



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROTOTIPO DE UNA CELDA DE HUMEDAL ARTIFICIAL
PARA EL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL GENERADA
EN UN EDIFICIO DE OFICINAS**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:
EDER VILLASEÑOR HUIDOBRO

DIRECTOR DE TESIS:
DR. ENRIQUE CÉSAR VALDEZ



MÉXICO, DF

FEBRERO DE 2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

	Página
Introducción	1
Antecedentes	2
Objetivos de estudio	4
Alcances	4
Capítulo 1. Organismos de los humedales artificiales	5
1.1 Organismos responsables de la contaminación fecal	
1.2 Microorganismos patógenos	
1.3 Micobacterias	
1.4 Bacterias sulfo-reductoras	
1.5 Grupo de organismos indicadores	
Capítulo 2. Procesos biológicos	8
2.1 Procesos básicos	
2.1.1 Proceso de remoción físico	
2.1.2 Proceso de remoción biológico	
2.1.3 Proceso de remoción químico	
2.2 Origen de la biocenosis	
2.3 Acción de las bacterias	
2.4 Acción de los vegetales superiores	
2.4.1 Actuación pasiva de la vegetación en la depuración	
2.4.2 Procesos activos de la vegetación en la depuración	
Capítulo 3. Pretratamiento	17
3.1 Desbaste	
3.2 Sedimentación	
Capítulo 4. Principales tipos de humedales artificiales y conceptos básicos para el diseño ...	19
4.1 Tipos de humedales artificiales	
4.1.1 Humedales de flujo libre superficial (FLS)	
4.1.2 Humedales de flujo subsuperficial (FS)	
4.2 Carga hidráulica	
4.3 Retención hidráulica	
4.4 Profundidad	
4.5 Carga orgánica	
Capítulo 5. Factores condicionantes	24
5.1 Emplazamiento, suelo y dimensiones	
5.2 Topografía	
5.3 Características del suelo	
5.4 Clima y temperatura	
Capítulo 6. Vegetación de los humedales artificiales	32
6.1 Selección de las especies	
6.2 Especies recomendables	
6.3 Implantación	

Capítulo 7. Modelo general de diseño	39
7.1 Criterio hidráulico	
7.2 Modelo de diseño para humedales FLS	
7.3 Modelo de diseño para humedales de FS	
7.4 Aspectos térmicos en humedales FS	
7.5 Modelo de diseño para remoción de DBO en humedales FLS	
7.6 Modelo de diseño para remoción de DBO en humedales FS	
7.7 Rendimientos esperados	
Capítulo 8. Diseño de un sistema de humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales de un edificio de oficinas	54
8.1 Criterios de construcción	
8.2 Fases generales de construcción del humedal tipo FS	
8.2.1 Desmonte y despalle	
8.2.2 Excavación y compactación de las zanjas para los humedales	
8.2.3 Nivelación de las zanjas para los humedales	
8.2.4 Uso de impermeabilizantes entre el suelo y el agua residual	
8.2.5 Colocado de arena- grava en la celda de tratamiento	
8.2.6 Implantación de la vegetación	
8.3 Estructuras de entrada y descarga	
8.4 Consideraciones a tomar en cuenta en el momento de la construcción del humedal	
Apartado gráfico del sitio de interés	70
Conclusiones y recomendaciones	85
Anexo 1. Determinación del volumen total y obtención de muestras simples en el sitio de vertido actual	87
Anexo 2. Caracterización del agua residual de la DICyG	91
Glosario de Términos	96
Bibliografía	98

Introducción

Los humedales son complejos mosaicos de láminas de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie, en las que el suelo se mantiene saturado de agua durante un largo periodo de tiempo cada año. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm con plantas emergentes como espadañas, carrizos y juncos. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar (Figura 1.1). Los vegetales, animales y microorganismos especialmente adaptados a estos humedales, junto a procesos físicos y químicos, son capaces de depurar el agua, eliminando grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo y en algunos casos productos químicos tóxicos; por esta razón se ha llamado a los humedales “los riñones del mundo”.

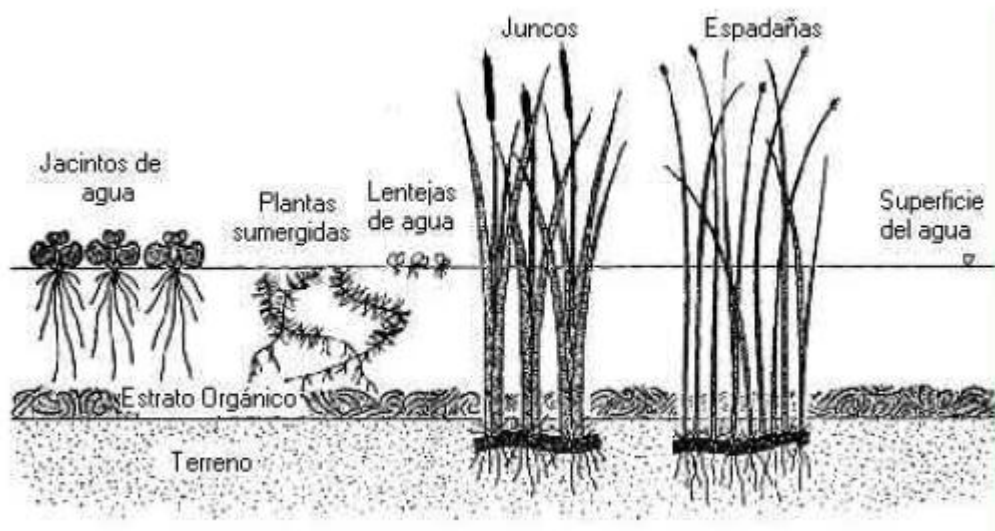


Figura 1.1. Plantas acuáticas comunes en un humedal

Los humedales son zonas de transición entre el medio terrestre y el acuático que sirven como enlace dinámico entre los dos. El agua que se mueve arriba y abajo del gradiente de humedad, asimila una variedad de constituyentes químicos y físicos en solución, ya sea como detritus o sedimentos, estos a su vez se transforman y transportan a los alrededores del paisaje. Dos procesos críticos dominan el rendimiento en el tratamiento de los humedales: la dinámica microbiana y la hidrodinámica. Los procesos microbianos son cruciales en la remoción de algunos nutrientes y en la depuración de las aguas residuales en los humedales.

Los humedales proveen sumideros efectivos de nutrientes y sitios amortiguadores para contaminantes orgánicos e inorgánicos. Esta capacidad es el mecanismo detrás de los humedales



artificiales para simular un humedal natural con el propósito de tratar las aguas residuales. Los humedales logran el tratamiento de las aguas residuales a través de la sedimentación, absorción y metabolismo bacterial, además de interactuar con la atmósfera.

Algunos humedales contruidos al inicio por investigadores, probablemente fueron el resultado de las observaciones de la capacidad de tratamiento evidente de humedales naturales. Se han documentado descargas de aguas residuales a humedales que se remontan a 1912. Estudios sobre humedales contruidos para tratamiento de aguas residuales se iniciaron en la década del cincuenta en el Instituto Max Planck en Alemania - USA, y se desarrollaron en los años setenta y ochenta. En los años noventa se vio un mayor incremento en el número de esos sistemas; su aplicación al tratamiento de agua residual municipal se extendió al tratamiento del agua de tormenta, industrial y residuos agrícolas. Autores como Kadlec Robert H. y Knight R. L. (1993) dan cuenta de una buena historia del empleo de humedales naturales y contruidos para el tratamiento de aguas residuales y disposición.

Los humedales habían sido usados a finales de los años noventa para disposición de aguas residuales; muchas descargas fueron a los humedales naturales. Otros vieron las aguas residuales como una fuente de agua y sustancias nutritivas para restauración o creación de humedales.

Antecedentes

Gran parte de lo referente a la hidrología, a la vegetación, a la evolución del agua en el suelo y a las transformaciones de la materia orgánica en relación agua – suelo – vegetación, de los humedales naturales, es válido para humedales artificiales.

Naturalmente, un humedal artificial tiene unas características propias en lo que se refiere a su condición de artificial. Los humedales artificiales, con un adecuado manejo, es decir, estimulando al máximo las propiedades depuradoras de la vegetación implantada, pueden aumentar las posibilidades y la eficacia del sistema comparadas con la acción de los humedales naturales en cuanto a la regularización de los sedimentos, al control de nutrientes y a la transformación o minimización de los contaminantes presentes en los aportes líquidos del humedal.

Desde un punto de vista hidrológico, una característica fundamental de los humedales es que el medio esencial, además del sustrato, es el agua, de la que en principio están saturados. Otra característica es la condición del agua presente como masa de tipo léntico, (en la que sus desplazamientos son lentos) lo que permite que se realice una serie de procesos físicos (sedimentación), químicos (reducción) y biológicos (fotosíntesis y crecimiento de las plantas).

En un humedal artificial se deben tener en cuenta los siguientes factores incidentes:

- Caudal del líquido a recibir
- Características de ese líquido (composición)
- Objetivos de instalación de ese humedal
- Sustrato apropiado
- Selección de la vegetación a implantar
- Condiciones ecológicas de la zona (temperatura, humedad, topografía, etc.)



- Parámetros de diseño:
 - Tiempo de retención hidráulica
 - Profundidad
 - Geometría y dimensiones
 - Carga admisible de DBO_5
 - Fluctuaciones de la carga hidráulica

Aparte de estos factores, se debe tener en cuenta que existen unos procesos de transporte de solutos a través de los fenómenos de difusión, advección y de dispersión que están regidos por las leyes de Fick y de Darcy.

Tabla 1.1. Procesos naturales en un humedal artificial

Fase	Proceso
Acción bacteriana	Conversión y transformación de contaminantes. En la transformación aerobia de los residuos orgánicos se consume oxígeno. Se realizan también transformaciones de productos orgánicos tóxicos. Siempre se reduce la DBO.
Absorción de oxígeno	Si la lámina líquida del humedal no está en saturación de oxígeno disuelto, lo toma de la atmósfera, en una aireación natural.
Desorción del oxígeno	Es la situación contraria.
Sedimentación	Se debe al movimiento lento del líquido, que hace que los sólidos en suspensión se depositen en el fondo. En ciertos casos se produce una floculación. En otros se producen turbulencias (en la entrada) que hacen que estos sólidos se distribuyan uniformemente por todo el humedal.
Degradación natural	La supervivencia de muchos organismos tiene un plazo limitado, por lo que gran parte de ellos muere pasado un período de tiempo del humedal. Por otra parte, la acción fotoquímica provoca la oxidación de muchos componentes orgánicos.
Adsorción	Muchos contaminantes químicos tienen que unirse por adsorción con diversos sólidos, lo que dependerá, en gran parte, de la cantidad y composición de estos presentes en la fase líquida en forma de suspensión. Esta adsorción se complementa después y casi siempre con la posterior sedimentación.
Volatilización	Los contaminantes volátiles presentes en el líquido se transfieren a la atmósfera.
Reacciones químicas	Representan fenómenos de hidrólisis, reacciones óxido-reducción.
Evaporación	Aparte de la volatilización y de la absorción de oxígeno, muchos gases que se pueden aportar con el afluente se pueden evaporar, y lo mismo ocurre con parte de la masa del humedal, que puede ver así reducido su volumen.

Mariano Seoáñez Calvo



Objetivos del estudio

Los objetivos del presente trabajo son describir los procesos biológicos, los factores condicionantes y el tipo de vegetación que se puede seleccionar para el establecimiento de una celda de humedal artificial con fines de depuración de aguas residuales, para aplicar estos conocimientos al diseño y construcción de un sistema para un edificio de oficinas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Recopilar e interpretar información sobre humedales artificiales.

Determinar la aportación y características de las aguas residuales generadas en la DICyG.

Determinar las dimensiones de la celda de humedal artificial con base a la carga orgánica de DBO en el afluente y las concentraciones necesarias de DBO en el efluente.

Describir las fases generales de construcción para una celda de humedal artificial.

Alcances

Proponer un sistema de tratamiento in situ para edificios similares que no cuenten con la conexión a un sistema de alcantarillado.

Los levantamientos de campo, aforo, muestreo y análisis de laboratorio de muestras de agua residual que incluye el presente trabajo se refieren únicamente a las instalaciones sanitarias del edificio de la DICyG.

El trabajo incluirá alternativas generales para el diseño y construcción, cualquier detalle adicional deberá revisarse en su momento.



Capítulo 1. Organismos de los humedales artificiales

En este capítulo se describen los organismos que posiblemente sean encontrados en los humedales artificiales, tales como los responsables de la contaminación fecal, microorganismos patógenos, micobacterias, bacterias sulfo-reductoras y grupos de organismos indicadores. Más adelante se hará mención de aquellos organismos que son de utilidad para el tratamiento de aguas residuales.

1.1. Organismos responsables de la contaminación fecal

Se consideran organismos exclusivamente fecales: *Escherichia coli*, coliformes fecales y estreptococos fecales. El valor indicador de cada uno de ellos no es el mismo, hecho que hay que considerar en el momento de interpretar los exámenes bacteriológicos, cuando sea necesario.

El interés como indicador de este grupo de organismos obedece a la presencia de gran número de ellos en las materias fecales de los seres humanos y, en general, de los animales de sangre caliente y a su resistencia a los agentes antisépticos, sobre todo al cloro y a sus derivados.

1.2. Microorganismos patógenos

Muchas enfermedades infecciosas se transmiten al hombre por ingestión de agua o alimentos contaminados. Entre las bacterias transmisoras de enfermedades que se encuentran en las aguas, y para las que se han desarrollado técnicas de investigación, se tienen: *Salmonella*, *Shigella*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Vibrio cholérico*. Estos organismos no se detectan en los análisis rutinarios del agua. Los test especiales de detección sólo se llevan a cabo cuando se han observado casos patológicos.

1.3. Micobacterias

Son indicadores de la contaminación en las aguas usadas en general; este tipo de microorganismos se caracteriza por ser aerobios estrictos, inmóviles, de morfología variable (bacilar o cocoide), que no forman esporas y no poseen flagelos ni cápsula. En cambio, poseen una pared celular gruesa y con un elevado contenido lipídico que supone el 60% del peso seco de la misma.

En general, las necesidades nutritivas de las micobacterias son sencillas, requiriendo una fuente de carbono (glicerol) y nitrógeno (amonio o aminoácidos) así como determinadas sales minerales. Por otro lado, el crecimiento de las micobacterias se ve estimulado por la presencia de CO_2 y ácidos grasos.

Un aspecto relevante de estos microorganismos es su mayor resistencia, respecto a otras bacterias no formadoras de esporas, a los ácidos, álcalis y determinados desinfectantes químicos. Además, son muy resistentes a la desecación o congelación, lo que les permite sobrevivir durante semanas o meses en el medio, sin embargo, deben permanecer al abrigo de la luz del sol ya que los rayos ultravioleta son letales para los mismos, su temperatura óptima de crecimiento general suele ser de 35-37 °C.



1.4. Bacterias sulfo-reductoras

Se encuentran generalmente en el suelo, en las aguas salinas y dulces: pozos, ríos, lagos, etc. También aparecen frecuentemente en las aguas tratadas y distribuidas para abastecimiento doméstico e industrial. Su presencia está relacionada con la existencia de materias orgánicas, y su proliferación da lugar a la formación de gases malolientes (SH_2). Además este tipo de bacterias poseen un alto poder destructivo, por ejemplo, en la corrosión de tuberías que transportan agua, tuberías de gas y de petróleo, que afectan los procesos de la producción, generando serios problemas económicos a las industrias.

1.5. Grupo de organismos indicadores

Es importante anotar que, además de los patógenos que tradicionalmente se encuentran en el agua y que son causantes de las enfermedades de origen hídrico, cada vez es más frecuente que estas enfermedades estén relacionadas con la presencia de microorganismos emergentes y reemergentes.

Las enfermedades emergentes son aquellas cuya incidencia en los seres humanos ha aumentado en los últimos años, es decir, a finales del siglo XX (dengue, cólera, resistencia microbiana). Las enfermedades reemergentes son las que reaparecen después de una disminución significativa en su incidencia (malaria, tuberculosis, peste).

Los microorganismos indicadores son aquellos que tienen un comportamiento similar a los patógenos (concentración y reacción frente a factores ambientales y barreras artificiales), pero son más rápidos, económicos y fáciles de identificar.

Una vez que se ha evidenciado la presencia de grupos indicadores, se puede inferir que los patógenos se encuentran presentes en la misma concentración y que su comportamiento frente a diferentes factores como pH, temperatura, presencia de nutrientes, tiempo de retención hidráulica o sistemas de desinfección es similar a la del indicador.

Un microorganismo indicador de contaminación fecal debe reunir las siguientes características:

- Ser un constituyente normal de la flora intestinal de individuos sanos
- Estar presente, de forma exclusiva, en las heces de animales homeotérmicos
- Estar presente cuando los microorganismos patógenos intestinales lo están
- Presentarse en número elevado, facilitando su aislamiento e identificación
- Debe ser incapaz de reproducirse fuera del intestino de los animales homeotérmicos
- Su tiempo de supervivencia debe ser igual o un poco superior al de las bacterias patógenas
- No debe ser patógeno

No existe ningún microorganismo que reúna todos los criterios de un indicador ideal y apenas algunos grupos satisfacen algunos de estos requisitos.



Tabla 1.2. Factores de eliminación de patógenos en un humedal artificial y sus funciones

Factor	Función
Suelo-sustrato	Sedimentación Filtración
Vegetación	Filtración Producción de antibióticos (las raíces)
Aire	Absorción-eliminación
Temperatura-humedad	Limitación de la supervivencia de los patógenos
Radiación solar	Acción de los rayos ultravioleta (humedales FLS)

Mariano Seoáñez Calvo



Capítulo 2. Procesos biológicos

En este capítulo se describen los procesos básicos de remoción de contaminantes y se pretende reafirmar su importancia y su interdependencia en los procesos de tratamiento (físicos, químicos y biológicos). Por otro lado, y aunque no es nuestro objetivo estudiar las bacterias, se mencionan de una manera general y según su clasificación, los diferentes tipos que de ellas están presentes en los humedales artificiales, (tanto patógenas como aquellas que nos ayudan al tratamiento de las aguas residuales) y algunas de sus funciones básicas de acuerdo a su especialidad. La actuación de los vegetales superiores, se menciona como una necesidad de conocer cómo contribuyen al tratamiento activo y pasivo para la remoción de contaminantes, haciendo énfasis en las ventajas en su utilización.

2.1. Procesos básicos

El proceso general a través del humedal consiste en la entrada de aguas residuales procedentes de los vertidos urbanos, en su paso, estancia en el humedal artificial y en la salida de un efluente, cuyo caudal ha sido despojado de gran parte de los productos ajenos a la composición normal del agua que habían sido aportados durante su uso urbano.

Se observa que los aportes están comúnmente constituidos por las aguas residuales afluentes y por la entrada de luz y calor. Esto hace que se desarrollen plantas fotosintéticas y los microorganismos capaces de soportar la composición de las aguas residuales que se vierten.

2.1.1. Proceso de remoción físico

Los humedales son capaces de proporcionar una alta eficiencia física en la remoción de contaminantes asociados con material particulado. El agua superficial se mueve muy lentamente a través de los humedales, debido al flujo laminar característico, la resistencia proporcionada por las raíces y las plantas flotantes, por lo que la baja velocidad de flujo facilita la sedimentación de los sólidos suspendidos.

Las esteras de plantas en los humedales pueden servir como trampas de sedimentos, pero su función primordial es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la resuspensión de material particulado.

La eficiencia de remoción de sólidos suspendidos es proporcional a la velocidad de las partículas y a la longitud del humedal. Para propósitos prácticos, la sedimentación es usualmente considerada como un proceso irreversible, resultando en acumulación de sólidos y contaminantes asociados sobre la superficie del suelo del humedal. Sin embargo, la resuspensión puede reducir la eficiencia de remoción. Algo de resuspensión podría ocurrir durante periodos de velocidad de flujo alta en el humedal.

Más comúnmente la resuspensión es el resultado de la turbulencia causada por el viento, bioturbación (perturbación por animales y humanos) y desprendimiento de gas. El desprendimiento



de gas puede ser oxígeno, debido a la fotosíntesis, metano y dióxido de carbono, producido por los microorganismos en el sedimento durante la descomposición de la materia orgánica.

2.1.2. Proceso de remoción biológico

La remoción biológica es quizá el camino más importante para la remoción de contaminantes en los humedales. Los contaminantes, que son también formas de nutrientes esenciales para las plantas, como nitrato, amonio y fosfato, son tomados fácilmente por las plantas del humedal. Sin embargo, muchas especies de plantas del humedal son capaces de captar, e incluso acumular significativamente metales tóxicos, como cadmio y plomo (difícilmente encontrados en una descarga de la DICyG). La velocidad de remoción de contaminantes por las plantas varía mucho, dependiendo de la velocidad de crecimiento de la planta y de la concentración del contaminante en su tejido. Las bacterias y otros microorganismos presentes en el suelo también proveen, captan y almacenan nutrientes a corto plazo.

En los humedales el material de la planta muerta conocido como detritus, se acumula en la superficie del suelo. Algunos de los nutrientes u otros elementos eliminados previamente del agua por captación de la planta son reciclados nuevamente dentro del agua y suelo por pérdidas del detritus de la planta debido a la lixiviación y descomposición. La lixiviación de contaminantes solubles en agua puede ocurrir rápidamente en la muerte de la planta o del tejido de la misma, mientras que una pérdida más gradual de contaminantes ocurre durante la descomposición del detritus por las bacterias y otros organismos.

En la mayoría de los humedales, hay una acumulación significativa del detritus, porque la velocidad de descomposición disminuye sustancialmente bajo condiciones anaerobias que prevalecen generalmente en el suelo del humedal.

La velocidad de descomposición de la materia orgánica es más baja que la velocidad de sedimentación de la misma en el suelo, dando lugar a la formación de turba en el humedal pasado largo tiempo. De esta manera, algunos de los contaminantes captados originalmente por las plantas se pueden atrapar y almacenar como turba. La turba se puede acumular en los humedales y de esta forma almacenar por largo tiempo los contaminantes. Sin embargo, la turba es también susceptible a la descomposición si el humedal se drena. Cuando sucede eso, los contaminantes incorporados en la turba se pueden liberar, reciclar ó limpiar con un chorro de agua.

Los microorganismos pueden proporcionar una cantidad medible de contaminante captado y almacenado en sus procesos metabólicos, que desempeñan el papel más significativo en la remoción de compuestos orgánicos, sobre todo las bacterias del suelo que utilizan el carbono (C) de la materia orgánica como fuente de energía, convirtiéndola a gases de dióxido de carbono (CO₂) o metano (CH₄).

La eficiencia y la velocidad de degradación orgánica de C por los microorganismos es altamente variable para los diversos tipos de compuestos orgánicos. El metabolismo microbiano también produce la remoción de nitrógeno inorgánico, es decir, nitrato y amonio.

Bacterias especializadas (*pseudomonas* sp) transforman metabólicamente el nitrato en gas nitrógeno (N₂), un proceso conocido como desnitrificación. El N₂ se pierde posteriormente a la atmósfera.

