acabado y alisado a su superficie para evitar desprendimientos de material.

Una vez terminado el movimiento de tierras se debe realizar una comprobación de las dimensiones mediante un levantamiento topográfico, especialmente de las celdas que constituirán el sistema.



Figura 20. Conformación de taludes de las celdas de un sistema de humedales (García y Corzo, 2008).

7.3. Nivelación y Compactación de las Celdas.

Esta es una de las actividades más importantes durante la construcción de sistemas de humedales ya que una nivelación incorrecta provocará que en las celdas el agua circule de forma preferente por determinadas zonas dando lugar a cortocircuitos que disminuirán la eficiencia esperada.

Una buena compactación del fondo del humedal se realiza extendiendo una o dos capas de material, en lo posible sin gravas que interfieran en la nivelación, y de

espesor menor a 0,25 m, compactándose una a una, controlándose el contenido de humedad y el grado de compactación. Se recomienda que esta compactación se realice con equipos que no dejen huella, ya que en este caso darán lugar a caminos preferenciales.

Una vez terminada la compactación se recomienda realizar un tratamiento herbicida sobre la superficie de los lechos para evitar el crecimiento de vegetales que puedan causar problemas posteriores.

7.4. Sistemas de Distribución y Recogida.

Los elementos principales de estos sistemas son las arquetas, las tuberías y los canales (Figura 21). Las arquetas, dependiendo de su tamaño, pueden ser de tipo prefabricado para favorecer su montaje, además de resultar más económicas.

La instalación de las tuberías debe ser cuidadosa evitando en lo posible golpes, las rodaduras, los roces con materiales punzantes. En el relleno posterior de las zanjas, se debe seleccionar el material de manera que ningún elemento punzante pueda perforar las tuberías. Como medida preventiva se suele recomendar que la tubería quede completamente envuelta en material arenoso, ejecutando una zona de asiento de la misma, de unos 0,2 m. Es posible que en determinados puntos las tuberías requieran de anclajes para evitar su desplazamiento y consiguiente rotura.

En la unión de las tuberías con las arquetas o elementos rígidos se debe proveer un medio de soporte o junta flexible que prevenga el asentamiento diferencial de la unión.

Los canales de entrada en los sistemas de flujo horizontal se sitúan en la cabecera de las celdas y en todo su ancho, de forma que el agua residual se reparta uniformemente.



Figura 21. Colocación de tubería de salida (Izquierda), arqueta de repartición (Centro) y canal de vertido (derecha) en un humedal de flujo horizontal (García y Corzo, 2008).

7.5. Impermeabilización.

Un método tradicional para impermeabilizar consiste en la aportación de sucesivas capas de arcilla. El proceso se inicia con la instalación de una capa gruesa de cal (2-4 cm) para separar el terreno natural de la capa de arcilla. A continuación se van colocando capas de arcilla de 5-6 cm de espesor, siendo necesario mantenerla húmeda todo el tiempo, e ir compactando a medida que se va colocando hasta alcanzar un espesor normalmente de 0,3 m.

Cuando se utilizan geomembranas sus dimensiones óptimas vienen determinadas por la forma y el tamaño de los humedales. La colocación de las geomembranas en las celdas es una operación que requiere gran cuidado, principalmente en lo referente a la soldadura y el anclaje, evitando las arrugas de la lámina. También deben tenerse en cuenta las tensiones que se pueden generar como consecuencia de los cambios de temperatura ambiente.

El anclaje de las geomembranas se realizará en la coronación del talud. El método más corriente consiste en utilizar una zanja periférica en la cual se fija la lámina.

Dicha zanja será una excavación a un metro de la cresta del talud, con unas dimensiones mínimas de 0,3 x 0,3 m.

Una vez que la geomembrana está instalada, se coloca el geotextil interior si procede (Figura 22). Su colocación es similar a la de la geomembrana y es preferible que extienda hacia fuera de las celdas para que no se acumule tierra y otros materiales entre él y la lámina.