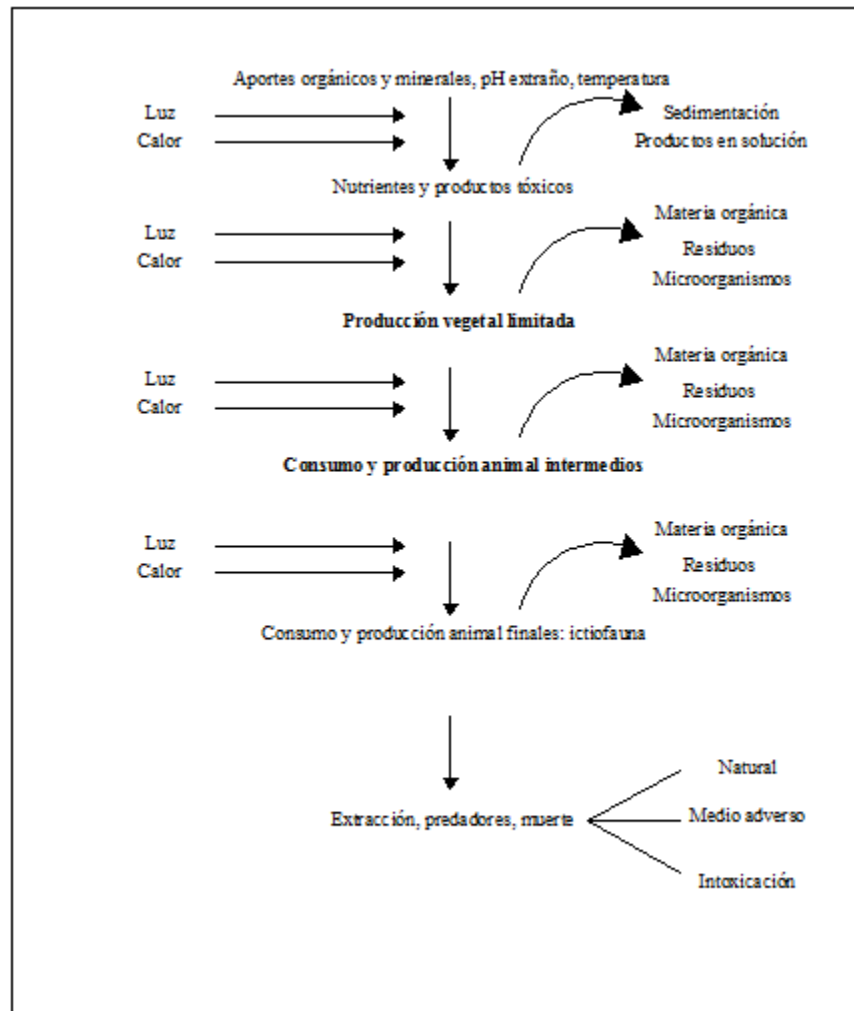


Figura 2.1. Procesos biológicos básicos en un humedal

2.1.3. Proceso de remoción química

El proceso químico más importante de remoción es la absorción, que da lugar a la retención a corto plazo o a la inmovilización a largo plazo de varias clases de contaminantes.

La absorción es un término ampliamente definido para la transferencia de los iones (moléculas con cargas positivas o negativas) a partir de la fase de la solución (agua) a la fase sólida (suelo). La absorción describe realmente un grupo de procesos, que incluye reacciones de adsorción y de precipitación. La adsorción se refiere a la unión de iones a las partículas del suelo, por intercambio catiónico. El intercambio catiónico implica la unión física de los cationes (iones positivamente cargados) a las superficies de las partículas de la arcilla y de la materia orgánica en el suelo. Esto es una unión mucho más débil que la unión química, por lo tanto, los cationes no se inmovilizan permanentemente en el suelo.

Muchos componentes de las aguas residuales y de escurrimiento existen como cationes, tal es el caso del amonio (NH_4^+).



La capacidad de los suelos para la retención de cationes, expresada como capacidad de intercambio catiónico, aumenta generalmente con el aumento de contenido de la arcilla y de la materia orgánica.

La absorción química representa una forma más fuerte y más permanente de vinculación que el intercambio catiónico. El fosfato también puede unirse con la arcilla y los óxidos de Fe y Al a través de la absorción química. El fosfato puede también precipitarse con los óxidos de hierro y aluminio para formar un nuevo mineral compuesto (fosfatos de Fe y Al), que son potencialmente muy estables en el suelo, produciendo el almacenamiento de fósforo a largo plazo. Otra reacción importante de precipitación que ocurre en los suelos del humedal es la formación de sulfuros de metales.

Tales compuestos son altamente insolubles y representan los medios eficaces para inmovilizar muchos metales tóxicos en humedales. La volatilización, que implica la difusión de un compuesto disuelto en el agua a la atmósfera, es otro mecanismo potencial de la remoción del contaminante en los humedales. La volatilización del amoníaco (NH_3) puede dar lugar a la remoción significativa de nitrógeno si el pH del agua es alto (mayor que 8.5). Sin embargo, un pH más bajo de 8.5, el nitrógeno del amoníaco existe casi exclusivamente en forma ionizada (amonio, NH_4^+), que no es volátil. Muchos tipos de compuestos orgánicos son volátiles y se pierden fácilmente a la atmósfera desde los humedales y de otras aguas superficiales. Aunque la volatilización puede remover con eficacia ciertos contaminantes del agua, puede demostrar ser indeseable en algunos casos, debido al potencial para contaminar el aire con los mismos contaminantes.

2.2. Origen de la biocenosis

Los organismos presentes en un humedal artificial pueden tener el siguiente origen:

- Por impartición directa: vegetales básicos, ictiofauna
- Por aporte de las aguas residuales afluentes
- Por presencia en el sustrato
- Por hibernación
- Por depósito
- Por llegada de adultos provenientes de otras zonas: aves, insectos
- Por aporte anemófilo
- Por aporte entomófilo
- Por aporte zoógamo en general
- Por aporte hidrogámico

Las especies presentes se pueden multiplicar de diversas formas, a saber:

- Existen especies de una generación anual: moluscos, tricoptera
- Existen especies de una generación plurianual: larvas grandes de coleópteros, odonata, etc.
- Existen especies de múltiples generaciones anuales: rotíferos, etc.

Los factores condicionantes básicos de esta multiplicación son la disponibilidad de nutrientes, la temperatura y la composición del medio.



2.3. Acción de las bacterias

Las bacterias presentes en las aguas residuales son la llave de la eficacia biológica en la unidad de tratamiento del humedal artificial. Las bacterias pueden convertir el material orgánico soluble presente en las aguas residuales, en nuevas células y elementos inorgánicos. Estos materiales alternadamente, proporcionan el alimento para otros organismos, por lo que se puede afirmar que su función básica es el consumo de materia orgánica y la degradación o la transformación de contaminantes en las aguas residuales que se aportan, esto gracias a la producción de enzimas que atacan o digieren los múltiples productos.

Las bacterias presentes, muy diversas, degradan tanto los productos orgánicos básicos como son las proteínas, lípidos, almidón o celulosa, como productos de descomposición. Las poblaciones bacterianas, si el medio es favorable, pueden crecer muy rápidamente y transformar así con gran aceleración fuertes cantidades de nutrientes y de otros productos.

Generalmente estos microorganismos son móviles o inmóviles de formas diversas, (cocos, bacilos, espirillos, filamentosas) de tamaño, modo de vida diferente según la especie y el medio, se multiplican por división celular y su velocidad de reproducción puede ser frenada por varias causas, como por ejemplo:

- Naturaleza de la bacteria
- Temperatura
- Disminución de alimentos y del oxígeno disuelto
- Acumulación de productos metabólicos tóxicos
- Variaciones de pH al aparecer ácidos, productos amoniacales, etc.
- Competencia vital

Según su nutrición se pueden clasificar en:

a) Bacterias parásitas

Son las que han tenido como huésped al hombre o los animales; suelen ser patógenas y producir enfermedades como tifus, cólera, disentería, etc.

b) Bacterias saprófitas

Son las que se nutren de los sólidos orgánicos residuales y provocan descomposiciones fundamentales en los procesos de depuración.

Según el medio, se pueden clasificar en:

a) Bacterias aerobias

Son aquellas que necesitan oxígeno procedente del agua para su alimento y respiración. El oxígeno disuelto que les sirve de sustento es el oxígeno libre (molecular) del agua, y las descomposiciones y degradaciones que provocan sobre la materia orgánica serán procesos aerobios; estos procesos se caracterizan por la ausencia de malos olores.



b) Bacterias anaerobias

Son las que consumen oxígeno procedente de los sólidos orgánicos e inorgánicos y la presencia de oxígeno disuelto no les permite subsistir. Los procesos que provocan se caracterizan por la presencia de malos olores.

c) Bacterias facultativas

Algunas bacterias aerobias y anaerobias pueden llegar a adaptarse al medio opuesto, es decir, las aerobias a un medio sin oxígeno disuelto y las anaerobias a aguas con oxígeno disuelto.

d) Bacterias autótrofas

Son aquellas que pueden sustentar su protoplasma a partir de sustancias minerales como anhídrido carbónico, sulfatos, fosfatos, carbonatos, etc.

Las bacterias pueden ser clasificadas de varias formas; sin embargo, lo más importante desde el punto de vista de la ingeniería es la acción operacional. Según R. Dinges, las bacterias más frecuentes en un humedal artificial, que son en gran parte las mismas que pueden aparecer en un humedal natural, son las que se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Tipos de bacterias según su especialidad

Hidrolizan N orgánico a N amoniacal	Clostridium Proteus Micrococcus
Oxidán N amoniacal a nitritos	Nitrosomonas Nitrosolobu Nitrosospira Nitrosova Nocardia Streptomyces
Oxidán nitritos a nitratos	Nitrobacter Nitrococcus Nitrospina
Desnitrificación en medio anaerobio	Bacillus Pseudomonas
Reducen compuestos de S a sulfuros	Desulfovibrio Desulfotomaculum
Oxidán sulfuros a S elemental	Thiobacillus Thiobacterium Thiospira



Bacterias fotosintéticas que oxidan sulfuros a S	Chromatium Rhodomicrobium Rhodopseudomonas Rhodospirillum Thiocaspa Thiospirillum
Bacterias verdes oxidantes de sulfuros	Chlorobium Chloropseudomonas Clathrochloris Pelodictyon
Bacterias metanógenas	Methanobacterium Methanococcus Methanosarcina
Bacterias que metabolizan el metano	Methylococcus Methylomonas
Enterobacterias	Citrobacter Edwardsiella Enterobacter Escherichia Hafnia Klebsiella Proteus Salmonella Shigella

2.4. Acción de los vegetales superiores

El rasgo que mejor define a los vegetales es el hecho de que son seres vivos fotosintéticos (exceptuando plantas parásitas), por lo que su nutrición es de tipo autótrofo. La fotosíntesis les confiere la capacidad de utilizar como fuente de carbono un compuesto inorgánico, el dióxido de carbono, para desarrollarse y así generar materia orgánica; es lo que conforma la denominada producción primaria en el planeta. En el curso de la evolución, ha sucedido el desarrollo progresivo de los vegetales desde organismos muy elementales (algas unicelulares procarióticas) a organismos muy evolucionados (plantas superiores) que incorporan mecanismos sofisticados de adaptación al ambiente terrestre.

Unas veces complementan la actuación de las demás biocenosis del humedal artificial al consumir como nutrientes los productos transformados por los demás seres vivos presentes, otras veces transforman directamente en materia viva nutrientes aportados también directamente por el afluente.

Por otra parte, incorporan a sus ciclos metabólicos micronutrientes muy diversos, son capaces de captar metales pesados y otros productos más o menos tóxicos que suelen quedar bloqueados físicamente en las células, en los estomas o en los espacios intercelulares, con lo que al fin y al cabo consiguen depurar el líquido al extraerlos de él, aunque la gran labor de captación de algunos contaminantes la realiza el sustrato orgánico del humedal en un porcentaje muy superior al que puede alcanzar la acción de la vegetación.

A continuación se enlistan las contribuciones principales al tratamiento del agua residual y escorrentía por parte de las plantas emergentes de varias maneras:

- Estabilizan el sustrato

- Dan lugar a velocidades de agua bajas y permiten que los materiales suspendidos se depositen
- Toman el carbono, nutrientes, elementos traza y los incorporan a los tejidos de la planta
- Transfieren gases a la atmósfera
- El escape de oxígeno desde las estructuras subsuperficiales de las plantas, oxigena otros espacios dentro del sustrato
- El tallo y los sistemas de la raíz dan lugar a sitios para la fijación de microorganismos

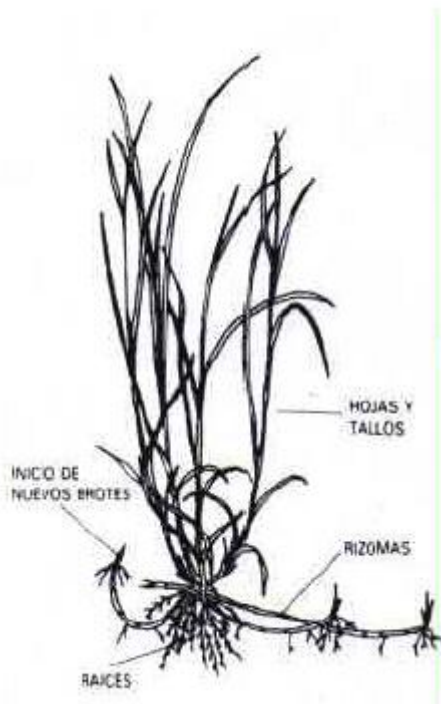


Figura 2.2. Esquema típico de una planta emergente

2.4.1. Actuación pasiva de la vegetación en la depuración

En el balance global de las funciones que desempeña la vegetación en los humedales artificiales, los procesos físicos suponen la función más importante de las plantas para la eficacia depuradora del sistema.

En primer lugar las macrófitas pueden ejercer funciones de desbaste, reteniendo los sólidos gruesos arrastrados por el agua residual. También actúan como barrera física para el flujo del agua residual, reducen la velocidad del afluente, lo que favorece la floculación y sedimentación de partículas en suspensión.

Además, las partes de las plantas que están en contacto con el afluente, actúan como soporte pasivo de microorganismos y crean en sus proximidades ambientes propicios para el desarrollo de estos; es decir, las plantas crean una enorme área superficial para el desarrollo de “bio-películas”, en las que crecen bacterias, protozoos y algas microscópicas.



También son de reseñar las actuaciones pasivas que se refieren a la parte aérea de las plantas. Cuando la vegetación tiene un determinado porte, como ocurre con plantas acuáticas emergentes, la vegetación tiene un cierto efecto amortiguador de las temperaturas extremas y otros fenómenos atmosféricos, ya que aísla la superficie del agua, intercepta lluvia y nieve, reduciendo las pérdidas de calor que eventualmente se producen por el viento.

2.4.2. Procesos activos de la vegetación en la depuración

Con respecto a las funciones que desempeñan activamente las plantas en los humedales artificiales, hay que destacar el intercambio gaseoso desde las hojas hacia la zona radicular en contacto con el agua residual y la extracción de contaminantes del agua. Las plantas adaptadas a vivir en aguas con elevada carga orgánica, utilizan su propia energía procedente de la energía solar captada por fotosíntesis enviando el oxígeno del aire hasta sus raíces a través de un sistema conductor muy especializado. Esto favorece la degradación de la materia orgánica del entorno de las raíces por medio de los microorganismos que viven asociados al sistema radicular de la planta.

También las macrófitas pueden ejercer una depuración directa por la absorción de iones contaminantes, tanto metales pesados como aniones eutrofizantes, nitratos y fosfatos principalmente.

Tabla 2.2. Funciones principales de las plantas en sistemas de tratamiento acuático

Raíces y/o tallos en la columna de agua	<ul style="list-style-type: none">• Superficie sobre la cual la bacteria crece• Medio de filtración y adsorción de sólidos
Tallos y/o hojas sobre la superficie de agua	<ul style="list-style-type: none">• Atenúan la luz del sol y así previenen el crecimiento de algas• Reducen los efectos del viento en el agua• Importante en la transferencia de gases para y desde las partes sumergidas de la planta

Tchobanoglous, G

La capacidad de transferencia de oxígeno por las plantas se estima entre 0-3 g O₂/m²/día, equivalente a 30 kg de DBO₅/ha/día, muy bajo para las cargas usuales del agua residual. Por otra parte la transferencia de oxígeno desde la atmósfera se estima entre 0-0.5 g de O₂/m²/día.

La muerte de las plantas puede volver a liberar estos elementos al agua, por lo que sería necesario un frecuente cosechado de plantas antes de que esto suceda.



Capítulo 3. Pretratamiento

En este capítulo se menciona en qué consiste el proceso previo al cual el agua residual debe ser sometida al entrar a la celda del humedal ó en su caso durante su paso y estancia en el mismo. Debe tenerse en cuenta en cada caso qué tipo de descargas se van a tratar y el tipo de partículas que se pretende retirar.

3.1. Desbaste

Previamente al tratamiento propiamente dicho de un agua residual, ésta misma debe someterse a una serie de operaciones físicas con el propósito de retirar las materias que por sus propiedades o tamaño podrían dificultar posteriormente su tratamiento.

La retirada de los sólidos de cierto tamaño se puede efectuar mediante el proceso llamado desbaste, consistente en un tamizado de agua a través de rejillas de un determinado tamaño de luz. Según la malla concreta, se puede hablar de desbaste fino, con rejillas cuya separación es menor a 10 mm, desbaste medio, en la que las rejillas se hallan separadas entre 10 y 25 mm, y finalmente el desbaste grueso o predesbaste, con rejillas de luz superior a 5 cm. El orden, en general, de aplicación de los desbastes irá del citado en último lugar al citado en primero.

Teniendo en cuenta una distinción entre rejillas y tamices, se puede mencionar que las rejillas presentan aberturas mayores de 25 mm mientras que en los tamices no serán superiores a 6 mm. Las rejillas se utilizan para separar los sólidos grandes, que puedan producir obturaciones en conducciones u otros elementos; mientras que los tamices se usan para el tratamiento primario como para la eliminación de sólidos en suspensión. La limpieza de las rejillas en este caso, se puede realizar manualmente.

3.2. Sedimentación

Las aguas residuales suelen contener materias en estado sólido, de las que unas, por su gran densidad y tamaño, se depositan enseguida en el fondo, y otras, menores, permanecen en suspensión en el líquido, y cuando éste sufre un proceso de tipo léntico, laminar y estático, se decantan y poco a poco siguen el mismo camino que las partículas mayores.

Este proceso es la base del sistema natural de separación de los sólidos en suspensión de las aguas residuales. El tiempo de sedimentación natural de una partícula contenida en un agua residual depende de su densidad y de su tamaño, por lo tanto siendo variable en función de esas características. Así, las partículas de arena de 1 mm de diámetro tardan en promedio 10 segundos en descender 1 m; una bacteria puede tardar 8 días, por lo que lógicamente las partículas más finas, proporcionalmente, tardan más tiempo en descender.

Las partículas presentes en el agua residual están sometidas a la fuerza de la gravedad, que hace que tiendan a bajar, y a las fuerzas de rozamiento debidas a la trayectoria de la partícula a través del fluido, que se oponen al desplazamiento provocado por la gravedad. La fuerza resultante es la diferencia entre ambas y es con estas consideraciones con las que se estableció la ley de Stokes:



$$V_p = \frac{g(\rho_p - \rho_l).d^2}{18\eta}$$

donde:

V_p = Velocidad de sedimentación de una partícula

g = Aceleración de la gravedad

ρ_p = Densidad de la partícula

ρ_l = Densidad del agua residual

d = Diámetro aparente de la partícula

η = Viscosidad dinámica del agua (varía con la temperatura, aumentando si baja ésta).

La ley de Stokes prácticamente se puede aplicar sólo para partículas discretas, del tipo de grano de arena, que mantiene todas sus propiedades invariables a lo largo del proceso, al contrario de lo que ocurre si se realiza una floculación, que puede considerarse un proceso no ecológico.

En principio existen cuatro tipos de sedimentación que dependen de las partículas y de su concentración, y son:

- Sedimentación de partículas discretas. Las partículas conservan sus propiedades físicas iniciales de tamaño, forma y densidad durante la sedimentación. La velocidad de sedimentación es independiente de la concentración de sólidos, por lo que en este caso, es válida la ley de Stokes.
- Sedimentación de partículas floculentas. Este sistema se aplica en tecnologías convencionales de tratamiento de aguas residuales, en el que se realiza una aglomeración de las partículas, con lo que se alteran sus propiedades iniciales de tamaño, forma, densidad y velocidad de caída, para conseguir mayor efectividad. En este caso mientras no se utilicen métodos mecánicos, físico-químicos o químicos para potenciar el proceso, como pueden ser una inyección de aire, una aspiración, etc. que requieran espacio y consumo de energía, y en muchos casos de productos químicos, el sistema puede considerarse como natural.
- Sedimentación frenada. Se basa en la presencia de una elevada concentración de partículas, lo que hace que éstas formen una capa o zona de decantación lenta separada de los sólidos sedimentados del fondo y del líquido sobrenadante que está encima.
- Sedimentación en compresión de lodos. Las partículas entran en contacto con otras y reposan sobre las capas inferiores. En la capa que ocupan la consolidación es lenta.

Es un sistema que se emplea como pretratamiento cuando existen vertidos con sólidos en suspensión. Se hace sedimentar la materia en suspensión, con lo cual puede ser separada del resto del efluente en forma de lodos, facilitando así el tratamiento o la recuperación posteriores.

El material orgánico es ligeramente más pesado que el agua y se sedimenta lentamente, normalmente en el intervalo de 1 a 2.5 m/h.



Capítulo 4. Principales tipos de humedales artificiales y conceptos básicos para el diseño

En este capítulo se describen los dos principales tipos de humedales artificiales, además de hacer mención de los conceptos básicos a utilizar para el diseño de la celda de tratamiento, que se presentará posteriormente.

4.1. Tipos de humedales artificiales

Los humedales específicamente contruidos con el propósito de controlar la contaminación del agua han recibido gran cantidad de nombres en las distintas partes del mundo donde han sido usados. La denominación más extendida es “humedales artificiales” o “humedales contruidos”.

En tratamiento de aguas residuales, generalmente se consideran humedales aquellos sistemas que usan macrófitas (plantas que se ven a simple vista), en contraposición a las micrófitas (generalmente microalgas).

Las clasificaciones más recientes de humedales artificiales se hacen en función de la presencia o no de una superficie libre de agua en contacto con la atmósfera:

-“Free water surface” ó humedales de flujo libre superficial (FLS): Las plantas acuáticas están enraizadas en el fondo del humedal y el flujo de agua se hace a través de las hojas y tallos de las plantas.