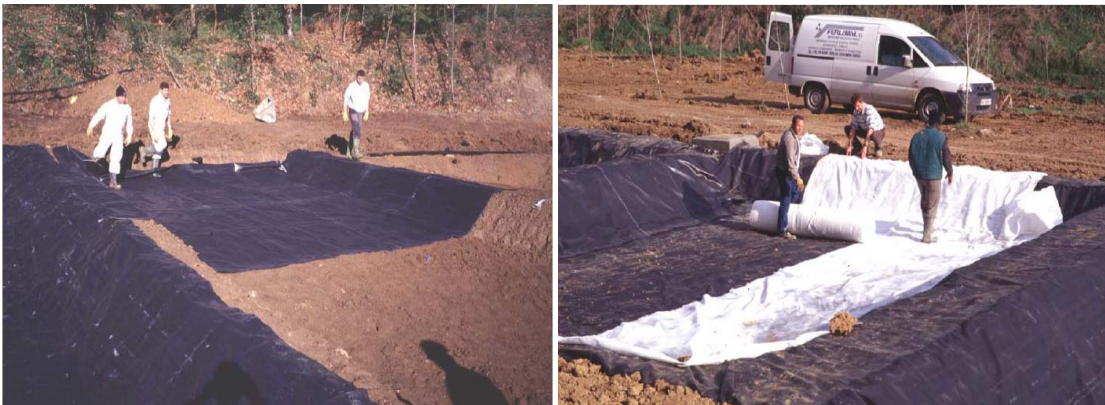


Figura 22. Colocación de geomembrana y geotextil en la construcción de humedal construido (García y Corzo, 2008).

7.6. Material Granular

El relleno de las celdas con el medio granular en los humedales de flujo horizontal se inicia con la colocación de la franja de material de mayor tamaño en el inicio y el final de las celdas. A continuación se procede a colocar el propio medio granular. En los humedales de flujo vertical se colocan las capas de material granular según su tamaño evitando la mezcla entre ellas.

Es muy importante comprobar que el material granular que se va a colocar está bien limpio y libre de finos. Se debe hacer un buen control de calidad al respecto.

Durante la colocación del medio se debe evitar la entrada de maquinaria a las celdas; sin embargo, cuando no es posible verter el material desde fuera, la operación se

debe realizar con maquinaria ligera que no produzca daños a la impermeabilización y que evite el hundimiento del fondo de las celdas (Figura 23).



Figura 23. Izquierda: colocación del material granular desde el exterior de la celda. Derecha: colocación del material granular con maquinaria ligera desde el interior de la celda (García y Corzo, 2008).

7.7. Vegetación.

La plantación de la vegetación es la última etapa en la construcción de un sistema de humedales construidos. Esta actividad se realiza una vez el material granular ha sido colocado y nivelado, se han conectado todas las conducciones y arquetas, y se han llevado a cabo las comprobaciones hidráulicas. Cuando se realiza la plantación las celdas ya deben tener agua.

Las plántulas se insertan en pequeños agujeros efectuados manualmente en el medio granular que después se tapan (Figura 24). Una parte de la biomasa subterránea de las plantas debe estar sumergida en el agua. La plantación se puede efectuar al tresbolillo con una densidad de 3 plantas por metro cuadrado. En la zona mediterránea las plantaciones que se han realizado entre marzo y octubre han dado buenos resultados. No obstante, el mejor momento para plantar es entre abril y

mayo. De hecho si se planta carrizo en abril con una densidad de 3 plantas por metro cuadrado, a finales de agosto se tiene una cobertura casi total.



Figura 24. Operación de plantación de carrizo en un sistema de flujo subsuperficial (Urquiza *et al.*, 2006).

En el caso de que se utilicen rizomas estos deben tener como mínimo 3 entrenudos. También se insertan en pequeños agujeros de manera que un extremo debe estar sumergido en el agua y el otro sobresale por encima del nivel del medio granular.

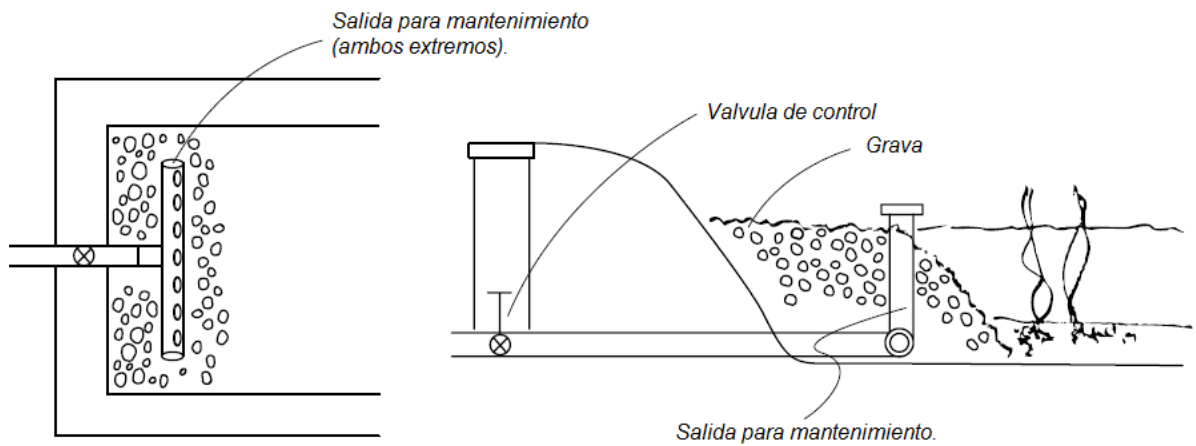
VIII. ESTRUCTURAS DE ENTRADA Y SALIDA

Los dos sistemas de humedales requieren condiciones de flujo uniforme para alcanzar los rendimientos esperados. El objetivo de los sistemas de distribución y recogida es fundamentalmente garantizar una buena distribución y recogida del agua, respectivamente. Si el caudal no se reparte equitativamente en todo el ancho del sistema se generarán zonas muertas, circuitos preferentes, y lo que es más grave, mayor riesgo de colmatación en la zona donde se vierta mayoritariamente el agua.

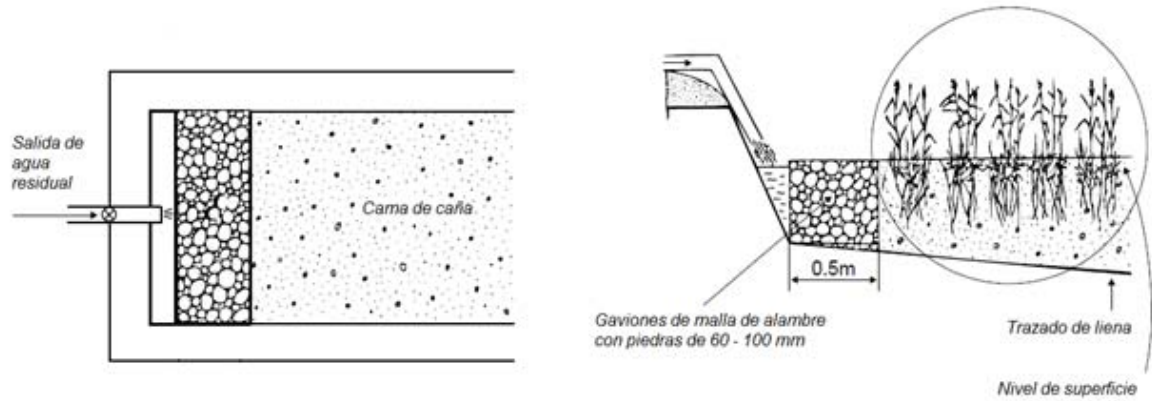
Para la entrada se utiliza normalmente una tubería plástica (100 a 200 mm) perforada que está colocada en la parte superior del humedal en una zona de grava más gruesa que en el resto del humedal, esto permite que el agua se introduzca más rápidamente hacia el interior de humedal y de forma uniforme.

Para la salida, normalmente se utilizan tuberías perforadas instaladas en el fondo de los lechos y rodeadas de grava similar a la utilizada en la entrada. Estas tuberías conducen el agua a vertederos de altura graduable que facilitan el control del nivel de agua dentro del humedal.