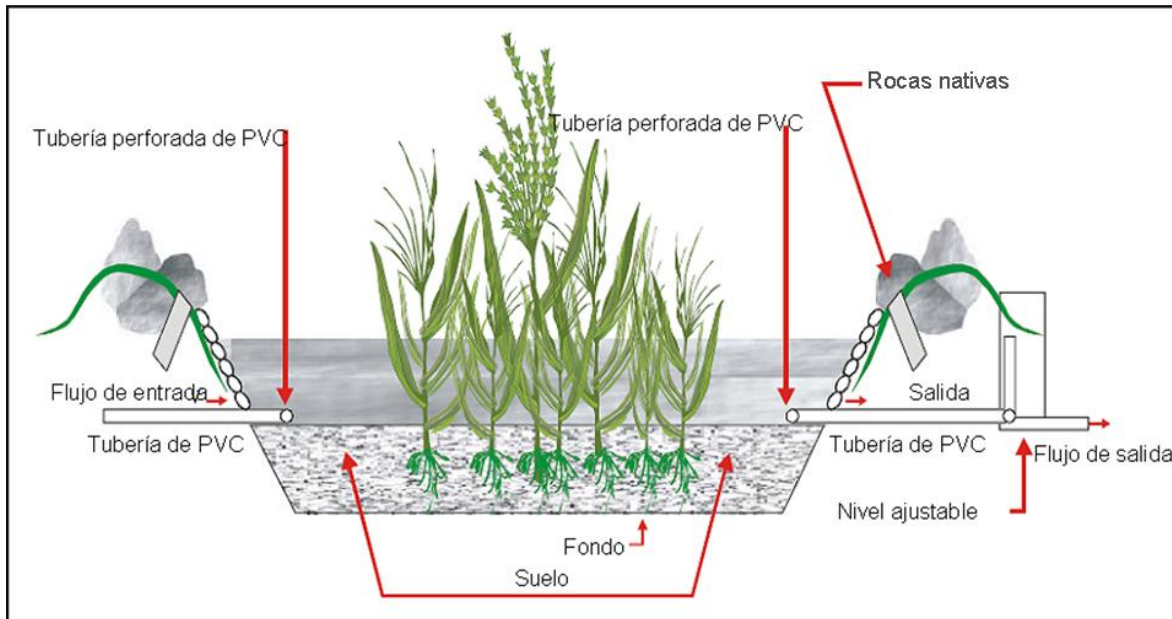
-“Vegetable submerged bed”: La lámina de agua no es visible, y el flujo atraviesa un lecho relleno con arena, grava o suelo, donde crecen las plantas, que sólo tienen las raíces y rizomas en contacto con el agua. Son equivalentes a los humedales de flujo subsuperficial (FS); tienen la ventaja de no producir olores ni mosquitos y de ocupar menos terreno, pero los procesos en su interior son en su mayoría anaerobios.

4.1.1. Humedales de flujo libre superficial (FLS)

Se definen como humedales artificiales de flujo libre superficial aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. En los humedales FLS el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga.

Cada sistema tiene estructuras adecuadas de entrada y descarga para asegurar una distribución uniforme del agua residual aplicada y su recolección. La vegetación emergente más comúnmente utilizada en humedales FLS incluye espadañas y aneas (typha), juncos (scirpus) y carrizos (phragmites). En sistemas diseñados principalmente para tratamiento, es común que sólo se seleccionen una o dos especies para la siembra.

La profundidad del agua en las porciones con vegetación de estos sistemas va desde unas pocas pulgadas hasta más de 60 cm.



(Modificado). U.S. EPA

Figura 4.1. Humedal artificial FLS

4.1.2. Humedales de flujo subsuperficial (FS)

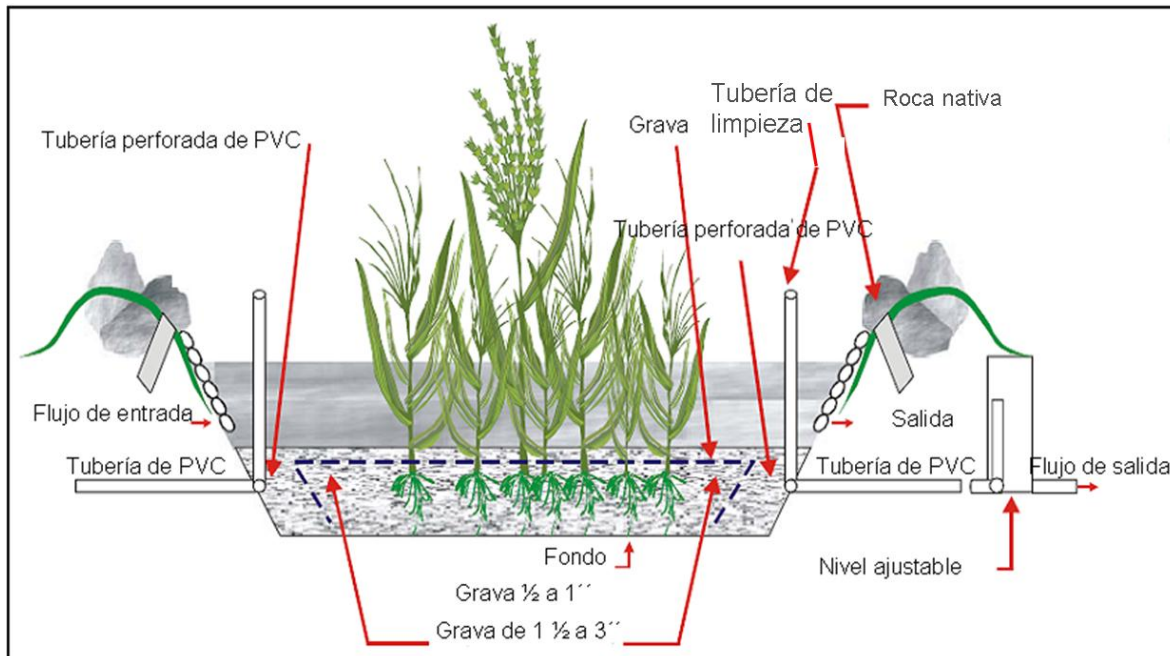
Un humedal artificial de flujo subsuperficial (FS), está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. La grava es el medio más utilizado aunque también se puede utilizar roca triturada, arena y otro tipo de materiales del suelo.

El nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio ya que las principales ventajas de mantener un nivel subsuperficial del agua son la prevención de mosquitos, malos olores y la eliminación del riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada.

En humedales FS el sustrato sumergido disponible incluye las raíces de las plantas que crecen en el medio, y la superficie misma del medio.

Las metas de diseño de los humedales FS artificiales son exclusivamente las funciones de tratamiento porque las posibilidades de proporcionar hábitat de vida silvestre y recreación pública son más limitadas que en el caso de los humedales FLS.

La vegetación emergente más comúnmente utilizada en humedales FS incluye las espadañas y aneas (typha), juncos (scirpus) y carrizos (phragmites), éste tipo de vegetación se describe más adelante.



(Modificado). U.S. EPA

Figura 4.2. Humedal artificial FS

Tabla 4.1. Comparación entre los sistemas FLS y FS

Humedales de flujo libre superficial	Humedales de flujo subsuperficial
<ul style="list-style-type: none"> • Superficie libre de agua • Flujo de circulación del agua en lámina libre sobre un lecho en el que enraízan los vegetales del humedal • Son más frecuentes (en USA el 70 %) • Menor costo de instalación • Hidráulica sencilla • Tienen gran parte de las propiedades de los humedales naturales • Favorecen la vida animal • Las bajas temperaturas provocan descensos en el crecimiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Lecho vegetal sumergido • Flujo sumergido, a través de un medio granular • Hidráulica más complicada • Son menos frecuentes (en USA el 20%) • Tratamiento más eficaz • Necesitan poco espacio • Flujo oculto • Sin malos olores • Soportan bien temperaturas bajas • Algo más caros que los FLS • Pocos problemas con la fauna



4.2. Carga hidráulica

En principio, se debe indicar que cada humedal artificial tiene entradas y salidas. El material que entra puede provenir, en la mayoría de los casos, de tratamientos previos, de tratamientos complementarios, del líquido reciclado ó en algunos casos, sin tratamiento.

El material que sale puede ir a tratamientos complementarios y, a veces, directamente al receptor.

El humedal, al ser una superficie expuesta a la intemperie, tiene las siguientes entradas:

- Precipitaciones (P)
- Afluente (A)
- Producto recirculado (R)

En las salidas se pueden tener las siguientes:

- Evaporación (Ev)
- Evapotranspiración (ET)
- Consumo propio en la constitución de los tejidos de las biocenosis presentes (C)
- Infiltración (I)

Por otra parte, en el humedal se almacenarán o se acumularán las entradas que admita el ecosistema, almacenamiento que se denominará AL.

$$\text{Almacenamiento} = \text{Entra (In)} - \text{Sale (Out)}$$

Se puede representar como:

$$\frac{dAL}{dt} = \frac{In}{dt} - \frac{dOut}{dt}$$

En este caso será:

$$In = P+A+R$$

$$Out = Ev+ET+C+I$$

es decir:

$$AL = (P+A+R)-(Ev+ET+C+I)$$

La carga hidráulica total se puede obtener con una fórmula que se ha conseguido mediante datos experimentales, en la que se relaciona esta carga hidráulica con la DBO₅ del efluente del humedal artificial de la forma siguiente:



$$C_h = \frac{DE - 0.192DA}{0.097}$$

donde:

Ch: Carga hidráulica

DA: DBO₅ del afluente (en mg/l)

DE: DBO₅ del efluente (en mg/l)

4.3. Retención hidráulica

El tiempo de retención hidráulica depende fundamentalmente de las características locales de las aguas residuales afluentes, de la DBO₅ que se exija en los vertidos efluentes, de la climatología, del flujo de diseño, de la geometría del sistema y, por supuesto, del sistema del humedal aplicado.

4.4. Profundidad

Para sistemas FS se recomiendan profundidades de 0.30 a 0.60 m, y no más, teniendo en cuenta que si hay pendiente, en la zona más profunda debe haber 0.60 m y en la menos profunda 0.30 m.

Para sistemas FLS se recomiendan profundidades de 0 a 0.45 m, siendo muy útiles y eficaces las instalaciones de 0 a 0.20 m de profundidad.

4.5. Carga orgánica

El tratamiento con un humedal artificial debe buscar que la capacidad de asimilación de éste siempre supere a la carga orgánica que se aporta con el agua residual.

La carga de DBO₅ se debe considerar para diseñar la superficie del humedal.



Capítulo 5. Factores condicionantes

En este capítulo se presentan los factores a tomar en consideración para tomar decisiones de las principales características físicas que tendrá el humedal artificial, es decir, la selección del lugar apropiado para su establecimiento, las condiciones del suelo, la topografía del lugar y de cómo se determinan sus dimensiones físicas preliminares de acuerdo al contaminante que se desea remover. También se hace mención de la relación entre clima y temperatura, así como registros de temperaturas medias anuales en el Distrito Federal para las condiciones locales de diseño.

5.1. Emplazamiento, suelo y dimensiones

El tamaño del humedal puede ser un factor limitante, aunque se debe tener en cuenta que su superficie es muy reducida si se compara con algunos sistemas no convencionales de tratamiento de aguas residuales.

Para decidir el lugar de emplazamiento más apropiado para establecer un humedal artificial de tratamiento de aguas residuales y para determinar sus dimensiones se requiere definir los siguientes factores básicos:

- Flujo del afluente
- Características de ese afluente
- Concentración
- Características que debe cumplir el afluente

En función de estos factores, se puede expresar la superficie necesaria en l/día.m²

Una estimación preliminar de los requerimientos de terreno para humedales FLS puede obtenerse de la tabla 5.1 para las tasas típicas de carga superficial presentadas.

El contaminante que requiere la mayor área para su remoción determina el tamaño del área de tratamiento del humedal, la cual corresponde a la superficie del fondo de la celda del humedal. La distribución del flujo de agua residual en toda la superficie debe ser uniforme para que esta área sea efectiva en un 100 por ciento. Esto se hace posible en humedales artificiales mediante un gradiente del fondo cuidadosamente seleccionado y el uso de estructuras apropiadas de entrada y descarga.

La distribución uniforme del flujo es más difícil en los humedales naturales que se utilizan para tratamiento del efluente porque estos normalmente retienen su configuración y topografía existentes. Estudios con rastreadores de tinta en este tipo de humedales han mostrado que el área efectiva de tratamiento puede ser tan reducida como el 10 % del área total del humedal. El área total del humedal debe ser dividida por lo menos en dos celdas, con excepción de los sistemas de menor tamaño.



Tabla 5.1. Tasas típicas de carga superficial para humedales FLS

Constituyente	Concentración típica del afluente (mg/l)	Meta de tratamiento del efluente (mg/l)	Tasa de carga contaminante (g/m ² /día)
Carga hidráulica (cm/día)	1 a 10	-	-
DBO	5 a 100	5 a 30	1 a 9
SST	5 a 100	5 a 30	1 a 10
Nitrógeno como NH ₃ /NH ₄	2 a 20	1 a 10	0.1 a 0.4
Nitrógeno como NO ₃	2 a 10	1 a 10	0.2 a 1
Nitrógeno total	2 a 20	1 a 10	0.2 a 1
Fósforo total	1 a 10	0.5 a 3	0.1 a 0.4

U.S. EPA, 2000

Los sistemas de humedales son ecosistemas vivos en los cuales los ciclos de vida y muerte de la biota producen residuos que pueden ser medidos en función de DBO, SST, nitrógeno, fósforo y coliformes fecales. Como resultado, y en forma independiente del tamaño del humedal o las características del afluente, en estos sistemas siempre existen concentraciones naturales de esos materiales. La tabla 5.2 resume esas concentraciones naturales.

Tabla 5.2. Concentraciones “naturales” en humedales FS y FLS

Constituyente	Rango de concentración
DBO (mg/l)	1 a 10
SST (mg/l)	1 a 6
Nitrógeno total (mg/l)	1 a 3
Nitrógeno como NH ₃ / NH ₄ (mg/l)	Menos de 0.1
Nitrógeno como NO ₃ (mg/l)	Menos de 0.1
Fósforo total (mg/l)	Menos de 0.2
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	50 a 500

U.S. EPA, 2000



La remoción de la DBO y las varias formas de nitrógeno depende de la temperatura del agua, la temperatura del humedal debe conocerse para lograr un diseño adecuado. La temperatura del agua en sistemas con un tiempo hidráulico de retención largo (mayor a 10 días) se acerca a la temperatura promedio del aire.

Debido a que las plantas vivas y los detritos presentan una resistencia significativa al flujo por la fricción a lo largo del humedal, se deben considerar los aspectos hidráulicos en el diseño del sistema. La ecuación de Manning es aceptada en general como el modelo del flujo de agua en los humedales FLS. La resistencia al flujo impacta la configuración seleccionada para las celdas del humedal, entre más larga sea la trayectoria de flujo, más grande será la resistencia. Para evitar problemas de tipo hidráulico, se recomienda un cociente máximo entre longitud y el ancho de 4 a 1.

La tabla 5.3 resume el desempeño real de 27 sistemas de humedales FLS incluidos en una evaluación de tecnología publicada por la U.S. EPA, 2000.

Tabla 5.3. Resumen del desempeño de 27 sistemas de humedales FLS

Constituyente	Promedio del afluente (mg/l)	Promedio del efluente (mg/l)
DBO ₅	70	15
SST	69	15
Nitrógeno total (mg/l)	12	4
Nitrógeno como NH ₃ / NH ₄ (mg/l)	9	7
Nitrógeno como NO ₃ (mg/l)	3	1
Fósforo total (mg/l)	4	2
Fósforo disuelto (mg/l)	3	2
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	73000	1320

U.S. EPA, 2000

En teoría el desempeño de un sistema de humedales puede estar influenciado por factores hidrológicos. Tasas elevadas de evapotranspiración (ET) pueden aumentar las concentraciones en el efluente y aumentar el TRH del humedal. Tasas altas de precipitación pluvial pueden diluir la concentración de contaminantes y reducir el TRH del humedal. En la mayoría de las zonas templadas con un clima moderado estos efectos no son críticos para el desempeño adecuado. Estos aspectos hidráulicos sólo deben ser considerados para valores extremos de ET y precipitación. La tabla 5.4 resume las cargas típicas de carga superficial para humedales FS.



Tabla 5.4. Tasas típicas de carga superficial para humedales FS

Constituyente	Concentración típica del afluente (mg/l)	Meta de tratamiento del efluente (mg/l)	Tasa de carga contaminante (g/m ² /día)
Carga hidráulica (cm/día)	7.5 a 30	-	-
DBO	30 a 175	10 a 30	7 a 16
SST	30 a 150	10 a 30	4.5 a 17
Nitrógeno como NH ₃ /NH ₄	2 a 35	1 a 10	0.1 a 1.1
Nitrógeno como NO ₃	2 a 10	1 a 10	0.3 a 1.3
Nitrógeno total	2 a 40	1 a 10	0.3 a 1.2
Fósforo total	1 a 10	0.5 a 3	0.1 a 0.4

Nota: la temperatura del humedal es 20 °C
U.S. EPA, 2000

Es necesario considerar los aspectos hidráulicos del sistema porque a lo largo del humedal existe una considerable resistencia al flujo por fricción debido a la presencia del medio de grava, las raíces de las plantas y los detritos. El mayor impacto de esta resistencia al flujo se tiene en la configuración seleccionada para las celdas del humedal. A medida que la distancia de flujo aumenta la resistencia se hace mayor. Para evitar esos problemas hidráulicos se recomienda un cociente de longitud a ancho de 4 a 1, o menor. La ley de Darcy es aceptada generalmente como el modelo para el flujo del agua en los humedales FS.

El flujo del agua a lo largo de las celdas del humedal depende del gradiente hidráulico en la celda, así como de la conductividad hidráulica (k_s), el tamaño y la porosidad del medio utilizado (n). Para sistemas a mayor escala el medio propuesto debe ser evaluado en forma experimental para determinar esos valores.

La tabla 5.5 resume el desempeño real de 14 sistemas de humedales FS incluidos en la evaluación de tecnología de la U.S. EPA 1993.



Tabla 5.5. Resumen del desempeño de 14 sistemas de humedales FS

Constituyente	Promedio en el afluente (mg/l)	Promedio en el efluente (mg/l)
DBO ₅ *	28 (5 a 51)	8 (1 a 15)
Nitrógeno total	20 (9 a 48)	9 (7 a 12)
Nitrógeno como NH ₃ / NH ₄	5 (1 a 10)	5 (2 a 10)
Nitrógeno como NO ₃	9 (1 a 18)	3 (0.1 a 13)
Fósforo total	4 (2 a 6)	2 (0.2 a 3)
Coliformes fecales (NMP/100 ml)	270 000 (1 200 a 1 380 000)	57 000 (10 a 330 000)

*Valor promedio de retención de 3 días (rango de 1 a 5 días)

5.2. Topografía

Es indispensable conocer las características geométricas del espacio en que se pretenda instalar un humedal artificial, una condición es que el área de instalación sea plana y con una pendiente ligera.

Los sistemas FLS se basan en estanques horizontales o en canales también horizontales. Los sistemas FS necesitan disponer de una pendiente máxima de 1 a 2% (preferentemente menor al 1%).

Ante esta situación, se puede llegar a instalar el sistema en cualquier terreno, pero con un condicionante económico y quizás el más importante, pues a mayor pendiente mayores movimientos de tierra habrá que realizar, con el consiguiente sobre costo. Como regla general se puede admitir cualquier terreno con una pendiente menor al 4%.

5.3. Características del suelo

En principio se puede utilizar cualquier suelo, siempre que el presupuesto admita la preparación de las balsas o de los canales para una impermeabilización apropiada.

Los dos tipos de humedales (FLS y FS) requieren generalmente que se coloque una barrera impermeable para impedir que se contamine con agua residual el subsuelo o el agua subterránea. Algunas veces esta barrera está presente naturalmente por una capa de arcilla o por algún otro material de baja permeabilidad que se encuentre en el sitio y que pueden ser compactados hasta un estado cercano al impermeable.

El fondo del humedal debe ser cuidadosamente aislado antes de la colocación del impermeabilizante, sobre todo si éste es de alguna fibra sintética, que pueda llegar a perforarse. El terreno que corresponde a la cubierta vegetal debe retirarse de forma cuidadosa, para que pueda reservarse para ser utilizado en los humedales de flujo libre superficial como base para la vegetación o usarse después de la obra, así como una nivelación cuidadosa del fondo (de lado a lado del humedal y en la totalidad de la longitud del lecho). Los dos tipos de humedales deben tener una ligera pendiente para asegurar el drenaje, de forma que se asegure que se proporcionarán las condiciones hidráulicas necesarias para el flujo del sistema.



Durante las operaciones finales de afinación de la rasante, el fondo del humedal debería ser compactado de manera similar a como se hace en la subrasante de una carretera. El propósito es mantener la superficie de diseño durante las subsecuentes actividades de construcción. Se sabe que muchos sistemas de humedales construidos de ambos tipos han tenido flujos preferenciales debido a errores en esta parte de la construcción, en el caso particular de los humedales FS, los camiones que transportan la grava pueden ser un problema ya que las huellas de los neumáticos sobre todo en el fondo del lecho pueden indicar flujos preferentes permanentes en la totalidad del sistema, por lo tanto, no debe estar permitido el tráfico pesado por el fondo de la celda cuando se tengan condiciones climáticas adversas de humedad.

Para el caso de los humedales FLS, la capa superficial de suelo que se reservó anteriormente, se coloca sobre la membrana, de forma que sirve de base para las raíces de la vegetación.

La selección del material granular para el humedal FS es crítica para el éxito del sistema. Puede usarse roca triturada y seca, pero durante el transporte en los camiones, existe el problema de segregación de finos, que más tarde darán lugar a posibles atascamientos, por lo que es preferible la utilización de piedra lavada o grava. En la construcción de humedales FLS pueden también utilizarse agregados gruesos de los usados en la fabricación de concreto.

Para sistemas a gran escala, la parte alta del dique debería tener un ancho suficiente para situar un camión o cualquier equipo necesario para el mantenimiento. Cada celda del sistema deberá tener una rampa que permita el acceso a los vehículos de mantenimiento cuando se requiera.

5.4. Clima y temperatura

El clima es otro factor condicionante, así como la energía luminosa recibida por el humedal, la temperatura y la pluviometría son factores básicos a tener en cuenta; la tabla 5.6 muestra una clasificación de climas que están en función de la temperatura promedio del lugar (CONAGUA 1999).

La razón es que la materia orgánica que ha sido captada del efluente aplicado, necesita cierta cantidad de energía calorífica (y luminosa) ya que la actividad microbiológica depende directamente de la temperatura existente en los lugares de vertido.

Es admisible que con un aumento de 10 °C, el coeficiente de aumento de la intensidad de las reacciones biológicas es de 2 a 3, estando el límite superior entre los 70 y 80 °C. Si la temperatura sube o baja demasiado, la intensidad de las oxidaciones por vía microbiológica disminuye, incluso se puede llegar a anular.

Cuando en el humedal de vertido se mantiene una humedad adecuada, la evaporación produce una refrigeración de los horizontes superiores que hace que no se alcancen temperaturas demasiado elevadas, favoreciendo así la mejor actividad de los microorganismos.