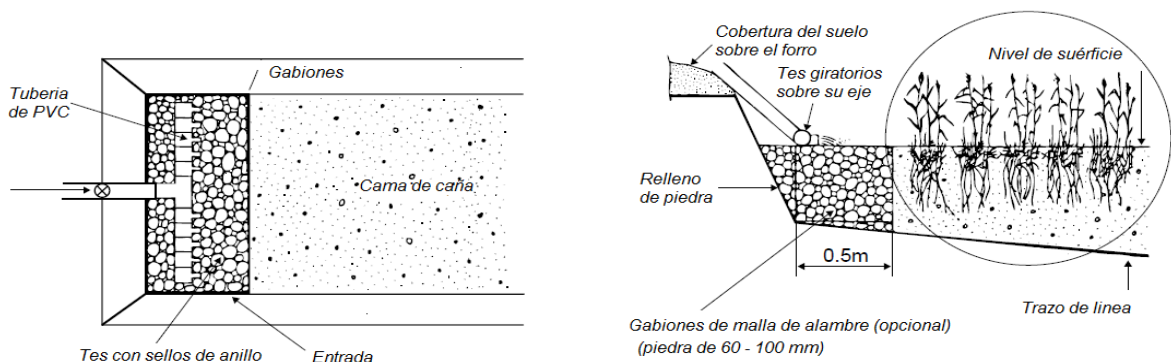
En las Figuras 25 y 26 se muestran unos ejemplos de diseño para zonas de entrada y salida (US EPA, 1999). La zona de entrada está constituida por dos elementos: un sistema de vertido y una franja de material granular de gran tamaño (menor a 100 mm de diámetro) situada ya propiamente dentro de la celda. Estos elementos tienen como objetivo que el agua se reparta uniformemente en la cabecera de cada celda.



a). Tuberías perforadas sumergidas.

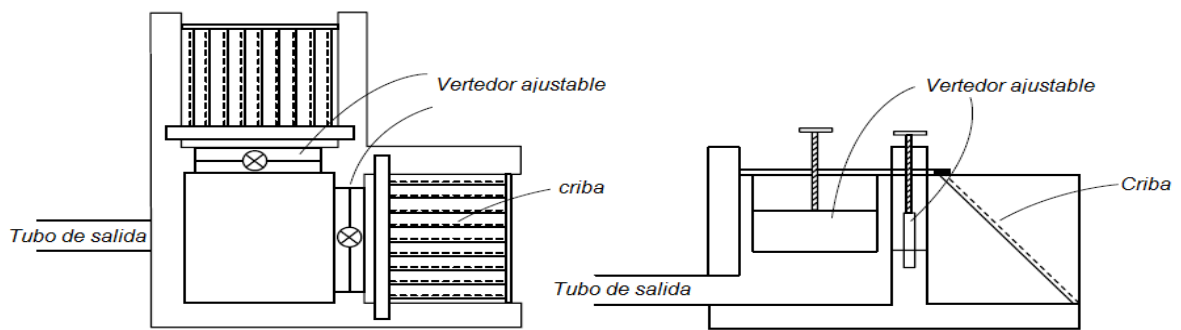


b). Gaviones de alimentación

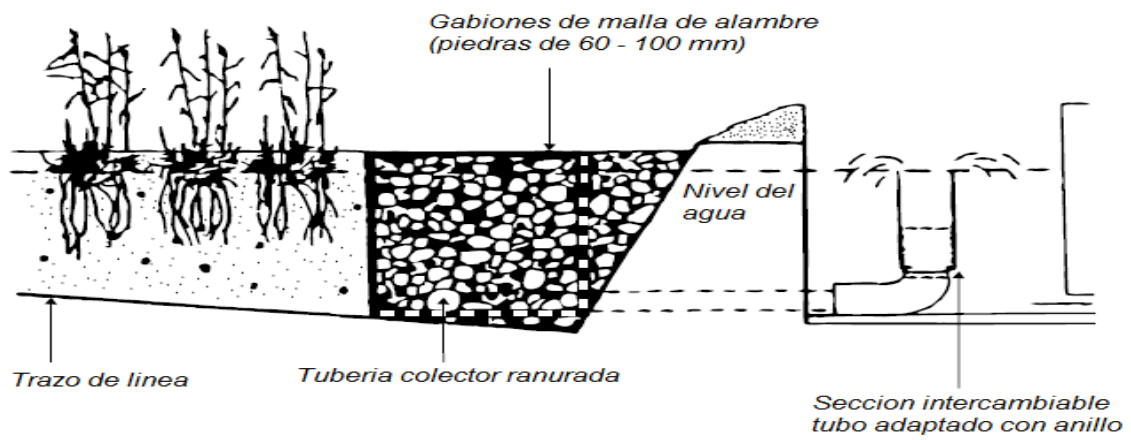


c) T Giratoria

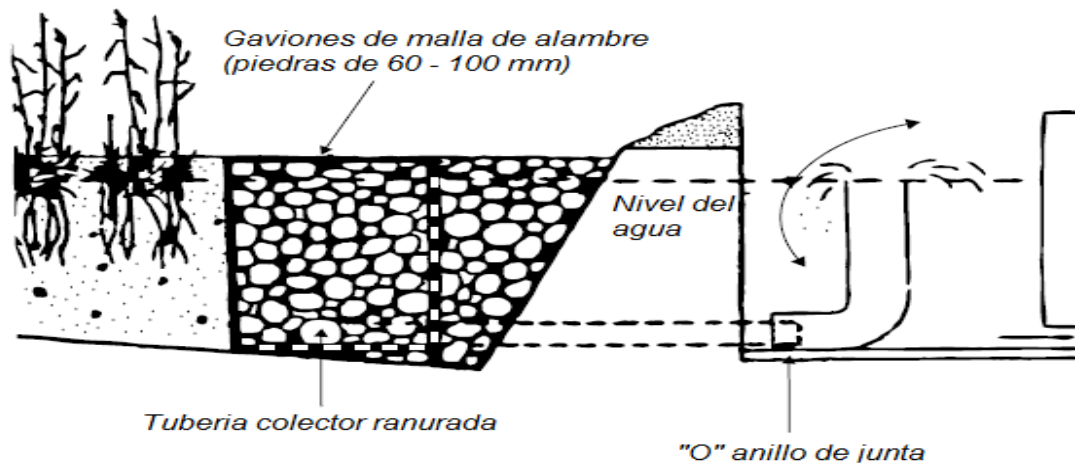
Figura 25. Diseños para la entrada de los humedales construidos (US EPA, 1999).



a). Vertedor ajustable



b). Secciones intercambiables



c). Codo 90° adaptado

Figura 26. Dispositivo de salida (US EPA, 1999).

IX. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Los humedales artificiales, al igual que los sistemas convencionales necesitan de una operación adecuada y de un mantenimiento constante, de esta manera se asegura el buen funcionamiento del sistema, por lo tanto García y Corzo (2008) sugieren lo siguiente:

Es muy importante que los tratamientos previos funcionen correctamente de forma continua ya que en caso contrario se acelerará el proceso de colmatación de los humedales. Por tanto es necesario revisar por lo menos dos veces por semana los procesos unitarios de pretratamiento y tratamiento primario.

También durante esa revisión semanal se comprobará que el agua fluya adecuadamente por todos los elementos del sistema para observar si hay obturaciones. Los sistemas de vertido a las celdas deberán limpiarse con una periodicidad comprendida entre 1 y 6 meses (Cooper *et al.*, 1996).

La revisión semanal también incluirá un control del nivel de inundación del humedal. No debe permitirse en ningún caso que las raíces de las plantas se queden sin agua y por tanto se vigilará que el nivel de agua se mantenga unos 5 cm por debajo de la superficie del medio granular.

La extracción de lodos del tratamiento primario se empezará a realizar después de que el sistema haya estado en marcha como mínimo un año. Se estimará que cantidad de lodos hay que extraer cada 3-6 meses para que el tiempo de digestión de los lodos sea el proyectado.

Se recomienda realizar siegas cada año cuando empiecen a secarse las partes aéreas de las plantas. Las siegas se pueden realizar con maquinaria ligera. En las cercanías a taludes la siega debe ser manual para reducir el riesgo de causar cortes y pinchazos a la lámina impermeable. Las siegas son necesarias para eliminar material vegetal que se descompone en la superficie del medio granular y acelera el

proceso de colmatación. También contribuyen a la eliminación de nutrientes. El material retirado se puede compostar o quemar.

Cuando la colmatación del medio granular es muy severa, apareciendo extensas zonas encharcadas y reduciéndose la eficiencia del sistema, se debe proceder a la sustitución del medio. En principio los sistemas se diseñan para que la colmatación, si aparece, lo haga hacia el final de la vida útil de la instalación. No obstante, una excesiva carga contaminante, junto con una gran acumulación de restos vegetales puede reducir notablemente los espacios intersticiales y obturar el medio granular antes de lo previsto.

Otras veces la colmatación se relaciona con sistemas que no han sido bien diseñados y que en periodos cortos, de 3 a 4 años, ya empiezan a mostrar síntomas.