Tabla 5.6. Clasificación de climas por su temperatura

Temperatura media anual ° C	Tipo de clima
Mayor de 22	Cálido
De 18 a 22	Semicálido
De 12 a 17.9	Templado
De 5 a 11.9	Semifrío
Menor que 5	Frío

CONAGUA, 1999

De acuerdo a datos registrados por el Servicio Meteorológico Nacional, la temperatura promedio anual en el Distrito Federal en los últimos 21 años se resume en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Temperaturas medias anuales en el Distrito Federal de 1989 a 2010

Año/Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	TMA *
1989	14.2	13.5	14.3	15.6	18.2	18.0	16.4	16.3	15.3	14.9	14.9	12.7	15.4
1990	13.2	13.8	15.1	16.3	17.6	17.4	16.6	16.6	16.1	15.8	14.8	12.8	15.5
1991	13.9	15.1	18.1	18.7	18.9	17.5	16.5	17.9	16.7	15.6	14.0	13.4	16.4
1992	13.5	14.3	17.8	17.2	17.1	18.7	17.4	17.1	16.7	15.4	14.4	13.8	16.1
1993	14.3	15.0	16.1	17.4	17.2	17.4	16.9	16.8	16.1	16.1	15.3	13.4	16.0
1994	13.3	15.4	17.3	17.5	18.4	17.5	17.0	16.9	16.4	16.8	15.1	14.2	16.3
1995	13.4	14.4	16.1	17.5	18.8	17.6	16.9	17.0	16.8	15.8	15.1	13.4	16.1
1996	12.0	13.6	15.8	16.3	17.7	15.9	16.0	15.8	16.0	14.5	13.0	12.8	14.9
1997	12.7	15.5	16.4	16.8	17.0	17.9	17.0	16.9	16.8	15.5	14.7	13.7	15.9
1998	12.8	14.0	16.6	19.3	20.6	19.5	17.7	17.0	16.5	15.6	15.5	13.5	16.5
1999	12.7	14.3	16.1	18.9	18.8	18.7	16.9	16.9	16.5	14.7	12.9	12.0	15.8
2000	12.8	14.3	16.4	17.9	17.7	16.9	17.2	16.4	16.7	16.7	16.2	12.5	16.0
2001	12.6	14.5	16.0	18.0	17.5	17.3	16.9	16.9	16.6	15.6	13.4	13.1	15.7
2002	13.3	13.9	16.9	18.0	18.5	17.3	16.5	16.7	16.2	16.0	14.1	13.6	15.9
2003	13.0	15.9	16.9	17.9	19.3	17.3	17.0	16.6	16.7	16.2	15.3	12.4	16.2
2004	13.5	14.8	16.2	16.8	17.2	16.6	16.5	16.8	16.4	17.2	15.6	13.9	16.0
2005	12.9	14.8	16.7	18.8	18.2	18.6	17.1	16.5	16.3	15.5	14.1	14.1	16.1
2006	14.2	16.7	17.6	19.7	18.9	18.4	18.2	18.2	18.6	18	14.7	13.9	17.3
2007	15.3	16.0	17.6	18.9	19.4	19.6	16.6	18.5	17.1	16.2	15.3	15.3	17.3
2008	14.5	16.6	17.2	19.8	19.8	18.4	17.2	18.5	17.7	16.4	14.7	14.2	17.1
2009	14.3	15.7	17.6	19.8	20.1	19.8	18.5	19.3	18.3	18.4	15.6	15.4	17.7
2010	13.2	14.5	18.0	18.8	20.6	20.5	17.9	18.3	18.0	16.5	15.0	15.0	17.2

Servicio Meteorológico Nacional
*TMA: Temperatura Media Anual

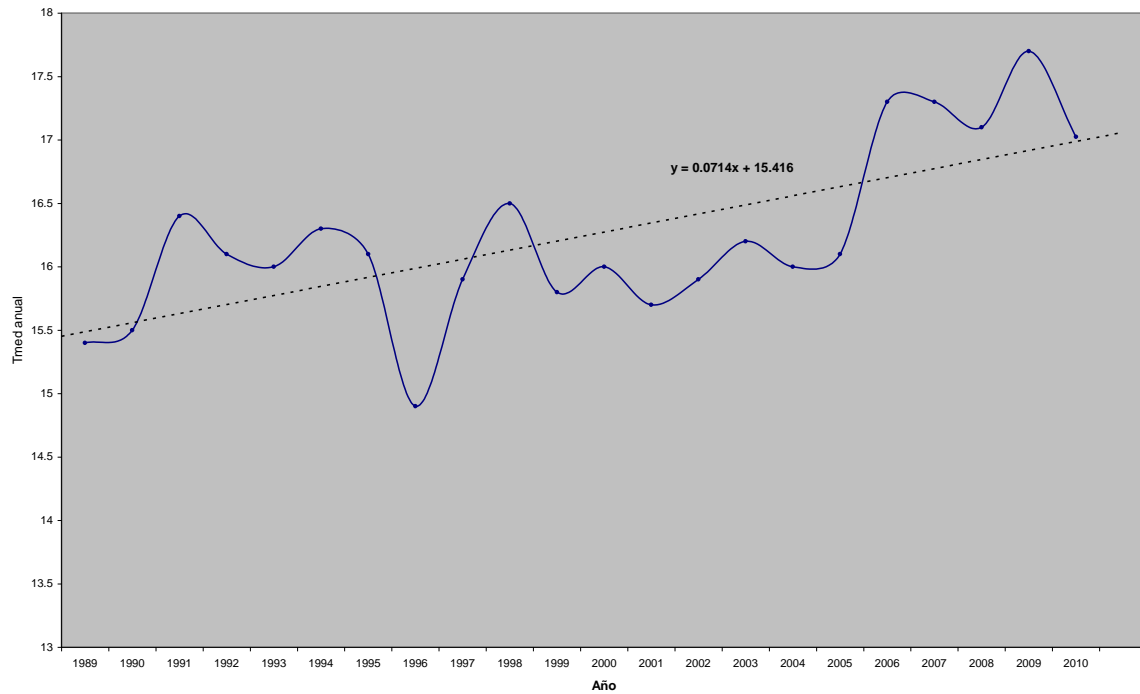


Figura 5.1. Gráfica que muestra los registros obtenidos de las temperaturas medias anuales en el Distrito Federal de 1989 a 2010 así como su tendencia

El promedio de temperaturas medias anuales de 1989 a 2010 en el Distrito Federal es de 16.2 ° C, tomando en cuenta esta aproximación y la tabla de clasificación de climas por su temperatura media anual, se define como clima templado, que se presume sean las condiciones favorables para el desarrollo del proyecto.



Capítulo 6. Vegetación de los humedales artificiales

En este capítulo se describen las características que poseen las diferentes familias de vegetales para la depuración de aguas residuales, así como los métodos de implantación que pueden ser seleccionados.

6.1. Selección de las especies

La vegetación a implantar en los humedales artificiales es un factor fundamental para obtener rendimientos óptimos en la depuración de las aguas residuales.

El tratamiento se basa en gran parte en las actuaciones de la vegetación, y es por ello que la selección de las especies vegetales más apropiadas a cada caso cobra la mayor importancia.

Se deben tener en cuenta, entre otros, los siguientes factores condicionantes:

- Tipo de humedal
- Temperatura
- Superficie del humedal
- Profundidad de la instalación
- Composición de los vertidos al humedal
- Evolución de los rizomas
- Necesidad o no de recolección periódica de la vegetación
- Tipo de sustrato

En la tabla 6.1 se muestran algunas especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales.

Tabla 6.1. Especies emergentes más utilizadas en depuración de aguas residuales

Nombre científico	Nombre común	Temperatura °C		Máxima salinidad tolerable, ppt	Rango efectivo de pH
		Deseable	Germinación de las semillas		
Carex sp	-	14 -32	-	-	5 - 7.5
Scirpus lacustris	Junco de laguna	18 -27	-	20	4 - 9
Phragmites australis	Carrizo	12 - 23	10 - 30	45	2 - 8
Juncus sp	Juncos	16 - 26	-	20	5 - 7.5
Thypha sp	Eneas, aneas, espadañas	10 - 30	12 - 24	30	4 - 10

Reed, Miledlebrooks and Crites 1995

6.2. Especies recomendables

Las plantas encontradas en humedales naturales cerca del área escogida para el humedal construido son recomendables, ya que están adaptadas al clima local. Si estas plantas no pueden adquirirse localmente, cualquier planta de humedal que crezca bien puede estar utilizada. La figura 6.1 muestra las plantas más comunes que pueden ser adaptadas en humedales artificiales.



Figura 6.1. (De izquierda a derecha) aneas, juncos y carrizos



- **Anea y espadaña**

Este tipo de planta es ubicua en distribución, robusta, capaz de crecer bajo diversas condiciones medioambientales, se propagan fácilmente, por lo que representa una especie ideal para un humedal artificial. También es capaz de producir una biomasa anual grande, típicamente remueve nitrato y fosfato. Los rizomas de espadaña plantados a intervalos de aproximadamente 0.6 m pueden producir una cubierta densa en menos de un año. Tiene una penetración relativamente baja en grava de aproximadamente 0.3 m.



Figura 6.2. Aneas en humedales naturales que pueden ser utilizadas en humedales artificiales



Figura 6.3. Variedades de aneas (typha)

- **Junco de laguna**

Son plantas ubicuas que crecen en grupos en un rango diverso de aguas interiores y costeras, pantanos salobres y humedales. Los juncos son capaces de crecer bien en láminas de agua desde 5 cm a 3 m de profundidad. La mayoría de las especies tienen un crecimiento moderado y pueden lograr un buen cubrimiento en un año con separaciones de aproximadamente 0.3 m. Algunas variedades crecen más rápido y pueden cubrir la celda del humedal con espaciamentos de entre 0.3 y 0.6 m. Penetran en grava aproximadamente 0.6 m, por lo que son muy usadas en humedales FS.

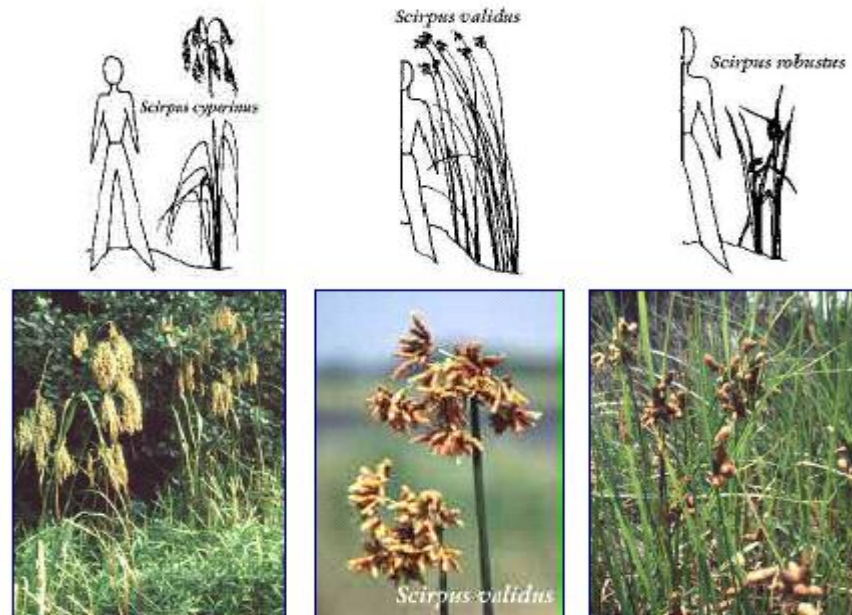


Figura 6.4. Comparación de algunas variedades de juncos utilizados en humedales artificiales

- Carrizos

Son anuales y altos con un rizoma perenne extenso. Logran muy buen recubrimiento en un año con separación de 0.6 m. Los sistemas que utilizan carrizo pueden ser más eficientes en la transferencia de oxígeno porque los rizomas penetran verticalmente, y más profundamente que los de las espadañas, aunque menos que los juncos (aproximadamente 0.4 m). Son muy usados para humedales artificiales porque presentan la ventaja de que tienen un bajo valor alimenticio, por lo tanto, no se ven atacados por animales así como otros tipos de plantas.



Figura 6.5. Carrizo adaptado a humedales artificiales

6.3. Implantación

Al igual que con el método de módulos de plantación que se aplica a veces en la restauración de ríos y riberas, aquí se pueden establecer modelos de implantación, que tendrán una distribución y unas especies determinadas que van a depender de los factores siguientes:

- Tipo de humedal
- Geometría del humedal
- Dimensiones del humedal

Todo esto, deberá ir precedido de la selección correspondiente, y a partir de ella el dibujo de su distribución en el plano geométrico del humedal.

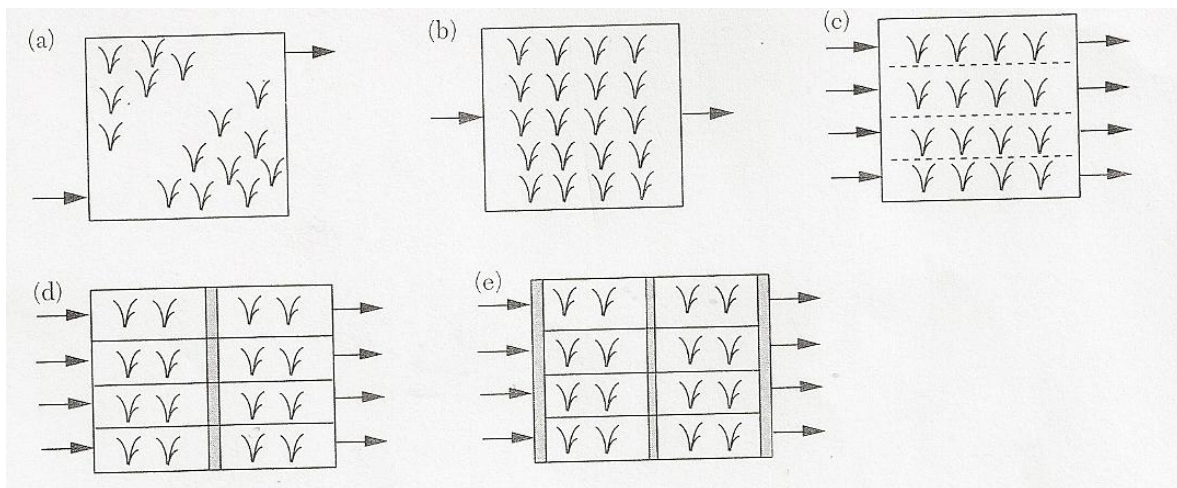


Figura 6.6. (Modificado). Configuraciones de los elementos del sistema del humedal (Kadlec y Knight 1996): (a) una mala configuración; (b) una pobre configuración; (c) una mejor configuración (múltiples entradas y un flujo controlado en las bermas); (d) todavía una mejor configuración (separación a través de diques y una redistribución); (e) otra muy buena configuración (zonas profundas para su distribución, redistribución y colección)

Las técnicas fundamentales de implantación son:

- Siembra

Se deberán considerar los siguientes factores:

- Cantidad de semilla a utilizar por punto o zona
- Profundidad de la siembra
- Cobertura de las semillas
- Densidad de siembra
- Época de siembra

- Depósito

Cuando se quieren implantar especies libres, tanto sumergidas como flotantes, el método más cómodo es transportarlas desde las zonas húmedas de origen y dejarlas en el humedal artificial a modo de depósito. Allí se ubicarán ellas de la forma más conveniente, si son capaces de sobrevivir.

- **Plantación**

Es la forma más frecuente de implantación, las plantaciones se realizan cuando se requiere ganar tiempo, pues se implantan individuos con desarrollo avanzado. Las plantas acuáticas se pueden implantar:

- Por rizomas (thypa sp, phragmites sp, iris sp, glyceria sp, etc.)
- En maceta (la mayoría de las especies arbustivas y arbóreas)

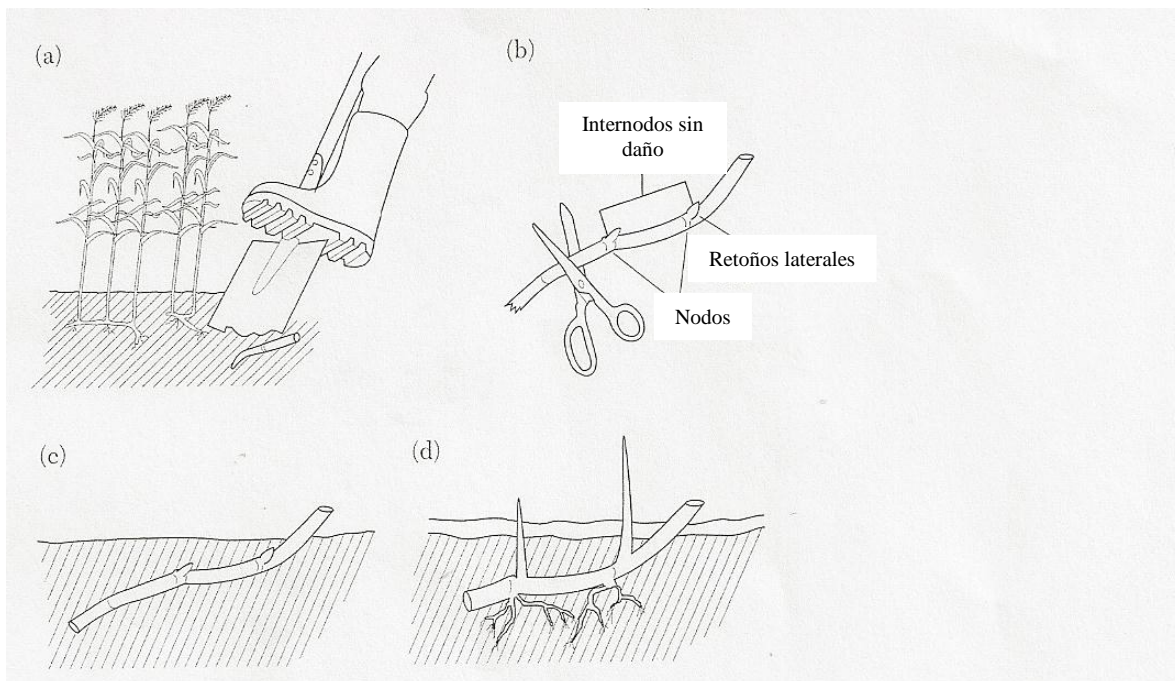


Figura 6.7. (Modificado). Técnica de implantación a través de rizomas (Hawke y José). (a) Desenterrar los rizomas con pala y preferentemente colectarlos en primavera; (b) Seleccionar los rizomas de un internodo que no esté dañado y dos nodos con brotes. Cortar la parte dañada. Rizomas con brotes al final del corte también pueden ser utilizados; (c) Plantarlos aproximadamente a 45° de la horizontal y que al menos un brote esté enterrado 4 cm. Plantarlos al aproximarse la primavera, (4 cortes por m²); (d) Inundar la zona de 2 a 5 cm de tirante, asegurando que se vea el brote del rizoma sobre la superficie inundada. Los retoños deben aparecer en verano.

- **Estructuras combinadas**

En los casos en que por el humedal artificial vaya a circular el agua residual a tratar con velocidad tal que pueda arrastrar a una parte de la vegetación preestablecida, como puede ocurrir, incluso a pequeña velocidad; será necesario instalar sistemas que estabilicen, fijen o protejan a esas especies, de manera que el humedal contenga y mantenga la vegetación con la densidad y diversidad con que fue diseñado.



Capítulo 7. Modelo general de diseño

Los sistemas de humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos, y su rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo a pistón para la remoción de DBO y nitrógeno. En algunos casos se presentan varios modelos con el objeto de poder compararlos dada la falta de consenso universal sobre la mejor aproximación de diseño.

Los modelos de diseño son sugeridos por Sherwood C. Reed en su libro *Natural Systems for Waste Management and Treatment*.

La siguiente es la ecuación básica de los reactores de flujo pistón:

$$\frac{C_e}{C_0} = e^{-K_T t} \quad (1)$$

donde:

C_e : Concentración del contaminante en el efluente, mg/l

C_0 : Concentración del contaminante en el afluente, mg/l

K_T : Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d^{-1}

t : Tiempo de retención hidráulica, d

Este tiempo de retención hidráulica en el humedal puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$t = \frac{A_s y n}{Q} \quad (2)$$

donde:

A_s : Área superficial del humedal, m^2

y : Profundidad de la celda de humedal, m

n : Porosidad, o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal. La vegetación y los residuos ocupan algún espacio en los humedales FLS, y el medio, raíces y otros sólidos hacen lo mismo en los del tipo FS. La porosidad es un porcentaje expresado en forma decimal

Q : Caudal medio a través del humedal, m^3/d

$$Q = \frac{Q_e + Q_0}{2} \quad (3)$$



donde:

Q_e : Caudal de salida, m³/d

Q_0 : Caudal de entrada, m³/d

Puede ser necesario calcular el caudal medio mediante la anterior expresión, para compensar las pérdidas o ganancias de agua causadas por filtración o precipitaciones a lo largo del flujo del agua residual a través del humedal. Un diseño conservador es asumir que no existen pérdidas por filtración y adoptar una estimación razonable de las pérdidas por evapotranspiración y ganancias por agua de lluvia de los registros históricos del lugar, para cada mes de la operación. Esto requiere una primera suposición del área superficial del humedal para poder calcular el agua extra que entra o sale. Es usualmente razonable para un diseño preeliminar suponer que los caudales de entrada y salida son iguales.

Es entonces posible determinar el área superficial del humedal con las ecuaciones (1) y (2):

$$A_s = \frac{Q \cdot \ln(C_0 / C_e)}{K_T \cdot \eta} \quad (4)$$

El valor de K_T para las ecuaciones anteriores depende del contaminante que se quiere eliminar y de la temperatura.

7.1. Criterio hidráulico

El diseño hidráulico de un humedal artificial es crítico para el éxito de su rendimiento. Todos los modelos de diseño que se usan actualmente asumen condiciones uniformes de flujo a pistón y que además no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento.

El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia es impuesta por la vegetación y la capa de sedimentos en los humedales FLS, el medio, las raíces de las plantas y los sólidos acumulados en los sistemas de flujo FS. La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema. La mejor solución en lo referente a la construcción, es proveer al humedal de un fondo con una inclinación que sea suficiente para permitir un drenaje completo cuando sea necesario y una salida de altura variable con el nivel del agua.

La relación largo - ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. En teoría grandes relaciones largo : ancho 10:1 ó mayores asegurarían un flujo pistón, pero tienen el inconveniente de que en la parte alta se desbordaría debido al incremento de la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de vegetación, principalmente en sistemas de flujo libre superficial, por tanto, relaciones de 1:1 hasta relaciones de 4:1 son aceptables. Los cortocircuitos pueden ser minimizados con una cuidadosa construcción y mantenimiento del fondo del humedal, con el uso de múltiples celdas, y con la intercalación de zonas abiertas sin vegetación para la redistribución del flujo.

7.2. Modelo de diseño para humedales FLS

El flujo de agua en un humedal FLS es descrito por la ecuación de Manning, que define el flujo en canales abiertos. La velocidad de flujo en el humedal es descrita por la ecuación (5), que depende de la profundidad del agua, de la pendiente de la superficie del agua y de la densidad de la



vegetación. Otras aplicaciones de la ecuación de Manning para canales abiertos suponen que la resistencia por fricción solamente ocurre en el fondo y en las paredes del canal.