En sistemas de flujo horizontal se ha comprobado que los vaciados intermitentes permiten solucionar temporalmente síntomas de colmatación. No obstante, a medio-largo plazo éstos que presentan síntomas acaban por obturarse. La prevención de la colmatación pasa por tener buenos diseños y realizar una buena explotación y mantenimiento de los sistemas.

X. VENTAJAS E INCONVENIENTES DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los Humedales Artificiales, como cualquier otro sistema de depuración de aguas residuales, presentan una serie de ventajas e inconvenientes, que pueden aconsejar o no su utilización en cada caso concreto.

Ventajas

Entre las ventajas principales destacan:

- Sencillez operativa, al limitarse las labores de explotación a la retirada de residuos del pretratamiento y el corte y retirada de la vegetación una vez seca.
- Consumo energético nulo, si las aguas residuales a tratar pueden circular por gravedad hasta los humedales.
- Inexistencia de averías al carecer de equipos mecánicos.
- Al operar con elevados tiempos de retención, se toleran bien las puntas de caudal y de carga.
- En los HFSS se simplifica la gestión de los lodos que se generan en el proceso depurador, al procederse a su purga en las fosas sépticas (o tanques Imhoff), tras largos periodos de tiempo.
- Posible aprovechamiento de la biomasa vegetal generada (ornamentación, alimentación animal).
- Los humedales de flujo superficial, principalmente, permiten la creación y restauración de zonas húmedas, aptas para potenciar la vida salvaje, la educación ambiental y las zonas de recreo.
- Mínima producción de olores, al estar expuestas al aire las aguas a tratar en los humedales de flujo superficial.
- Perfecta integración ambiental.

Inconvenientes

Como principales desventajas se pueden mencionar:

- Exigen mayor superficie de terreno para su implantación que las tecnologías convencionales de depuración, lo que puede repercutir en los costes de construcción si fuese necesaria la adquisición de los terrenos.
- Larga puesta en marcha, que va desde meses hasta un año en los HFSS y hasta varios años en los HFS.
- Los HFSS presentan riesgo de colmatación del sustrato si éste no se elige convenientemente, no funcionan correctamente las etapas de pretratamiento y tratamiento primario, o si la instalación recibe vertidos anómalos con elevadas concentraciones de sólidos en suspensión o grasas.
- Pérdidas de agua por evapotranspiración, lo que incrementa la salinidad de los efluentes depurados.
- Posible aparición de mosquitos en los humedales de flujo superficial.

Los humedales artificiales presentan pocas posibilidades de actuación y control ante modificaciones de las condiciones operativas, por lo que es muy importante que estén bien concebidos, dimensionados y construidos.

XI. CONCLUSIONES

La conclusión principal de este trabajo es, que los humedales construidos son una alternativa para la reducción de contaminantes generados por el uso de las aguas, con bajos costos de construcción y mantenimiento, la simplicidad de operación y un bajo o nulo consumo de energía.

Se han demostrado por varios investigadores que estos sistemas han dado resultados eficientes para depurar una amplia gama de aguas residuales, ya sean domésticas, urbanas o industriales.

De acuerdo a las experiencias de trabajo y de los resultados obtenidos por diferentes autores, estos sistemas, pueden ser implementados en sectores rurales, donde la mayor parte de los materiales a utilizar se encuentran disponibles, haciendo más sencilla la labor de construcción o simplemente en donde la energía no está disponible, lo cual sería un impedimento para la instalación de un sistema convencional de tratamiento, además, no requiere un personal altamente capacitado.

Desafortunadamente en México, los humedales artificiales no se consideran de gran importancia como en otros países. Estudios han revelado que solo un pequeño porcentaje de las aguas residuales colectadas, son tratadas bajo este sistema.

Por lo tanto, es necesario realizar trabajos de investigación, entre otros, sobre la adecuación de los modelos de diseño a las condiciones locales, plantas nativas, y tipos de medio granular existentes en el lugar, coadyuvando a la implementación de estos sistemas en lugares donde se requiere de una solución económica, eficiente e inmediata.