En los humedales artificiales FLS la resistencia está distribuida sobre la totalidad de la columna de agua, ya que las plantas emergentes y los restos de vegetación están presentes en todo el espacio. La ecuación de Manning también asume flujo turbulento, lo que no es completamente válido pero es una aproximación aceptable.

$$v = \frac{1}{n} y^{2/3} s^{1/2} \quad (5)$$

donde:

v : Velocidad de flujo, m/s

n : Coeficiente de Manning, s/ m^{1/3}

y : Profundidad del agua del humedal, m

s : Gradiente hidráulico, o pendiente de la superficie del agua, m/m

Para los humedales, el coeficiente de Manning (n) es función de la profundidad del agua debido a la resistencia impuesta por la vegetación emergente. La resistencia también depende de la densidad de la vegetación y de la capa de residuos que puede variar según la localización de la estación. La relación está definida por:

$$n = \frac{a}{y^{1/2}} \quad (6)$$

donde:

a : Factor de resistencia, s.m^{1/6}

0.4 s.m^{1/6} para vegetación escasa, $y > 0.4$ m

1.6 s.m^{1/6} para vegetación moderadamente densa con profundidades de agua residual de $y \approx 0.3$ m

6.4 s.m^{1/6} para vegetación muy densa y capa de residuos, en humedales con $y \leq 0.3$ m

En muchas situaciones, con vegetación emergente típica, es aceptable asumir para propósitos de diseño valores de “a” entre 1 y 4. Sustituyendo en la ecuación anterior se tiene:

$$v = \frac{1}{a} y^{7/6} s^{1/2} \quad (7)$$

Sustituyendo y reorganizando términos es posible llegar a una ecuación para determinar la longitud máxima de una celda de humedal.

$$v = \frac{Q}{Wy} \quad W = \frac{A_s}{L} \quad s = \frac{m.y}{L}$$



donde:

Q : Caudal, m^3/d

W : Ancho de la celda del humedal, m

A_s : Área superficial de la celda de humedal, m^2

L : Longitud de la celda del humedal, m

m : Pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal

Sustituyendo en la ecuación (7) y reordenando obtenemos:

$$L = \left[\frac{A_s y^{8/3} m^{1/2} \cdot 86400}{a \cdot Q} \right]^{2/3} \quad (8)$$

El área superficial del humedal A_s se determina primero mediante el modelo de diseño de remoción del contaminante limitante. La ecuación (8) permite el cálculo directo de la longitud máxima aceptable de una celda de humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado. Es aconsejable usar el gradiente hidráulico más pequeño posible para tener una reserva en caso de necesitarse ajustes futuros. Una relación largo-ancho $\leq 3:1$ suele ser la mejor selección desde el punto de vista costo eficiencia, pero otras combinaciones de longitud y gradiente hidráulico son posibles también de modo que se pueda ajustar la forma del humedal al sitio y su topografía. El valor de la pendiente (m), esta típicamente entre 10 y 30 % de la pérdida de carga disponible. La máxima pérdida de carga disponible es igual al total de la profundidad del agua (y) del humedal cuando $m=100\%$. Este no sería un diseño conservador, porque el humedal podría estar seco al final y no tendría capacidad de reserva si la resistencia al flujo aumentara con el tiempo.

El valor de Q en la ecuación (8) es el caudal promedio entre la entrada y la salida, para tener en cuenta las pérdidas o ganancias del agua debidas a la evapotranspiración, filtración y precipitación. Es usualmente aceptable para un diseño preliminar suponer los caudales de entrada y salida iguales. Para el diseño final del sistema será recomendable tener en cuenta las pérdidas o ganancias.

7.3. Modelo de diseño para humedales de FS

La ley de Darcy, que esta definida en la ecuación (9), describe el régimen de flujo en un medio poroso que es lo generalmente aceptado para el diseño de humedales tipo flujo subsuperficial usando suelo y arena como medio de lecho. El mayor nivel de turbulencia en el lecho ocurre en lechos que usan piedra muy gruesa; entonces la ecuación de Ergun es más apropiada para este caso.

La ley de Darcy asume condiciones de flujo laminar, pero el flujo turbulento puede darse con gravas muy gruesas cuando el diseño usa un gradiente hidráulico alto. La ley de Darcy también asume que el flujo en el sistema es constante y uniforme, pero en realidad puede variar con la precipitación, evapotranspiración y filtración, así como por una mala construcción o desigual porosidad, si se minimizan estos inconvenientes al máximo posible, la ley de Darcy puede dar una aproximación razonable a las condiciones hidráulicas en el humedal FS.

$$v = k_s \cdot s$$



y dado que:

$$v = \frac{Q}{Wy}$$

entonces:

$$Q = k_s A_c s \quad (9)$$

donde:

Q : Caudal promedio a través del humedal, m³/d

k_s : Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo, m³/m²/d

A_c : Área de la sección transversal perpendicular al flujo, m²

s : Gradiente hidráulico o “pendiente” de la superficie del agua en el sistema m/m

v : Velocidad de “Darcy”, la velocidad aparente de flujo a través de la totalidad del área de la sección transversal del lecho, m/d

Sustituyendo y reorganizando los términos es posible desarrollar una ecuación que determine de manera aceptable al ancho mínimo de una celda de humedal de flujo subsuperficial que sea compatible con el gradiente hidráulico seleccionado para el diseño, partiendo de:

$$s = \frac{m \cdot y}{L} \quad L = \frac{A_s}{W}$$

donde:

W : Ancho de una celda de humedal, m

A_s : Área superficial del humedal, m²

L : Longitud de la celda de humedal, m

m : Pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal

y : Profundidad del agua en el humedal, m

$$W = \frac{1}{y} \left[\frac{(Q)(A_s)}{(m)(k_s)} \right]^{0.5} \quad (10)$$

El área superficial del humedal A_s se determina en primer lugar, usando el modelo de diseño limitante para remoción de contaminantes. La ecuación (10) permite calcular directamente el ancho mínimo absoluto aceptable de una celda de humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado.

El valor de “ m ” en la ecuación (10) típicamente se encuentra entre 5 y 20 % de la pérdida de carga potencial. En este caso se aplica la misma recomendación acerca de la no selección de la máxima pérdida de carga disponible. Es recomendable tomar un valor de conductividad hidráulica efectiva (k_s) y que “ m ” no sea mayor del 20% para tener un factor de seguridad suficiente contra potenciales atascamientos, efectos de la viscosidad y otras contingencias que pueden llegar a ser desconocidas en el momento de diseño.



Las ecuaciones (9) y (10) son válidas cuando el flujo es laminar a lo largo de los espacios vacíos del medio, es decir, cuando el número de Reynolds es función de la velocidad de flujo, el tamaño de los espacios vacíos y de la viscosidad cinemática del agua, como se muestra en la ecuación (11). En muchos casos N_R será mucho menor que 1, en cuyo caso el flujo laminar impera y la ley de Darcy es válida. Si el flujo es turbulento, entonces la conductividad hidráulica efectiva será significativamente menor que la predicha por la ley de Darcy.

$$N_R = \frac{vD}{T} \quad (11)$$

donde:

N_R : Número de Reynolds

v : Velocidad de Darcy, m/s

D : Diámetro de los vacíos del medio, m

T : Viscosidad cinemática del agua, m^2/s

La conductividad hidráulica (k_s) en las ecuaciones (9) y (10) varía directamente con la viscosidad del agua, que a su vez es función de la temperatura del agua:

$$\frac{k_{sT}}{k_{d20}} = \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \quad (12)$$

donde:

k_s : Conductividad hidráulica a una temperatura T y $20^\circ C$

μ : Viscosidad del agua a una temperatura T y $20^\circ C$ (ver tabla 7.1)

Tabla 7.1. Propiedades físicas del agua

Temperatura ($^\circ C$)	Densidad (kg/m^3)	Viscosidad dinámica $\times 10^3$ ($N*s/m^2$)	Viscosidad cinemática $\times 10^6$ (m^2/s)
0	999.8	1.781	1.785
5	1 000.0	1.518	1.519
10	999.7	1.307	1.306
15	999.1	1.139	1.139
20	998.2	1.102	1.003
25	997.0	0.890	0.893
30	995.7	0.708	0.800
40	992.2	0.653	0.658
50	988.0	0.547	0.553
60	983.2	0.466	0.474
70	977.8	0.404	0.413
80	971.8	0.354	0.364
90	965.3	0.315	0.326
100	958.4	0.282	0.294

C. Reed Sherwood



La conductividad hidráulica (k_s) en las ecuaciones (9) y (10) también varía con el número y tamaño de vacíos en el medio usado para el humedal. La tabla 7.2 presenta órdenes de magnitud estimados para un rango de materiales granulares que podrían ser usados en un humedal de flujo subsuperficial. Es recomendable que la conductividad hidráulica se mida en el terreno o en el laboratorio antes del diseño final.

Tabla 7.2. Características típicas de los medios para humedales FS

Tipo de material	Tamaño efectivo D_{10} (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, k_s ($m^3/m^2/d$)
Arena gruesa	2	28 – 32	100 - 1 000
Arena gravosa	8	30 – 35	500 – 5 000
Grava fina	16	35 – 38	1 000 - 10 000
Grava media	32	36 – 40	10 000 – 50 000
Grava/Roca gruesa	128	38 – 45	50 000 – 250 000

Crites and Tchobanoglous 1998

Es posible usar una relación basada en la ecuación de Ergun, para estimar la conductividad hidráulica cuando se usan gravas gruesas o rocas:

$$k_s = n^{3.7}$$

Esta ecuación, así como los valores de la tabla de porosidad, son útiles solamente para un diseño preliminar o para estimar un orden de magnitud. El diseño final de un humedal de flujo subsuperficial debe basarse en mediciones reales de los dos parámetros, conductividad hidráulica y porosidad.

La recomendación previa de que el gradiente hidráulico de diseño se limite a no más del 20% de la pérdida de carga disponible es el efecto parcial de limitar la relación de forma del sistema a valores relativamente bajos.

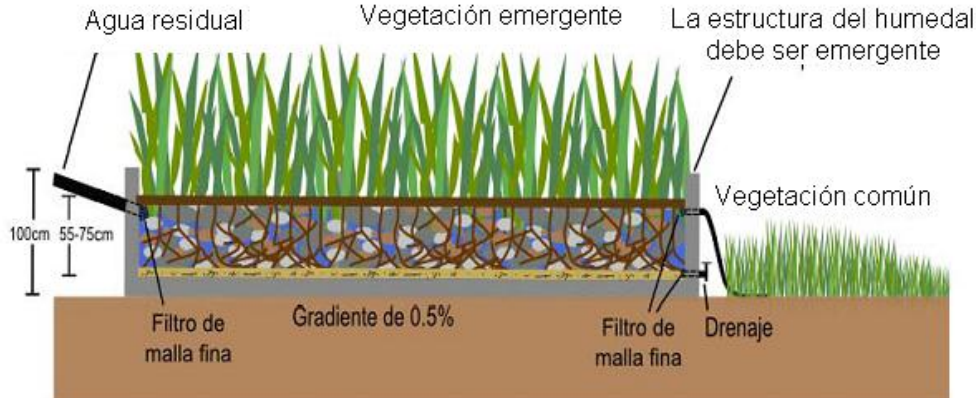


Figura 7.1. (Modificado). Sistemas típicos de humedales artificiales

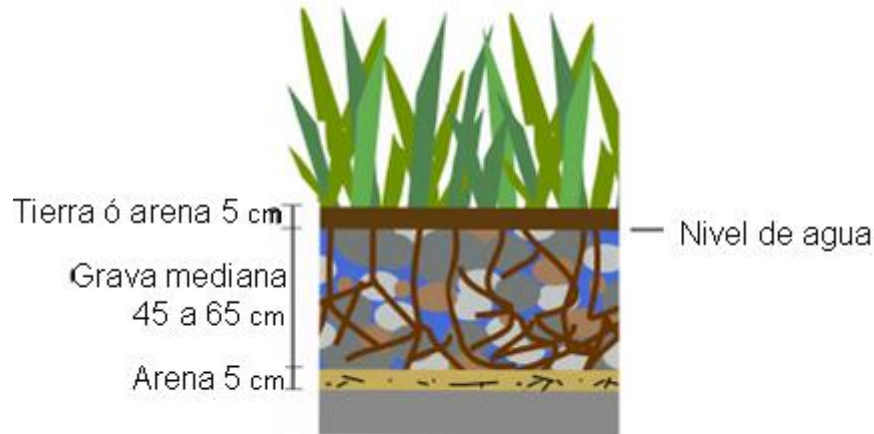


Figura 7.2. (Modificado). Sección transversal de un humedal construido para aguas residuales

7.4. Aspectos térmicos en humedales FS

Los mecanismos térmicos básicos involucrados incluyen conducción de o hacia el terreno, conducción de o hacia el agua residual, conducción y convección de o hacia la atmósfera y radiación de o hacia ella. Las ganancias de calor desde el terreno pueden llegar a ser significativas pero no suelen ser tenidas en cuenta para un diseño más conservador. Ignorar el calor ganado por radiación solar es también conservador, pero en lugares calurosos donde este factor puede llegar a ser significativo durante los meses de verano, debe incluirse en el diseño. Las pérdidas por convección debidas a la acción del viento sobre las superficies abiertas del agua, pueden ser significativas, pero este no debería ser el caso de muchos humedales FS con una buena densidad de vegetación, una capa de restos de vegetación y la presencia de una capa superior con grava relativamente seca. Estos efectos se ven mitigados por la capa de agua subyacente en el humedal, que tiene como resultado que las pérdidas por convección sean relativamente menores y pueden ser ignoradas para el modelo térmico. El modelo simplificado que se presenta más adelante está basado solamente en las pérdidas por conducción a la atmósfera.



La energía ganada por el flujo del agua a través del humedal viene dada por:

$$q_G = (c_p)(\delta)(A_s)(y)(n) \quad (13)$$

donde:

q_G : Energía ganada por el agua, J/°C

c_p : Capacidad de calor específico del agua, J/kg*°C

δ : Densidad del agua, kg/m³

A_s : Área superficial del humedal, m²

y : Profundidad del humedal, m

n : Porosidad del humedal

El calor perdido por el humedal de flujo subsuperficial puede ser definido por la ecuación (14):

$$q_L = (T_0 - T_a)(U)(\sigma)(A_s)(t) \quad (14)$$

donde:

q_L : Energía pérdida vía conducción a la atmósfera, J

T_0 : Temperatura del agua que entra al humedal, °C

T_a : Temperatura promedio del aire durante el período considerado, °C

U : Coeficiente de transferencia de calor a la superficie del lecho del humedal, W/m²

σ : Factor de conversión, 86400 s/d

A_s : Área superficial del humedal, m²

t : Tiempo de retención hidráulica en el humedal, d

El valor de T_a en la ecuación (14) se obtendrá en los registros locales de meteorología, o de la estación meteorológica más cercana del sitio propuesto. Es aconsejable usar una temperatura del aire promedio, para un periodo de tiempo igual al tiempo de retención hidráulica del humedal.

El cálculo del valor del coeficiente de transferencia de calor (U) para la ecuación (14) viene dada por:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{y_1}{k_1}\right) + \left(\frac{y_2}{k_2}\right) + \left(\frac{y_3}{k_3}\right) + \left(\frac{y_4}{k_4}\right)} \quad (15)$$



donde:

$k(1-n)$: Conductividad de las capas 1 a n, $W/m^{\circ}C$

$y(1-n)$: Espesor de las capas 1 a n, m

La tabla 7.3 presenta los valores de conductividad para materiales que están presentes típicamente en los humedales FS.

Los valores de conductividad de todos los materiales, excepto el de la capa de los restos de vegetación se cree conservador, pero es menor que el que se estableció y debe ser usado con cautela hasta que este disponible una futura verificación.

Tabla 7.3. Conductividad térmica de los componentes de un humedal FS

Material	K ($W/m^{\circ}C$)
Aire (sin convección)	0.024
Agua (a $0^{\circ}C$)	0.58
Capa de restos de vegetación	0.05
Grava seca (25% de humedad)	1.5
Grava saturada	2.0
Suelo seco	0.8

C. Reed Sherwood

El cambio de temperatura T_c proveniente de las pérdidas y ganancias definidas por las ecuaciones (13) y (14) puede ser encontrado combinándolas:

$$T_c = \frac{q_L}{q_G} \quad (16)$$

donde:

T_c : Cambio de temperatura en el humedal, $^{\circ}C$

Entonces la temperatura del efluente será:

$$T_e = T_0 - T_c \quad (17)$$

La temperatura promedio del agua T_w en el humedal de flujo subsuperficial será:

$$T_w = \frac{T_0 + T_e}{2} \quad (18)$$



7.5. Modelo de diseño para remoción de DBO en humedales FLS

A continuación, se presenta una ecuación para estimar la remoción de DBO en un sistema de este tipo. El modelo se basa en la experiencia con sistemas de aplicación sobre el suelo y filtros percoladores, dada la escasez de datos sobre sistemas tipo FLS y dado también que estos datos se reservaron para la validación del modelo:

$$\frac{C_e}{C_0} = A \cdot \exp \left[- \frac{0.7(K_T)(A_v)^{1.75}(L)(W)(y)(n)}{Q} \right]^2 \quad (19)$$

donde:

C_e : Concentración de DBO en el efluente, mg/l

C_0 : Concentración de DBO en el afluente, mg/l

A : Fracción de la DBO no removida como sólidos sedimentables a la entrada del sistema, es una variable que depende de la calidad del agua (es una fracción decimal)

K_T : Constante de primer orden dependiente de la temperatura, d^{-1}

A_v : Área superficial disponible para la actividad microbiana, m^2/m^3

L : Longitud del sistema (paralelo al flujo), m

W : Ancho del sistema, m

y : Profundidad promedio del sistema, m

n : Porosidad del sistema (espacio disponible para el paso del agua) como fracción decimal

Q : Caudal promedio en el sistema, m^3/d

La ecuación (19) se considera teóricamente correcta, pero conlleva dos aspectos a considerar, que son la dificultad para medir o evaluar los factores A y A_v .

El factor A ha sido medido para sistemas del tipo de la aplicación de efluentes primarios y corresponde aproximadamente a 0.52 (48% de la DBO aplicada se queda a la entrada del sistema como materia particulada), el valor de A podría incrementarse para efluentes secundarios y terciarios aplicados a un humedal tipo FLS, un valor entre 0.70 y 0.85 sería el apropiado para efluentes secundarios y 0.90 o mayor para efluentes terciarios altamente tratados. El valor de A_v es el área superficial disponible en el sistema para desarrollo de biomasa fija. En los filtros percoladores y los biodiscos corresponde a la totalidad del área mojada y es relativamente fácil de determinar. En un humedal FLS, A_v es una medida del área superficial de la porción de vegetación y de la capa de restos de vegetación que está en contacto con el agua residual. Como resultado, esto es casi imposible de medir verazmente en un humedal funcionando y lo único que es posible es una aproximación. El valor de A_v recomendado por algunas publicaciones es $15.7 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Dado que el área superficial del humedal (A_s) es igual a $(W \cdot L)$ es posible sustituyendo y reorganizando los términos de la ecuación (19) para obtener una ecuación para estimar el área requerida para obtener el nivel de tratamiento deseado.



$$A_s = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_e + \ln A)}{K_T(y)(n)} \quad (20)$$

donde:

A_s : Área superficial del humedal FLS, m²

K_T : $k_{20}^{(1.06)(T-20)}$

k_{20} : 0.2779 d⁻¹

n : 0.65 a 0.75 (los valores menores son para vegetación densa y madura)

A : 0.52 (efluente primario)

0.7 a 0.85 (efluente secundario)

0.9 (efluente terciario)

La ecuación (20) puede estimar de forma fiable el área superficial para un humedal FLS. Dadas las dificultades para evaluar A y A_v , se han realizado una segunda aproximación a partir del análisis de datos de rendimiento de sistemas de este tipo en operación:

$$\frac{C_e}{C_0} = e^{-K_T t} \quad (21)$$

$$K_T = k_{20}(1.06)^{(T-20)} \quad (22)$$

$$k_{20} = 0.67d^{-1} \quad (23)$$

El área superficial del humedal se determinará por la ecuación (24):

$$A_s = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_e)}{K_T(y)(n)} \quad (24)$$

donde:

K_T : Constante de temperatura proveniente de las ecuaciones (22) y (23), d⁻¹

y : Profundidad de diseño del sistema, m

n : Porosidad del humedal, 0.65 a 0.75

Durante el verano el sistema puede operar con una profundidad mínima, consistente con la obtención de los objetivos de calidad, para mejorar la transferencia de potencial de oxígeno y fomentar un crecimiento vigoroso de las plantas.

La ecuación (24) da como resultado un diseño más conservador que con la ecuación (20) que es la originalmente asumida para estos diseños.

La DBO final del efluente se ve influida por la producción de DBO residual en el sistema, producto de la descomposición del detritus de las plantas y de otras sustancias orgánicas presentes de manera natural. La DBO residual es típicamente 10 mg/l, por lo tanto las ecuaciones (21) y (24) no pueden ser usadas para diseñar sistemas con una DBO en el efluente final por debajo de este rango.



7.6. Modelo de diseño para remoción de DBO en humedales FS

En esencia, el mecanismo de remoción de la DBO en un humedal FS es el mismo que el descrito para los sistemas de FLS. Sin embargo, el rendimiento puede ser mejor en los de flujo subsuperficial ya que tienen un área sumergida mucho mayor que incrementa el potencial de crecimiento de biomasa fija. Un metro cúbico de lecho de humedal que contiene grava de 25 mm puede tener al menos 146 m² de área superficial, además de toda la superficie de las raíces presentes. Un volumen comparable en un humedal FLS podría contener de 15 a 50 cm² de área superficial disponible.

Las ecuaciones (21), (22) y (24) son también modelos válidos para el diseño de humedales FS. La única diferencia es la magnitud de la porosidad (n) y de la constante de la temperatura (k_{20}). Para humedales FS, la porosidad varía con el tipo de relleno usado, y puede ser medida por los procedimientos ya estipulados. En cuanto a la constante de temperatura que se define en la ecuación (22), su valor para 20 °C es:

$$k_{20} = 1.104d^{-1} \quad (25)$$

Así como en los humedales FLS, los detritus de las plantas y otras sustancias orgánicas presentes de forma natural, contribuyen a la DBO dentro del sistema FS. Por lo tanto, estos sistemas tampoco deberían diseñarse para alcanzar niveles de DBO en el efluente de 5mg/l.

El lecho de los humedales FS tiene una profundidad típica de alrededor de 0.6 m del medio seleccionado. Este, algunas veces, tiene encima una capa de grava fina de 76 a 150 mm de espesor. Esta grava fina sirve para el enraizamiento inicial de la vegetación y se mantiene seca en condiciones normales de operación. Si se selecciona una grava relativamente pequeña, <20 mm para la capa principal donde se realizará el tratamiento, la capa fina superior probablemente no será necesaria, pero entonces, la profundidad total deberá incrementarse ligeramente para asegurar que se tenga una zona seca en la parte superior del lecho.

7.7. Rendimientos esperados

Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno, así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos. La remoción de fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo. Los mecanismos básicos de tratamiento son los antes citados, e incluyen sedimentación, precipitación química, absorción, e interacción biológica con la DBO y el nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación. Si no se practica la poda, se encuentra una fracción de la vegetación que se descompone y que permanece como materia orgánica refractaria, que termina formando turba en el humedal. Los nutrientes y otras sustancias asociadas a esta fracción refractaria se considera que son eliminados permanentemente del sistema.

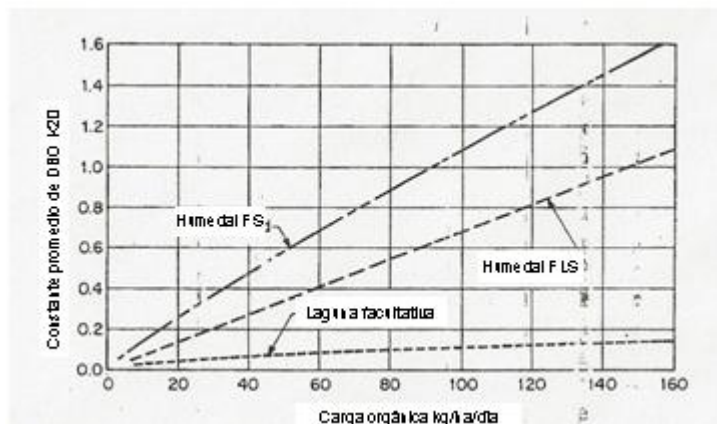


Figura 7.3. (Modificado). Rendimientos de remoción típicos

En los sistemas de humedales la remoción de materia orgánica sedimentable es muy rápida, debido a la poca velocidad del flujo, donde cerca del 50% de la DBO aplicada es removida en los primeros metros del humedal. Esta materia orgánica sedimentable es descompuesta aerobia ó anaerobiamente, dependiendo del oxígeno disponible. El resto de la DBO se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal y continúa siendo removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema. Esta actividad biológica puede ser aeróbica cerca de la superficie del agua en los sistemas FLS y cerca de las raíces y rizomas en los sistemas FS, pero la descomposición anaerobia prevalece en el resto del sistema.

En climas relativamente cálidos, la remoción de DBO observada durante los primeros días es muy rápida. La remoción subsiguiente está más limitada y se cree que está influenciada por la producción de DBO residual debida a la descomposición de los residuos de las plantas y otra materia orgánica natural presente en el humedal. Esto hace a estos sistemas únicos, ya que se produce DBO dentro del sistema y a partir de fuentes naturales; por tanto, no es posible diseñar una salida de cero DBO, independientemente del tiempo de retención hidráulica.

La concentración de entrada y salida del humedal son dos valores determinantes en el cálculo, de ellos depende el tiempo de retención si se requiere una concentración de salida baja. El parámetro que usaremos para medir las concentraciones es la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5), porque el objetivo principal del humedal es remover contaminantes básicos y materia orgánica.

La concentración de salida depende de cómo se quiera que sea la calidad del agua del humedal, en este caso se toma como referencia la norma NOM-001-ECOL-1996, donde se muestran los valores máximos permisibles para contaminantes básicos (ver tabla 7.4).



Tabla 7.4. (Modificado). NOM 001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos

PARÁMETROS	EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				SUELO			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (C)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
mg/l, excepto cuando se especifique								
Temperatura °C (1)	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia flotante (3)	ausente	ausente	ausente	Ausente	ausente	Ausente	ausente	ausente
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
SST	75	125	40	60	N.A.	N.A.	75	125
DBO	75	150	30	60	N.A.	N.A.	75	150
Nitrógeno Total	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Fósforo Total	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

(1) Instantáneo

(2) Muestra Simple Promedio Ponderado

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

P.D. = Promedio Diario; P.M. = Promedio Mensual

N.A. = No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos



Capítulo 8. Diseño de un sistema de humedal artificial para el tratamiento de aguas residuales de un edificio de oficinas

Con base en el programa de manejo, uso y reúso del agua en la UNAM (PUMAGUA) liderado por el Instituto de Ingeniería, la Facultad de Ingeniería a través de la División de Ingenierías Civil y Geomática (DICyG) integró un grupo de trabajo con el propósito de desarrollar una metodología y procedimientos para el análisis de los microsistemas de uso y manejo del agua en los inmuebles propiedad de la UNAM, y la aplicación de dicha metodología a manera de prueba piloto para el análisis de los sistemas de suministro y evacuación de agua en los inmuebles de la Facultad. El estudio fue denominado Evaluación cualitativa y cuantitativa del suministro y evacuación del agua en los edificios de la Facultad de Ingeniería, y el informe final se concluyó en diciembre de 2008.

Dicho proyecto, encomendado al Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la DICyG, consideró la evaluación de la calidad del agua en los puntos de consumo y de descarga de aguas residuales que se generan en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería, así como el análisis de las condiciones de operación de los sistemas, prácticas y tecnologías actuales de uso, tratamiento y reúso, en su caso, o de disposición final, de acuerdo con los objetivos del PUMAGUA.

Los albañales de los edificios del conjunto norte o principal drenan hacia el colector localizado en el límite norte del conjunto (entre la parte posterior de los laboratorios y las islas). Dicho colector de concreto tiene un diámetro de 60 cm y pendiente de 26 milésimas. El sitio de vertido de estas aguas residuales es la planta de tratamiento de CU localizada en la avenida cerro del agua.

Las aguas residuales del conjunto sur se manejan de varias formas. Los albañales de los edificios de la División de Ciencias Básicas drenan hacia un colector de concreto de 30 cm de diámetro y 10 milésimas de pendiente, ubicado al norponiente (siguiendo el trazo del antiguo camino verde). El sitio de vertido de estas aguas residuales también es la planta de tratamiento de CU. Sin embargo, los albañales de los edificios de construcción reciente, como son la biblioteca Enzo Levi, los edificios de la Secretaría de Posgrado e Investigación y el edificio de la División de Ingenierías Civil y Geomática, vierten en tanques sépticos, en el mejor de los casos, o en pozos negros, por lo que las aguas residuales se infiltran directamente a través de las grietas de la roca basáltica. En estos edificios se tienen establecidos los laboratorios de Mecánica de Suelos, Ingeniería Ambiental, Electromecánica, Petrolera y Termofluidos, además de los sanitarios existentes. Dichos laboratorios vierten directamente sus residuos líquidos en el sistema de evacuación de aguas residuales de los edificios, por lo que se están infiltrando en el subsuelo de manera intermitente residuos peligrosos.

Como alternativa a la construcción de los colectores que permitan conducir el agua residual de la zona sur del campus a la planta de tratamiento de CU, está la del manejo descentralizado de los residuos líquidos, mediante pequeñas instalaciones de tratamiento por cada edificio o grupo de edificios, con lo cual se evitarían los costos de la excavación en roca para la construcción de alcantarillas así como los impactos ambientales que se producirían por las obras en un área ya urbanizada.

En virtud de lo anterior y como consecuencia del estudio citado, el Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental realizará el proyecto de factibilidad del manejo descentralizado de aguas



residuales en los inmuebles de la Facultad de Ingeniería del conjunto sur que carecen de conexión a la red de alcantarillado.

Inicialmente se realizará el proyecto de un humedal artificial como sistema de tratamiento de aguas residuales del edificio de cubículos del personal académico de la División de Ingenierías Civil y Geomática; se trata fundamentalmente de aguas residuales de características similares a las de tipo doméstico. La meta es que al lograr la estabilización del proceso de tratamiento se pueda sustituir el agua potable suministrada a urinarios e inodoros del edificio por agua tratada y, con los resultados de esta experiencia, se pueda intervenir en los restantes edificios de la Facultad de Ingeniería que disponen el agua residual de manera ambientalmente inadecuada.

En este capítulo se pretende dimensionar el humedal para la remoción de DBO, sin embargo en la caracterización del agua residual se midieron las concentraciones de SST (Sólidos Suspendidos Totales) y SSD (Sólidos Suspendidos Disueltos) para futuros análisis (ver anexos).

La razón principal para el diseño de una celda de humedal de flujo subsuperficial, es para evitar la presencia de mosquitos y malos olores.

La temperatura media del agua se obtuvo del promedio ponderado al multiplicar cada temperatura (por hora) por el volumen aforado (igualmente por hora), entre el volumen total de cada día. Cuyos resultados se muestran en la tabla 8.1:

Tabla 8.1. Temperaturas medias por cada día de aforo

Día	T med (°C)
8/11/2010	15.50
9/11/2010	15.32
10/11/2010	15.74
11/11/2010	16.51
12/11/2010	16.03

La temperatura media del agua residual resultó de 15.82 °C.

1. Se asume una temperatura de diseño del agua en el humedal FS de 15.14 °C (método iterativo).

$$K_{15.14} = 1.104(1.06)^{(15.14-20)} = 0.8317d^{-1}$$

2. Se determina el área superficial requerida para el humedal FS utilizando la ecuación 24.

$$Q = 1.724[m^3 / d]$$

$$DBO_{afuente} = 287[mg / l]$$



$$DBO_{\text{efluente}} = 10[mg/l]$$

$$y = 0.6[m]$$

$$n = 0.29$$

$$k_s = 300[m^3/m^2/d]$$

$$A_s = \frac{(1.724)[\ln(287/10)]}{(0.8317)(0.60)(0.29)} = 40m^2$$

3. Se determina el tiempo de retención hidráulica utilizando la ecuación 2.

$$TRH = \frac{(40)(0.6)(0.29)}{1.724} = 4d$$

4. Se calcula la temperatura promedio del agua, usando las ecuaciones 13 a 18. Asumimos una capa de vegetación de 5 cm, el medio de 60 cm y una capa de arena de 5 cm que cubre el humedal (ver tabla 7.3 de conductividad térmica para los componentes de un humedal FS).

$$U = \frac{1}{\left(\frac{0.05}{0.05}\right) + \left(\frac{0.60}{2}\right) + \left(\frac{0.05}{1.5}\right)} = 0.75$$

Para la temperatura del aire se toma la temperatura mínima de las temperaturas medias mensuales desde 1989 a 2010, que corresponde a 12 °C.

$$T_c = \frac{q_L}{q_G} = \frac{(0.75)(86400)(4)}{(4215)(999.06)(0.6)(0.29)}(15.82 - 12) = 1.36^\circ C$$

$$T_e = 15.82 - 1.36 = 14.46^\circ C$$

$$T_w = \frac{15.82 + 14.46}{2} = 15.14^\circ C$$

La temperatura de 15.14°C asumida es correcta y el dimensionamiento del humedal también.

5. Ahora determinamos la relación largo: ancho usando la ecuación (10). Se propone un valor de m (pendiente) de 0.05, una k_s (conductividad hidráulica) de 300 con una n (porosidad) de 0.29

$$W = \frac{1}{0.6} \left[\frac{(1.724)(40)}{(0.05)(300)} \right]^{0.5} = 3.57m$$



Tomamos un ancho de 3.6 m aproximadamente.

$$L = \frac{40}{3.6} \approx 11m$$

Por lo que se tiene una relación largo: ancho de 3: 1.

En el caso de tomar la temperatura mínima del aire de los registros mensuales de 1989 a 2010, existen registros del Servicio Meteorológico Nacional de hasta 4.6 °C, resultaría lo siguiente:

1. Se asume una temperatura de diseño del agua en el humedal FS de 13.64 °C.

$$K_{13.64} = 1.104(1.06)^{(13.64-20)} = 0.7621d^{-1}$$

2. Se determina el área superficial requerida para el humedal FS.

$$A_s = \frac{(1.724)[\ln(287/10)]}{(0.7621)(0.60)(0.29)} = 43.64m^2$$

3. Se determina el tiempo de retención hidráulica.

$$TRH = \frac{(43.64)(0.6)(0.29)}{1.724} = 4.4d$$

4. Se calcula la temperatura promedio del agua. Asumimos una capa de vegetación de 5 cm, el medio de 60 cm y una capa de arena de 5 cm que cubre el humedal.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{0.05}{0.05}\right) + \left(\frac{0.60}{2}\right) + \left(\frac{0.05}{1.5}\right)} = 0.75$$

La temperatura del aire se toma como 4.6°C.

$$T_c = \frac{q_L}{q_G} = \frac{(0.75)(86400)(4.4)}{(4215)(999.98)(0.6)(0.29)} (15.82 - 4.6) = 4.37^\circ C$$

$$T_e = 15.82 - 4.37 = 11.45^\circ C$$

$$T_w = \frac{15.82 + 11.45}{2} = 13.64^\circ C$$

La temperatura de 13.64 °C asumida es correcta.



$$W = \frac{1}{0.6} \left[\frac{(1.724)(43.64)}{(0.05)(300)} \right]^{0.5} = 3.73m$$

$$L = \frac{43.64}{3.73} \approx 11.70m$$

Por lo que se tiene una relación aproximada, L: W= 3:1.

En la tabla 5.4 correspondiente a las tasas típicas de carga superficial para humedales FS (U.S. EPA, 2000), se tienen porcentajes de remoción de DBO entre 67% y 83% aproximadamente para una temperatura de 20°C, por lo que se deducen las siguientes relaciones:

$$\% \text{remoción} = \left| \frac{DBO_{ENTRADA} - DBO_{SALIDA}}{DBO_{ENTRADA}} \right| \times 100$$

Para la remoción del 67% de la DBO:

$$DBO_{ENTRADA} - DBO_{SALIDA} = 0.67DBO_{ENTRADA}$$

$$DBO_{SALIDA} = 0.33DBO_{ENTRADA}$$

Para la remoción del 83% de la DBO:

$$DBO_{ENTRADA} - DBO_{SALIDA} = 0.83DBO_{ENTRADA}$$

$$DBO_{SALIDA} = 0.17DBO_{ENTRADA}$$

En nuestro caso, teóricamente, en las mejores condiciones el porcentaje de remoción sería de aproximadamente 96%, reducir la DBO de 287 mg/l a 10 mg/l. Ahora diseñamos para una DBO de salida de 30 mg/l, lo que significaría reducir la DBO aproximadamente en un 89 %, que es un porcentaje razonablemente bueno que cumple fácilmente con los límites permisibles de la tabla 7.4, por lo que análogamente al análisis anterior resulta:

1. Se asume una temperatura de diseño del agua en el humedal FS de 15.38 °C.

$$K_{15.38} = 1.104(1.06)^{(15.38-20)} = 0.8434d^{-1}$$

2. Se determina el área superficial requerida.

$$Q = 1.724[m^3 / d]$$

$$DBO_{afluente} = 287[mg / l]$$



$$DBO_{\text{efluente}} = 30[\text{mg} / \text{l}]$$

$$y = 0.6[\text{m}]$$

$$n = 0.3$$

$$k_s = 500[\text{m}^3 / \text{m}^2 / \text{d}]$$

$$A_s = \frac{(1.724)[\ln(287 / 30)]}{(0.8434)(0.60)(0.3)} = 25.64\text{m}^2$$

3. Se determina el tiempo de retención hidráulica.

$$TRH = \frac{(25.64)(0.6)(0.3)}{1.724} = 2.7\text{d}$$

4. Se calcula la temperatura promedio del agua.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{0.05}{0.05}\right) + \left(\frac{0.60}{2}\right) + \left(\frac{0.05}{1.5}\right)} = 0.75$$

Tomamos la temperatura mínima del aire de las temperaturas medias mensuales desde 1989 a 2010, que corresponde a 12 °C.

$$T_c = \frac{q_L}{q_G} = \frac{(0.75)(86400)(2.7)}{(4215)(999.03)(0.6)(0.3)}(15.82 - 12) = 0.87^\circ\text{C}$$

$$T_e = 15.82 - 0.87 = 14.95^\circ\text{C}$$

$$T_w = \frac{15.82 + 14.95}{2} = 15.38^\circ\text{C}$$

La temperatura de 15.38°C asumida es correcta.

$$W = \frac{1}{0.6} \left[\frac{(1.724)(25.64)}{(0.05)(500)} \right]^{0.5} = 2.21\text{m} .$$

$$L = \frac{25.64}{2.21} \approx 11.60\text{m}$$

Por lo que se tiene una relación aproximada, L: W= 3:1.



Análogamente se resuelve para el caso de la temperatura de 4.6°C, variando la DBO a la salida a 30 mg/l. La tabla 8.2 resume los cuatro casos descritos anteriormente:

Tabla 8.2. Diferentes casos propuestos para el dimensionamiento de la celda de humedal artificial

Temperatura (°C)	DBO (entrada)	DBO (salida)	K (temperatura)	Área (m ²)	TRH (d)	L (m)	W (m)	L:W
12.00	287	10	0.8317	40.00	4.0	11.00	3.60	3: 1
		30	0.8343	25.64	2.7	11.00	2.21	5: 1
4.60	287	10	0.7621	43.64	4.4	11.70	3.73	3: 1
		30	0.7976	28.20	2.8	9.40	3.00	3: 1

8.1. Criterios de construcción

De acuerdo a las dimensiones previas obtenidas para la construcción del humedal, se propone una lista de pasos que pueden seguirse para la construcción del humedal. Es necesario considerar las siguientes condiciones:

El agua debe estar disponible durante todo el año para mantener las plantas y las bacterias vivas.

- Los flujos grandes (causados por la lluvia torrencial) pueden agobiar el sistema, y debe ser desaguado en el caso de una tormenta grande hasta que el agua esté debajo de la superficie del suelo
- Las aguas residuales deben fluir naturalmente vía gravedad en el humedal
- Las aguas residuales no deben estancarse para evitar el crecimiento de mosquitos
- Las plantas de un humedal natural local pueden ser trasplantadas para el uso en humedales artificiales, o pueden ser compradas en un vivero local
- Una pared o capa impermeable debe rodear el humedal entero para prevenir que las aguas residuales salgan antes de ser tratadas completamente. El desagüe apropiado permitirá que el agua salga del sistema después del tratamiento



Tabla 8.3. Principales materiales utilizados para la construcción de un humedal artificial

Materiales principales
Cemento
Bloques de concreto
Tubos de PVC o metal (entrada y salida)
Filtro (malla fina de plástico)
Cubierta impermeable
Válvula de desagüe
Arena y grava
Cubierta de tierra
Vegetación (de un humedal natural local ó el más cercano)

8.2. Fases generales de construcción del humedal tipo FS

Con base en el diseño conceptual, existen varios aspectos fundamentales que deben ser tomados en cuenta al momento de construir un humedal, tal es el caso de la impermeabilización del terreno, la selección y colocación del material granular, implantación de vegetación y las estructuras de entrada y descarga.

Existen una serie de pasos generales para la construcción del humedal que, como ocurre en la mayoría de las obras civiles, requerirán de ajustes en el momento de la construcción debido a las dificultades que se van encontrando y que no se tenían previstas, es por eso que sólo se mencionan las fases generales de construcción, que deben ser llevadas a cabo por el criterio de la persona responsable(s) de la obra civil, tales fases se mencionan a continuación: (1) desmonte; (2) despalme y compactación; (3) excavación de las zanjas para los humedales; (4) nivelación de las zanjas para los humedales; (5) impermeabilización de los humedales; (6) selección y colocación del material granular; (7) implantación de vegetación; (8) estructuras de entrada y salida.

8.2.1. Desmonte y despalme

El desmonte consiste en quitar toda la vegetación dentro del área de influencia de la construcción de la celda del humedal, en este trabajo se incluye el desenraíce, donde si quedan hoyos, se rellenarán con material de buena calidad y compactado adecuadamente. Una vez desmontado el terreno natural, se extrae la capa de material que contenga material vegetal. El espesor de esta capa puede variar de 10 a 50 cm (a esta etapa se le denomina despalme).



8.2.2. Excavación y compactación de las zanjas para los humedales

Inicialmente se realizarán en campo los trabajos de topografía de trazo y localización. La excavación puede ser realizada por personal, maquinaria ó una combinación de ambas que será decidida de acuerdo a las dimensiones del proyecto. En el caso de que se decida utilizar maquinaria, se recomienda una retroexcavadora, debiendo cavar a la profundidad deseada. En seguida se compacta el terreno natural sólo si se requiere y, cuando se hace, se llega generalmente al 90% del peso volumétrico seco máximo (PVSM) de acuerdo al equipo disponible, de lado a lado y a todo lo largo, se deberá hacer de manera cuidadosa y correcta, de tal forma que el terreno quede completamente nivelado y libre de palos, rocas, piedras o algún elemento que pudiera ocasionar daños en la barrera impermeabilizante.

Características del material de relleno:

- Los rellenos serán de material de banco, que no contengan más del 5 % de partículas mayores a 7.6 cm (3´´) y podrá estar constituido por una arena limosa o limo arenoso (tepetate) que cumpla con las siguientes características:
- El peso volumétrico seco máximo determinado con la prueba ASTM D-698 no deberá ser mayor de 1.8 t/m³ ni menor de 1.6 t/m³
- El límite líquido de la fracción fina será menor al 30 %
- La fracción fina deberá tener una contracción lineal máxima del 4.5 %
- El material de relleno estará formado por capas de tepetate (20 cm) de espesor compactado. Para compactarla deberá humedecerse y homogenizarse hasta alcanzar un valor cercano la humedad óptima ($\pm 2\%$)
- Se recomienda equipo de compactación manual (pistón neumático)
- Deberá satisfacer la granulometría mostrada en la figura 8.1

Durante la compactación de los rellenos se deberá tener cuidado de no dañar las instalaciones de drenaje, en su caso.

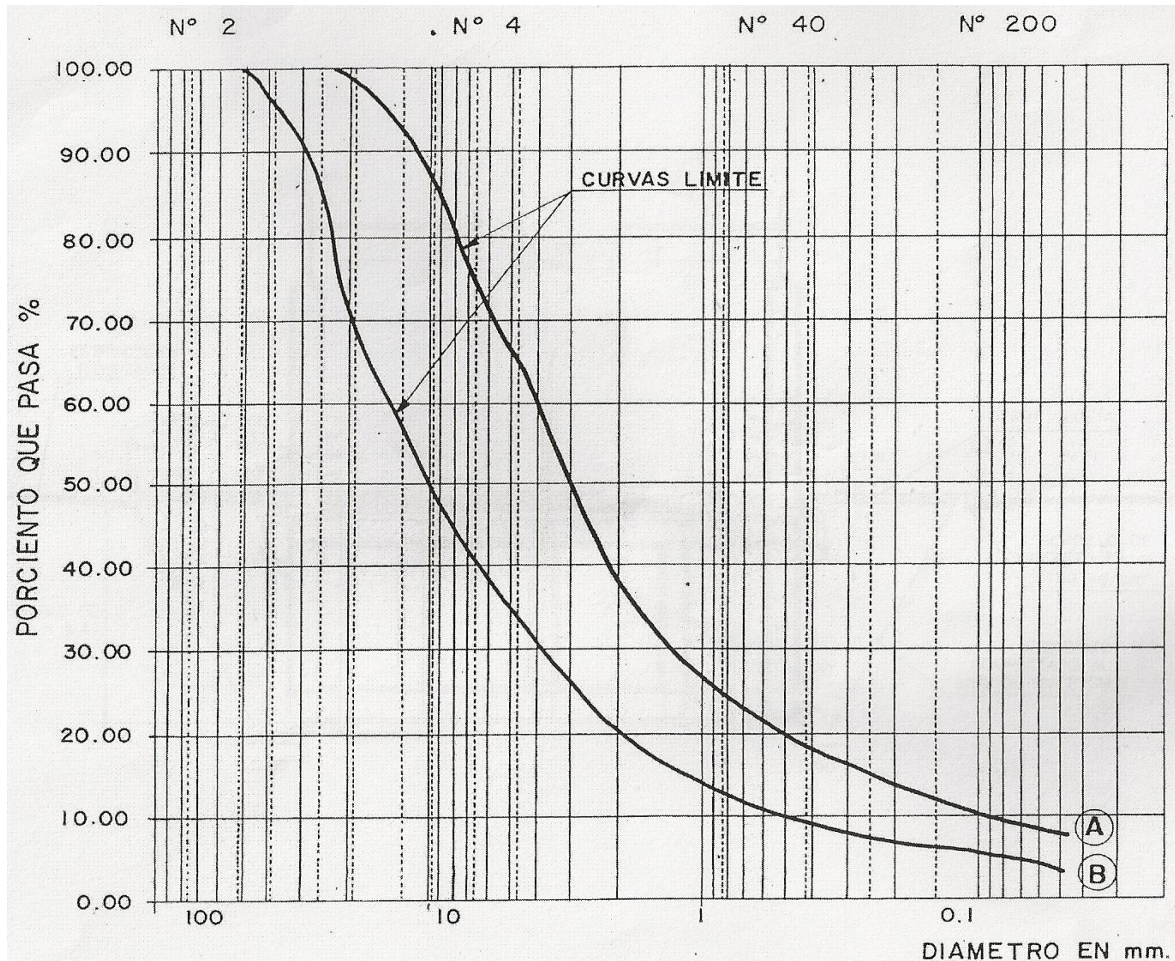


Figura 8.1. Granulometría del material de relleno

8.2.3. Nivelación de las zanjas para los humedales

Debe realizarse con equipo de topografía.