XII. BIBLIOGRAFIA

- Arguello, G. J. D., Arias, E. D., Calderón R. L., Cuevas S. E., Pat C. R., Pérez A. J., Ramírez C. R., Vázquez B. y C. E. M. Zetina. 1999. Uso de la macrófitas sumergida *Egeria densa* para el tratamiento de aguas residuales. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán. En línea: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/mexicon/R-0089.pdf> (Febrero, 2011)
- Arias I. C. A. y H. Brix. 2003. Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*; 13: 17-24.
- Atlas, M. R. y R. Bartha. 2002. *Ecología microbiana y microbiología ambiental*, Madrid, España. Adison Wesley. 696 pp.
- Bravo, M., Moreno, A., Hernández, C., Yeomans, J. y S. Okumoto. 2005. Implementación y monitoreo de la etapa inicial del sistema de tratamiento de aguas residuales del laboratorio de procesamiento de alimentos de la universidad de EARTH. *Tierra tropical*: 1 (1): 89-97.
- Brix, H. 1994. Constructed wetlands for municipal wastewater treatment in Europe. In: Mitsch WJ, editor. *Global Wetlands: old world and new*. Elsevier: Amsterdam; p. 325–333.
- Brix, H. 1994. The Role of Wetlands for the Control of Pollution in Rural Areas. *Design and Use of Constructed Wetlands*. Curso CIHEAM-IAWQ. Zaragoza.
- Cervantes, C. F., Pérez J. y J. Gómez. 2000. Avances en la eliminación biológica del nitrógeno de las aguas residuales. *Rev. Latinoam. Microbiol.* 42: 73–82.
- Comisión Nacional de Agua. 2010. *Estadísticas del Agua en México*. Ed. 2010. SEMARNAT. México, D.F. p.110-116.
- Cooper, P. 1998. A review of the desing and performance of vertical flow and hybrid reed bed treatment systems. In *proceeding of 6th International conference, on wetlands systems for wáter pollution*. Aguas de Sao Pedro, Brazil. Ed. Tauk-Tornisielo.
- Cooper, P.F., Job, G.D., Green M.B. y B. E. Shutes. 1996. *Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment*. WRc Publications: Medmenham, Marlow, UK.
- Crites, R. W. y G. Tchobanoglous. 1998. *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw-Hill, New York, p.1084.

- Crites, R. W., Middlebrooks, E. J. y S. C. Reed. 2006. Natural wastewater treatment systems. Chapter 7. Subsurface and vertical flow constructed wetlands. CRC Press/Taylor and Francis group. Boca Ratón, Florida. p. 335-377.
- Crites, R.W. y G. Tchobanoglous. 2000. Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones. Mc Graw Hill. Colombia.
- Delgadillo, O., Camacho, A., F. Pérez, L. y M. Andrade. 2010. Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales. Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. Edición: Nelson Antequera Duran. Cochabamba, Bolivia.
- Duran-de-Bazua C., Haberl R., Kreiner I., Ranjani-Krishnan, Luna Pabello V.M., Fenoglio Limón F.E., Kneidinger Ch., Millan Hernández S.E., Miranda Ríos M., Ramírez Carrillo H.F., Salinas Castillo N.V., Sánchez García H., Schaller P. y M. G. soto-Esquivel. 2005. Humedales artificiales en México: Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales. Vol. 6, Serie: Química ambiental del Agua. Pub. Prog. Ing. Quim. Amb. Y Quim. Amb. ISBN 968-36-9443-8. Facultad de Química. UNAM. México, D.F. México.
- Fenoglio F.E. 2003. Transferencia de oxígeno por convección en sistemas que simulan humedales artificiales utilizando columna empacadas, medición redox y de oxígeno disuelto. Tesis de maestría. Ciencias químicas. UNAM. México, D.F. México.
- Fenoglio, F.E. 2000. Bases de diseño para la construcción de un reactor biológico experimental basado en los sistemas de humedales de flujo vertical. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Francia P., J., Cabrera, S. y G. Flores. 2000. Determinación de la conductividad hidráulica en pantanos artificiales experimentales de flujo subsuperficial. Universidad de Guanajuato, Instituto de Ciencias Agrícolas. Ex hacienda El Copal, Irapuato, Guanajuato, México.
- García Serrano J. y A. Corzo. 2008. Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Universidad Politécnica de Cataluña. España. p. 5-98.
- García, J., Aguirre, P., Mujeriego, R., Huang, Y., Ortiz, L. y M. Bayona. 2004. Initial contaminant removal performance factors in horizontal flow reed beds used for treating urban wastewater. *Wat. Res.* 38: 1669-1678.
- Hammer, D. A. y R. K. Bastian. 1989. Wetlands ecosystems: natural water purifiers, Chapter 2 in *Constructed wetland for wastewater treatment*, ed. by D.A. Hammer, Lewis Publishers, Chelsea, MI. pp. 6-20.

- International Water Association (IWA). 2000. Constructed wetlands for pollution control. Processes, performance, design and operation. IWA Specialistic group on use of macrophytes in water pollution control. IWA publishing, London, England.
- Kadlec, R.H. 1997. Deterministic and stochastic aspects of constructed wetland performance and design. *Water Sci Technol.* 35(5):149–56.
- Kadlec, R.H. y R. L. Knight. 1996. *Treatment Wetlands*. CRC Press, Boca Raton, p. 893.
- Lara, B. J. A. 1999. Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Tesis de maestría. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Llagas, C.W.A. y E. Gómez. 2006. Diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales en la UNMSM. *Rev. Inst. Investig. FIGMMG*; 15(17): 85-96.
- Metcalf y Eddy. 1996. Ingeniería de aguas residuales. 2ª. ed. Mac Graw-Hill, España. pp. 23-52.
- Paris, C., Hadad, H. y A. Maine. 2005. Eficiencia de dos macrófitas flotantes libres en la absorción de metales pesados. *Limnetica*, 24 (3-4): 237-244.
- Quipuzco, E. 2002. Evaluación del comportamiento de dos pantanos artificiales instalados en serie con *Phragmites australis* para el tratamiento de aguas residuales domésticas. *Rev. Inst. Investig. Fac. Minas Metal. Cienc. Geogr*; 5: 52–57.
- Reed, S.C. y D. Brown. 1995. Subsurface flow wetlands a performance evaluation. *Water Environ Res*; 67(2):244–248.
- Rodríguez–Monroy J. y C. Durán-de-Bazua. 2006. Remoción de nitrógeno en un sistema de tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales de flujo vertical a escala de banco. *Tecnol. Ciencia Ed.* 21, 25–33.
- Romero A.M., Colín C. A., Sánchez S.E. y M.L. Ortiz. 2009. Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 25 (3): 157-167.
- Rousseau, D., Vanrolleghem, P. y N. De Pauw. 2004. Model-based design of horizontal subsurface flow constructed treatment wetlands: a review. *Water Research*: 38, 1484-1493.
- Silva, R.A.S. y H. D. Zamora. 2005. Humedales Artificiales. Trabajo de grado: Monografía. Universidad Nacional de Colombia. Manizales, Colombia.

- Soriano, M. C. 2009. Caracterización de la material particulada de la línea de aguas residuales de un sistema de humedales construidos. Tesis de Maestría. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Trinidad, G. E. 2006. Cuantificación de bacterias nitrificantes, desnitrificantes, fijadora de nitrógeno y heterótrofas de humedales artificiales sub-superficiales para el tratamiento de agua residual. Trabajo de pasantía como requisito de graduación. Universidad de Pamplona. Facultad de ciencias básicas. Pamplona, España.
- United States Environmental Protection agency (US EPA). 1999. Manual: Constructed Wetlands treatment of municipal wastewaters. EPA/625/R-99/010. Cincinnati, Ohio.
- Urquiza, M.E., Guzmán, R.R., Sánchez Q.S.T., Domínguez S.C. y H. A. Rivas. 2006. 2° foro académico nacional de Ingeniería y Arquitectura. Los humedales artificiales; una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales en comunidades rurales de Michoacán, México. Morelia, Michoacán, México. p. 202-210.
- Vymazal, J. 1998. Czech constructed wetlands database. Ecology and Use of Wetlands: Prague, Czech Republic.
- Vymazal, J., Czech Republic. In: Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M.B., Haberl, R., editor. 1998. Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe. Leiden: Backhuys Publishers. 366pp.
- Wood, A. 1995. Constructed wetlands in water pollution control: fundamentals to their understanding. *Water Sci Technol*; 32(3): 21–29.
- Zetina, M., Pat. R., Peniche, J. y V. Sauril. 1999. Estudio Sobre el uso de Macrófitas Sumergidas para el Tratamiento de Agua. *Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*. 3 (2): 41-51.