8.2.4. Uso de impermeabilizantes entre el suelo y el agua residual

Los humedales FS normalmente incluyen una o más celdas de poca profundidad con el fondo recubierto para prevenir la percolación a la capa freática susceptible a la contaminación; el tipo de recubrimiento depende de las condiciones locales, un punto importante es la selección del material de impermeabilización entre el agua residual y el suelo, algunas veces esta “barrera” se presenta de forma natural (como lo es una capa de arcilla con una permeabilidad muy baja que se aproxima a 10^{-7} a 10^{-9} cm/s) ó por los materiales del sitio y que por medio de la compactación se llegue a un estado cercano al impermeable. Otras alternativas sugieren tratamientos químicos, una capa de bentonita, asfalto ó el uso de alguna fibra sintética disponible en el mercado.

En este trabajo nos enfocaremos al uso de alguna geomembrana para la impermeabilización del humedal artificial, debido a la facilidad de colocación y efectividad de la misma, además de que se está haciendo más común el uso de este tipo de materiales para la construcción de obras civiles.



La geomembrana es el nombre genérico que recibe la lámina impermeable hecha a partir de diferentes resinas plásticas, su presentación es en rollos y viene en diferentes espesores, cada material sintético tiene cualidades físicas y químicas distintas que hacen la diferencia para cada geomembrana, los más comunes son HDPE, FPP, PVC y VLPDE.

El polietileno de alta densidad o HDPE por sus siglas en inglés, es la geomembrana de más demanda en el mercado, a pesar de su popularidad no es ni el más moderno ni el mejor de los plásticos, una de sus características importantes es su resistencia al ataque químico.

El polietileno de baja densidad es un material blando y elástico, mientras que el polietileno de alta densidad es más duro y rígido; ambos son inertes a la mayoría de los ácidos y álcalis. Los aditivos más empleados en el polietileno son los antioxidantes y los absorbentes de rayos ultravioleta, para evitar la degradación oxidativa y la fotodegradación.

El polipropileno flexible (FPP) es de la nueva generación de geomembranas, conserva las dos cualidades de los materiales más importantes, la flexibilidad de la geomembrana de PVC y la resistencia química del HDPE. Tiene la ventaja de su larga duración expuesta a la intemperie y en las de protección del medio ambiente es suficientemente resistente a la agresión química tanto o más que el HDPE.

La geomembrana de PVC es otro de los productos más solicitados, debido a las características de sus rollos (por lo regular de dimensiones reducidas) y por su fácil instalación sigue siendo un producto muy popular.

Las propiedades físicas, químicas, térmicas y mecánicas (ligero, inerte y completamente inocuo, resistente a la intemperie, económico en cuanto a su calidad-precio y reciclable) dependen de las formulaciones empleadas, no pudiéndose generalizar dada la gran variedad de formulaciones posibles a realizar. Dichas propiedades dependerán en gran medida a la proporción y tipo de aditivos, en especial los plastificantes.

Por estos motivos el PVC ofrece un gran número de posibilidades de aplicación, debido a su bajo costo y al conjunto de propiedades que el mismo presenta, ya que su resistencia a los agentes químicos es buena, soportando algunos ácidos y álcalis, siendo insoluble ante un gran número de disolventes orgánicos.

La geomembrana VLDPE es una membrana termoplástica de diferentes poliolefinas que puede ser empleada para hacer lagos artificiales, embalses, estanques y cisternas. Por sus características existen empresas que otorgan 10 años de garantía en este material con exposición a la intemperie.

El polietileno de muy baja densidad, es el avance tecnológico más importante en la fabricación de geomembranas, tiene la resistencia química del FPP y del HDPE, la flexibilidad de la geomembrana de PVC, su termofusión es sencilla y su tiempo de vida es superior al de cualquier otra geomembrana.

Por lo anterior se recomienda una geomembrana al menos de un material de PVC, tomando en cuenta los recursos disponibles.

8.2.5. Colocado de arena- grava en la celda de tratamiento

Actividad muy importante y delicada, por el material impermeabilizante utilizado, por ello se recomienda colocarlo manualmente durante varias jornadas, por la necesidad de controlar permanentemente el colocado de grava con cuidado, para evitar daños en la geomembrana.

El tamaño medio de la grava va desde (≥ 0.6 cm ó ≥ 0.25 pulgadas) hasta roca grande triturada (≥ 15.2 cm ó ≥ 6 pulgadas); la combinación de tamaños de 1.3 a 3.8 cm (0.5 a 1.5 pulgadas) es la más comúnmente usada, este medio de grava debe ser de piedras limpias, duras y duraderas, con capacidad de retener su forma y la permeabilidad del lecho del humedal a largo plazo.

8.2.6. Implantación de la vegetación

Debe de supervisarse el desarrollo y adaptación de la vegetación, al menos un vez al mes y por parcelas de 1m^2 , estableciendo programas de mantenimiento de acuerdo a las condiciones locales.

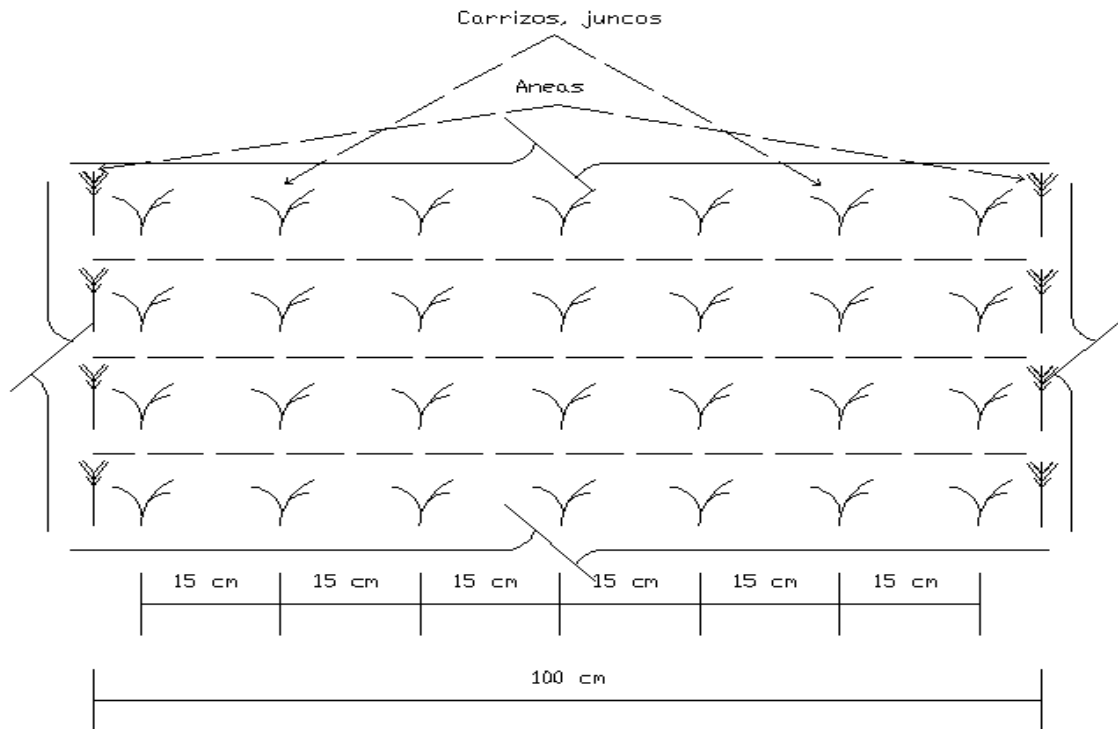


Figura 8.2. Corte de una distribución propuesta para la colocación de juncos, carrizos y aneas en un humedal artificial

8.3. Estructuras de entrada y descarga

Las estructuras de entrada y descarga se emplean para asegurar la distribución adecuada y la recolección uniforme del agua residual aplicada. El método más comúnmente utilizado en los sistemas de menor tamaño consiste de una tubería múltiple perforada. La profundidad del medio en estos humedales FS tiene un rango de 0.3 a 0.9 m, siendo el valor más común el de 0.6 m.

Los dos sistemas, FLS y FS, requieren condiciones de flujo uniformes para alcanzar rendimientos esperados. Esto se alcanza en sistemas de pequeño o moderado tamaño con tuberías de recolección perforadas que se extienden a lo ancho de toda la celda, tanto para la entrada como para la salida.

Un colector de entrada sobre la superficie permite el acceso para ajustes y control, por lo que se prefiere para muchos sistemas. Este colector generalmente consiste en una tubería plástica de 100 a 200 mm de diámetro, con una “t” ubicada sobre la línea, aproximadamente cada 3 m. El operario puede mover cada “t” alrededor de un arco vertical y de ese modo puede hacer un ajuste visual e igualar los caudales. Los pequeños sistemas FS incluyen normalmente una tubería perforada colocada en el fondo del lecho y rodeada por material rocoso.

El conducto de salida tanto para los sistemas FS como para FLS consiste normalmente en una tubería perforada colocada al final de la celda y en el fondo del lecho, en algunos casos se coloca en una zanja poco profunda, rellena con material rocoso, ligeramente por debajo del fondo de la celda del humedal para asegurar un drenaje completo.

Los sistemas grandes normalmente tienen estructuras de entrada y salida en concreto. En el caso de las de salida, suelen contar con un dispositivo variable que permita controlar el nivel del agua en la celda del humedal, como el que se muestra en la figura 8.3.

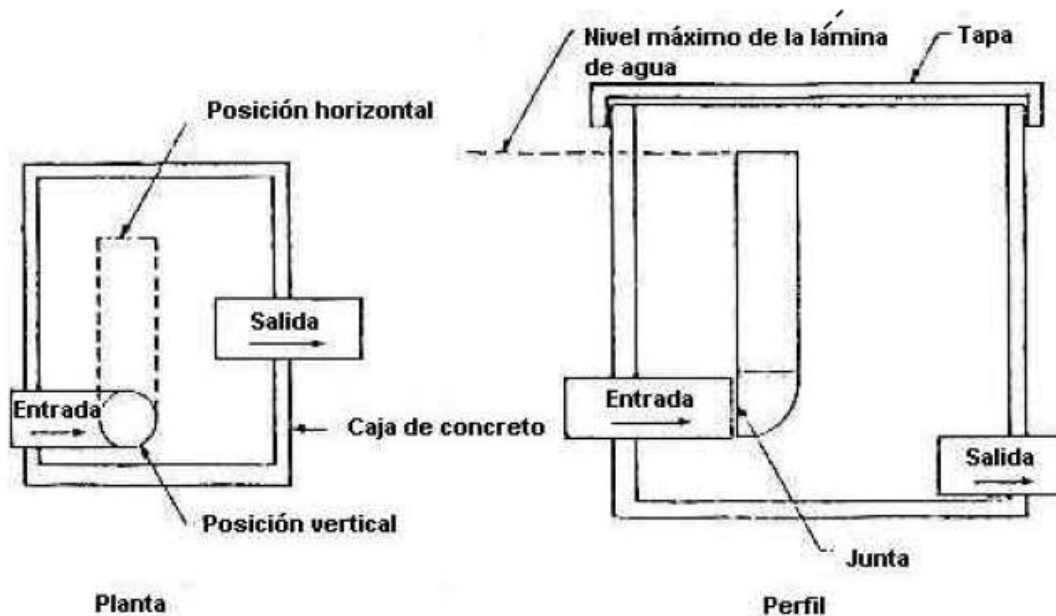


Figura 8.3. Estructuras de control

8.4. Consideraciones a tomar en cuenta en el momento de la construcción del humedal

Muchos materiales diferentes pueden ser utilizados para construir el humedal, así que los diseños locales pueden variar.

- Identificar una ubicación para el humedal que conecta a la corriente de las aguas residuales.
- Calcular el tamaño del humedal construido que se planea construir (véase los cálculos previos).
- Graduar el fondo de la celda para que tenga una pendiente de 0.5%. La disminución resultante en la altura de una celda por cada 10 m es 0.05, es decir: $10 \text{ m} \cdot [0.5/100] = 0.05 \text{ m}$ ó 5 cm.

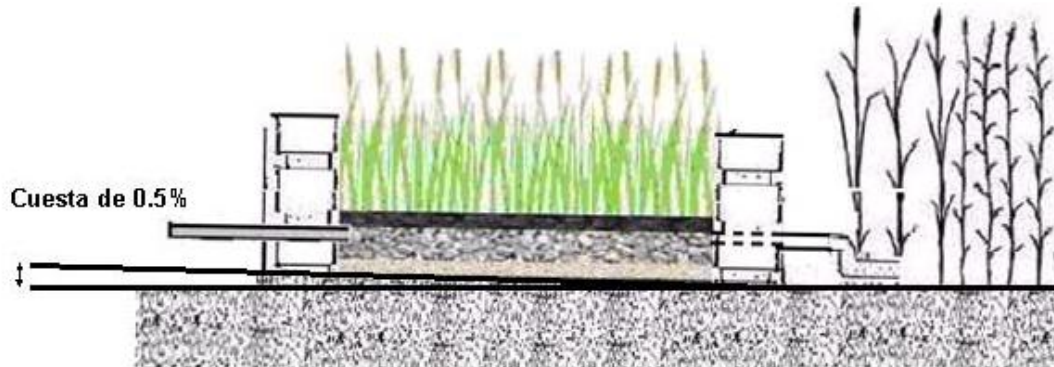


Figura 8.4. La cuesta de la inundación de humedal debe estar cerca de 0.5%

- Construir la celda de humedal sobre el suelo (y barrera impermeable), permitiendo el espacio para conectar la corriente de las aguas residuales a la celda del humedal en la entrada.
- Incorporar una válvula de drenaje en el fondo de la celda, en el lado al fondo de la pendiente. La válvula servirá para controlar el nivel del agua, y en su caso bajar el nivel de la misma, además de motivar el crecimiento de las raíces.
- Incorporar la entrada de agua residual.
- El agua residual debe ser distribuida uniformemente en el área de entrada para promover un flujo equitativo en el humedal.
- Para sistemas más pequeños, un tubo perforado o una serie de tubos pueden servir a este propósito.
- Asegurar la colocación de una malla de plástico fina sobre la apertura para evitar que se tape (ver figura 8.5).
- Crear un sistema de salida (uno o varios tubos).
 - El tubo debe estar a la misma altura que la entrada, apenas por debajo del nivel de la arena
 - Instalar un filtro de malla fina de plástico para prevenir que el piso y la grava pasen por el tubo, causando posibles estancamientos

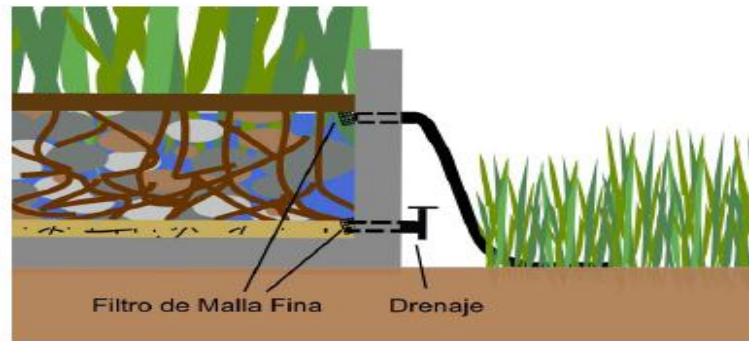


Figura 8.5. Filtros de malla fina de plástico y drenaje en la salida

- Aplicar una capa de arena gruesa o capa vegetal de 5 cm aproximadamente de espesor en el fondo de la celda.
- Colocar una capa de grava por encima de la capa vegetal o de arena. El tamaño de la grava o roca triturada en el primer metro de entrada y el último metro a la salida debe estar entre 5 y 10 cm de diámetro; esto reduce el riesgo de obstruir la entrada y salida, en caso de que los sólidos suspendidos lleguen a estas áreas.
 - Aplicar 45 a 75 cm de capa de grava, (en los cálculos se supuso de 0.6 m)
 - La profundidad de grava variará según los cálculos previstos
 - Poner una capa de arena o tierra de 5 cm de espesor
 - Colectar y sembrar plantas de un humedal natural local (recomendado) o de un vivero, cuando se usan plantas de un humedal natural local, la planta debe de ser transplantada por completo (hojas, tallo, raíces, retoños) más un poco de tierra del lugar. Se puede traer la planta de un humedal local desde la base, y se debe tener cuidado que no se quiebren los tallos. Los tallos (la parte que no está sumergida en el agua) pueden ser cortados a aproximadamente 20 cm
 - La parte con la raíz debe ser colocada aproximadamente 5 cm debajo de la capa de arena ó tierra orgánica en el humedal construido. Las aneas pueden ser colocadas a una distancia de 1 m entre cada planta; los carrizos, juncos y espadañas pueden ser plantadas a 15 cm de distancia (Mitch y Gosselink 2000)
 - Con tiempo, es importante realizar una zona de raíces consistente. Se puede realizar esto bajando el nivel de agua gradualmente para motivar que las raíces crezcan desde lo más profundo
- Saturar el piso con agua hasta la superficie (no más) y permitir que se evapore lentamente, manteniendo el suelo húmedo durante todo el período de propagación, aproximadamente 2 a 3 meses.
- Después de que las plantas se hayan establecido, utilice el desagüe para ajustar el nivel del agua en la celda para alentar la penetración más profunda de la raíz de la planta en el medio de grava.



- Finalmente las raíces de la planta se extenderán al fondo del sustrato. Las plantas deben establecerse bien antes de que se empiece a tratar las aguas residuales. Si no se puede esperar hasta que se establecen completamente, aquellas plantas que mueran pueden ser sustituidas.

El agua del efluente debe salir en el nivel del suelo y fluir por un área con vegetación o llena con piedras. Una manguera puede ser conectada a la salida para bajar el agua al nivel del piso. Ya que el agua efluente no es potable, es importante que el agua no salpique cuando llegue el suelo, ya que contaminantes residuales pueden causar enfermedades si son ingeridos.



Apartado gráfico del sitio de interés



Figura 8.6. Vista panorámica del sitio propuesto para la construcción de la celda de humedal para el tratamiento de aguas residuales



Figura 8.7. Vista aproximada de las dimensiones de la celda de humedal. Las dimensiones necesarias para la remoción de DBO se proponen e 40.00 m^2 (en el lecho), con una relación largo: ancho de 3:1



Figura 8.8. Desmonte y despalme



Figura 8.9. Excavación, compactación, nivelación e impermeabilización con geomembrana. Se recomienda excavar 75 cm aproximadamente (10 cm de la capa orgánica, 60 cm de medio- arena-grava y 5 cm de cubierta) además el talud de avance en el frente de la excavación será de 2:1 (vertical: horizontal) por lo que el área superficial tiene que ser de:

$$\text{Largo: } 11\text{m} + (0.375*2) = 11.75 \text{ m}$$

$$\text{Ancho: } 3.6 + (0.375*2) = 4.35 \text{ m}$$

Por lo que después de revisar nuevamente las dimensiones del lugar existe el espacio suficiente, (junto al edificio de la DICyG) para el tránsito de personas, principalmente trabajadores.



Figura 8.10. Colocación de arena ó capa vegetal (aproximadamente 5-10 cm)



Figura 8.11. Colocado de arena- grava en la celda de tratamiento (aproximadamente 60 cm). Es necesaria la colocación de la grava más gruesa (5 a 10 cm de diámetro) al inicio y al final, abarcando una distancia de 0.5 a 1 m. Para el medio se utilizará el tamaño calculado (dependientes de la relación de vacíos y la conductividad hidráulica). Se debe tener cuidado en la colocación de las estructuras de entrada y descarga, que vayan por debajo del medio

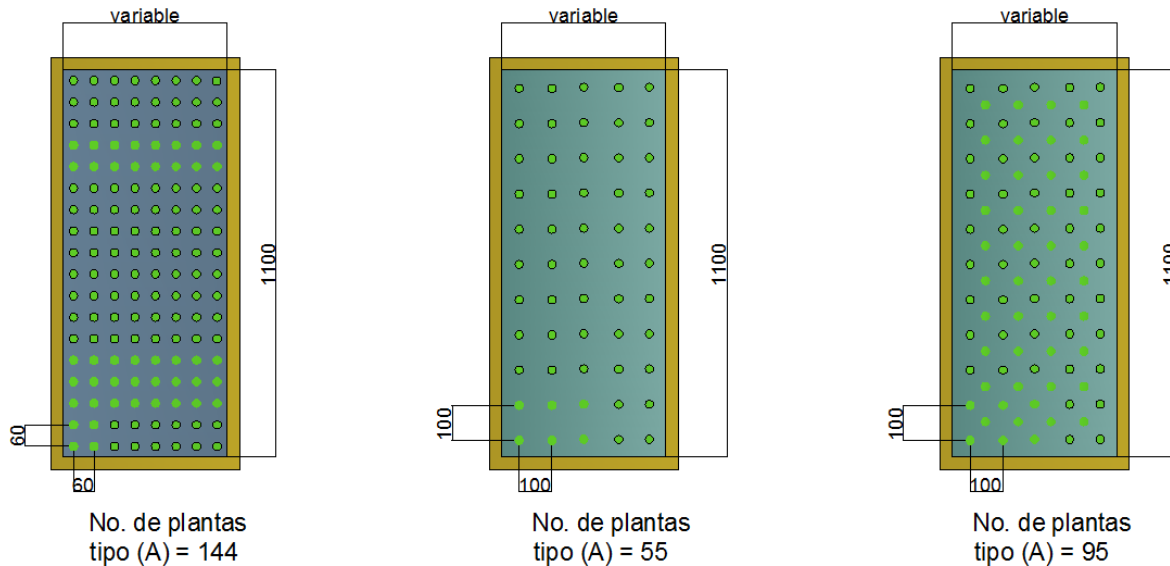


Figura 8.12. Implantación de la vegetación. La separación promedio de las plantas es variable, se pueden utilizar dos especies nativas de zonas aledañas (ver capítulo 6), como lo es la región de Xochimilco. Algunos autores recomiendan separaciones de 1 m para las aneas mientras que otros recomiendan 0.6 m, lo mismo sucede para las espadañas donde se recomiendan separaciones de 15 cm mientras que otros recomiendan separaciones de 0.6 m. Por lo anterior se muestran algunas posibilidades de separaciones en la colocación de las especies*, que deben ser evaluadas en su momento y de la experiencia de otros sistemas ecológicos similares. La distribución de plantas usando una sola especie, (de izquierda a derecha), con separaciones de 0.6 m se estiman 144 unidades, separaciones de 1 m se estiman 55 unidades, en la última figura se muestra otra alternativa donde se modifica la anterior, colocando plantas intermedias entre cada metro (a cada 0.5 m)

*Las dimensiones del área a implantar pueden variar al momento de la construcción, así como el número de plantas

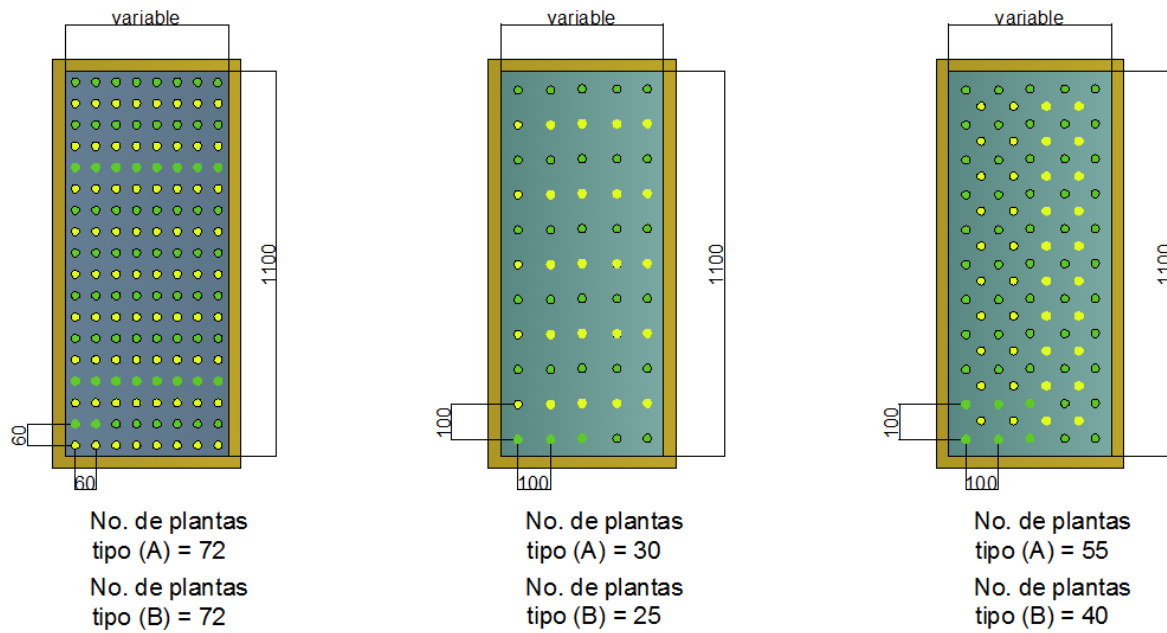


Figura 8.13. Distribución de plantas usando dos especies en filas alternadas

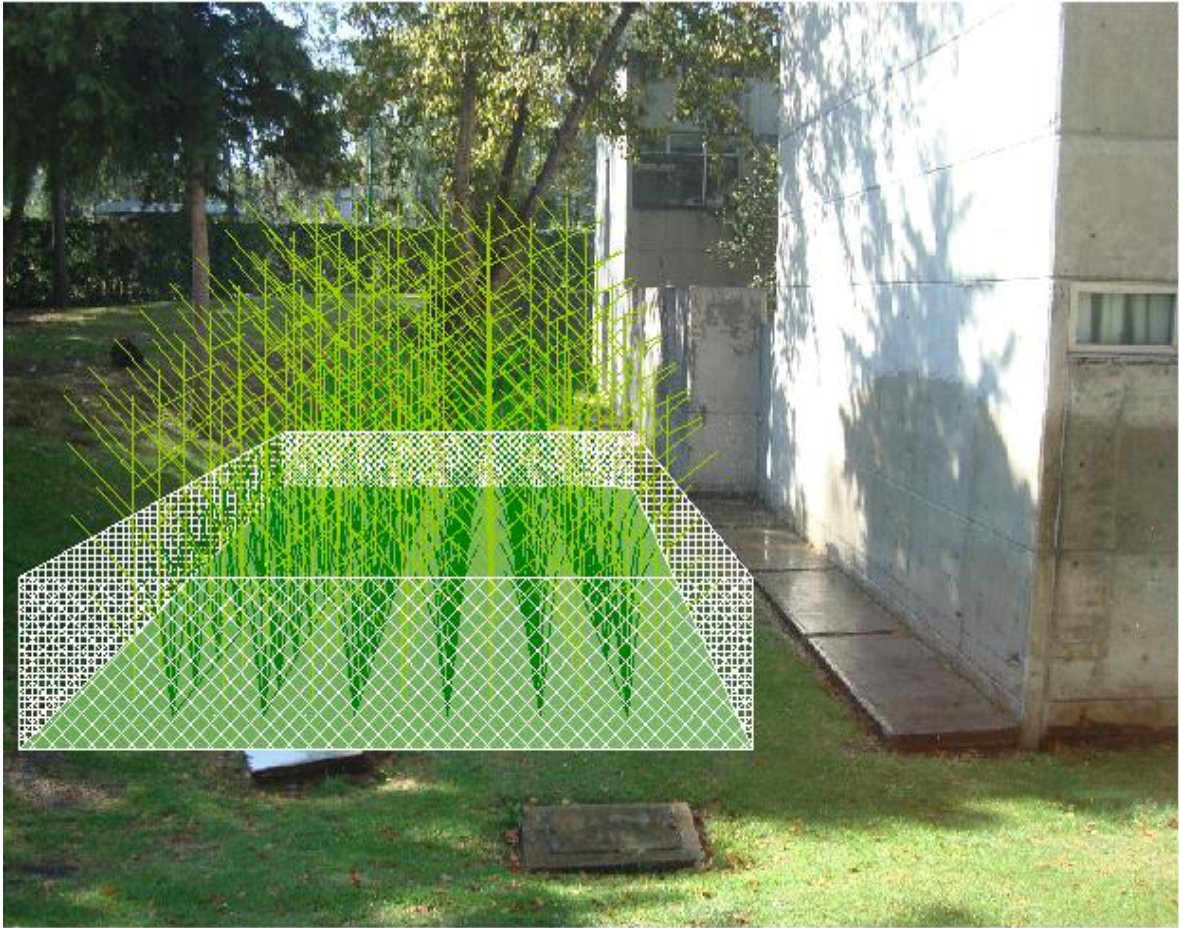


Figura 8.14. Es recomendable el uso de malla ciclónica para la protección y delimitación del sitio. La puerta de mantenimiento debe ser escogida en el momento de la construcción



Figura 8.15. Vista panorámica de las estructuras de entrada



Figura 8.16. Vista de detalle de las estructuras de entrada

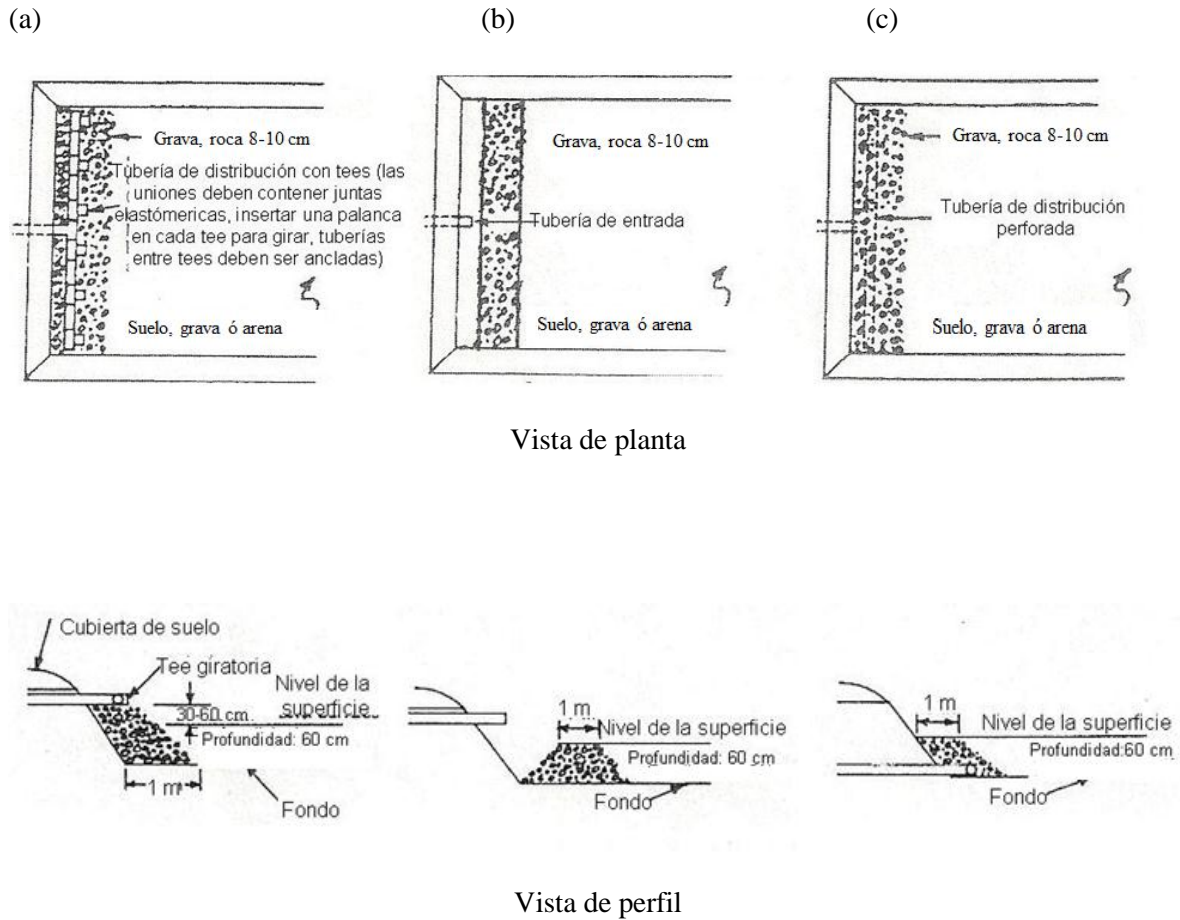


Figura 8.17. Propuestas de diferentes configuraciones de entrada para humedales FS: (a) entrada con tees giratorias; (b) entrada con gabi3n; (c) entrada con tubería de distribución enterrada



Figura 8.18. Vista panorámica de las estructuras de salida



Figura 8.19. Vista de detalle de las estructuras de salida

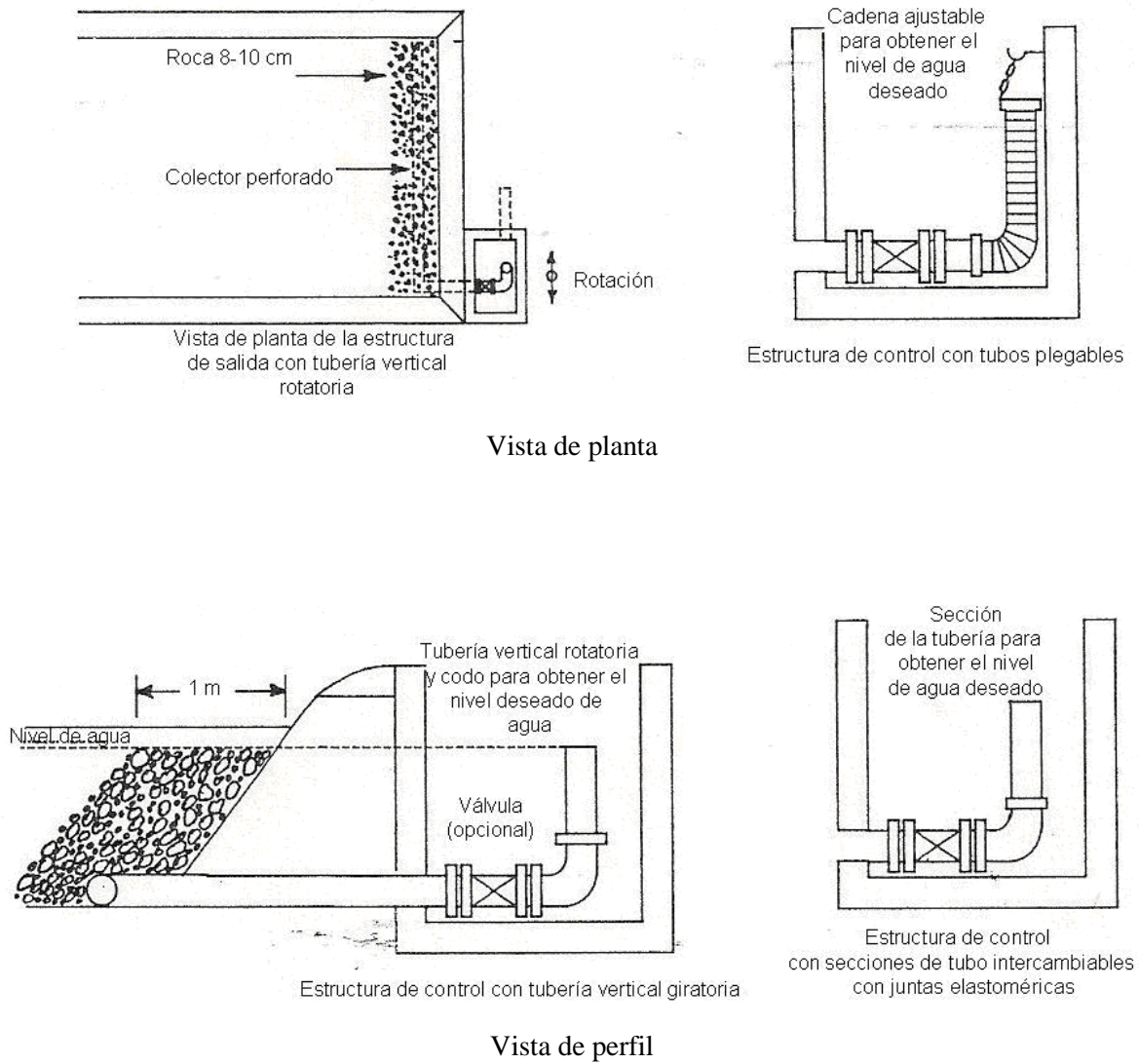


Figura 8.20. Propuesta de estructuras de control de nivel de agua a la salida para humedales FS



Conclusiones y recomendaciones

- Para una mejor identificación del flujo, es necesario desazolvar las tuberías de desagüe, donde se van hacer las conexiones con el humedal, porque no se puede identificar una sola tendencia de los gastos horarios debido a la variabilidad en cada día.
- Los valores del afluente de las tablas del capítulo 5 (U.S. EPA), al ser analizados y comparados con los valores obtenidos en la caracterización del agua residual de la DICyG, resultan muy bajos, es decir, los 100 mg/l son muy bajos en comparación con la concentración de DBO media de 287 mg/l utilizada para el diseño. Esto se debe a que en los resultados del afluente de la EPA, posiblemente hayan tenido un tratamiento preliminar, y se utilizó el humedal artificial para darle uno de los pasos finales de tratamiento al agua residual. En nuestro caso esto no sucede, ya que las muestras obtenidas y analizadas, fueron obtenidas directamente en el sitio de vertido y sin algún tren de tratamiento previo. Por el momento el área calculada tiene el objetivo de efectuar un tratamiento único; aunque para futuros análisis, la celda de humedal artificial puede complementarse con tratamientos previos. Igualmente, las concentraciones de Sólidos Totales (SST+SSD), fueron muy altas encontrándose concentraciones de hasta 1125 mg/l; predominando en todas las muestras una mayor cantidad de SSD.
- Para el dimensionamiento de la celda de humedal se tomaron como restricciones el espacio disponible detrás del edificio de la DICyG, evitando un sobre dimensionamiento y volúmenes de excavación, por lo que se mostraron varios casos, a través de métodos iterativos en excel empleando las fórmulas del modelo de diseño para la remoción de contaminantes y el modelo general para humedales FS. Se tomaron las recomendaciones de no sobrepasar una relación 4: 1, y de acuerdo a la forma natural del sitio, se ajustó la forma al área requerida y calculada.
- Es de esperar que las descargas del efluente cumplan las concentraciones de diseño de al menos 30 mg/l para un área en el lecho de 40.00 m², suficientes para cumplir con las restricciones que establece la NOM 001-SEMARNAT-1996 para contaminantes básicos.
- Aunque no está en los alcances de este trabajo, la reutilización del agua tratada, podría fácilmente ser reutilizada y complementándose con otros trenes de tratamiento previos, siendo el humedal artificial una conexión para proporcionar tratamientos avanzados.



- Se puede afirmar que los humedales artificiales son una tecnología de bajo costo para depurar aguas residuales. Se puede esperar también una reducción de un orden de magnitud en coliformes fecales, (que sucede en sistemas diseñados para producir efluentes de tratamiento secundario o avanzado).
- La factibilidad de construcción de estos humedales no es muy conocida por la población en general, por lo que se puede construir en la Facultad de Ingeniería para que pueda servir no sólo para tratar las aguas residuales de la Facultad y algunos otros edificios de Ciudad Universitaria, sino también para continuar actividades de investigación y capacitación a través de prácticas de laboratorio, principalmente. Se debe hacer un registro de las mediciones hechas en el humedal, una vez operando, tal como caudal del líquido recibido, caudal de salida, caracterización del agua residual a la entrada y salida, etc., para formar una base de datos y hacer los ajustes necesarios para ir optimizando su funcionamiento de estos sistemas.



Anexo 1

Determinación del volumen total y obtención de muestras simples en el sitio de vertido actual

Objetivo

Obtener el caudal medio diario de aguas residuales generadas por la DICyG, así como la obtención de muestras para su caracterización en laboratorio, como necesidad de recaudación de información para la propuesta de este trabajo.

Metodología

Para la obtención del gasto medio del sitio de vertido actual, se programaron 5 días para la medición del caudal, cuyas muestras fueron obtenidas directamente del sitio de descarga, con un sistema improvisado, por medio del conteo de cubetas (10 litros cada una y llenas), anotando el número de ellas por período (1 hora) en un horario de 7:00 a 20:00 horas.

Además se obtuvo el volumen de la muestra (muestra compuesta) mezclando todas las muestras simples obtenidas durante el día y se conservaron a bajas temperaturas en una hielera (no más de 4 horas), posteriormente se llevaron a refrigeración en el laboratorio de ingeniería ambiental.

Al término de la jornada de trabajo se preparó la muestra compuesta para su análisis del día siguiente (4 litros aproximadamente), de acuerdo a los requerimientos de la persona encargada de laboratorio. Los resultados se muestran a continuación y en orden cronológico de las jornadas de trabajo programadas:

8 de noviembre de 2010

Hora	Número de cubetas vaciadas	Hora de obtención de la muestra	T [°C]	Volumen [l]	% Vol	Vol de la muestra (ml)
07:00 - 08:00	18	07:45	14	180	11.04	442
08:00 - 09:00	8	08:40	14	80	4.91	196
09:00 - 10:00	11	09:45	14	110	6.75	270
10:00 - 11:00	17	10:50	15	170	10.43	417
11:00 - 12:00	11	11:43	15	110	6.75	270
12:00 - 13:00	13	12:54	16	130	7.98	319
13:00 - 14:00	15	13:47	16	150	9.20	368
14:00 - 15:00	19	14:50	17	190	11.66	466
15:00 - 16:00	11	15:48	17	110	6.75	270
16:00 - 17:00	6	16:40	17	60	3.68	147
17:00 - 18:00	9	17:45	17	90	5.52	221
18:00 - 19:00	13	18:42	15	130	7.98	319
19:00 - 20:00	12	19:38	15	120	7.36	294
Total	163		Total	1630	100	4000



9 de noviembre de 2010

Hora	Número de cubetas vaciadas	Hora de obtención de la muestra	T [°C]	Volumen [l]	% Vol	Vol de la muestra (ml)
07:00 - 08:00	13	07:40	14	130	9.56	382
08:00 - 09:00	10	08:38	14	100	7.35	294
09:00 - 10:00	5	09:54	15	50	3.68	147
10:00 - 11:00	11	10:31	15	110	8.09	324
11:00 - 12:00	20	11:38	15	200	14.71	588
12:00 - 13:00	8	12:40	16	80	5.88	235
13:00 - 14:00	10	13:38	16	100	7.35	294
14:00 - 15:00	14	14:45	16	140	10.29	412
15:00 - 16:00	6	15:37	17	60	4.41	176
16:00 - 17:00	15	16:39	16	150	11.03	441
17:00 - 18:00	8	17:42	16	80	5.88	235
18:00 - 19:00	9	18:36	15	90	6.62	265
19:00 - 20:00	7	19:46	15	70	5.15	206
Total	136		Total	1360	100	4000

10 de noviembre de 2010

Hora	Número de cubetas vaciadas	Hora de obtención de la muestra	T [°C]	Volumen [l]	% Vol	Vol de la muestra (ml)
07:00 - 08:00	7	07:45	15	70	6.80	272
08:00 - 09:00	5	08:40	15	50	4.85	194
09:00 - 10:00	10	09:42	15	100	9.71	388
10:00 - 11:00	14	10:45	15	140	13.59	544
11:00 - 12:00	9	11:40	15	90	8.74	350
12:00 - 13:00	9	12:50	16	90	8.74	350
13:00 - 14:00	12	13:44	16	120	11.65	466
14:00 - 15:00	12	14:56	16	120	11.65	466
15:00 - 16:00	8	15:47	17	80	7.77	311
16:00 - 17:00	6	16:44	17	60	5.83	233
17:00 - 18:00	4	17:30	17	40	3.88	155
18:00 - 19:00	3	18:38	16	30	2.91	117
19:00 - 20:00	4	19:41	16	40	3.88	155
Total	103		Total	1030	100	4000



11 de noviembre de 2010

Hora	Número de cubetas vaciadas	Hora de obtención de la muestra	T [°C]	Volumen [l]	% Vol	Vol de la muestra (ml)
07:00 - 08:00	9	07:45	15	90	7.56	303
08:00 - 09:00	16	08:37	15	160	13.45	538
09:00 - 10:00	10	09:37	16	100	8.40	336
10:00 - 11:00	11	10:37	16	110	9.24	370
11:00 - 12:00	12	11:43	17	120	10.08	403
12:00 - 13:00	8	12:50	17	80	6.72	269
13:00 - 14:00	7	13:45	18	70	5.88	235
14:00 - 15:00	16	14:45	18	160	13.45	538
15:00 - 16:00	10	15:50	17	100	8.40	336
16:00 - 17:00	7	16:39	17	70	5.88	235
17:00 - 18:00	3	17:45	17	30	2.52	101
18:00 - 19:00	6	18:48	16	60	5.04	202
19:00 - 20:00	4	19:40	16	40	3.36	134
Total	119		Total	1190	100	4000

12 de noviembre de 2010

Hora	Número de cubetas vaciadas	Hora de obtención de la muestra	T [°C]	Volumen [l]	% Vol	Vol de la muestra (ml)
07:00 - 08:00	14	07:42	15	140	9.86	394
08:00 - 09:00	5	08:44	15	50	3.52	141
09:00 - 10:00	9	09:41	15	90	6.34	254
10:00 - 11:00	8	10:52	15	80	5.63	225
11:00 - 12:00	10	11:45	16	100	7.04	282
12:00 - 13:00	21	12:38	16	210	14.79	592
13:00 - 14:00	21	13:40	16	210	14.79	592
14:00 - 15:00	7	14:36	17	70	4.93	197
15:00 - 16:00	10	15:39	17	100	7.04	282
16:00 - 17:00	5	16:45	17	50	3.52	141
17:00 - 18:00	18	17:42	17	180	12.68	507
18:00 - 19:00	6	18:45	16	60	4.23	169
19:00 - 20:00	8	19:35	16	80	5.63	225
Total	142		Total	1420	100	4000



Resultados

Se determinó que en el sitio de vertido, el valor promedio de caudal de descarga por día, (de 7:00 a 20:00 hr) es de $1.326 \text{ m}^3/\text{d}$; además se propone un factor de seguridad de 1.3, debido a las pérdidas; es decir el caudal que no se recuperó entre cada vaciado de cada cubeta, y las filtraciones más profundas que no se captaron.

Finalmente tenemos un gasto de diseño de $1.7238 \text{ m}^3/\text{d}$, es decir:

$$Q * 1.3 = 1.326 \text{ m}^3/\text{d} * 1.3 = 1.7238 \text{ m}^3/\text{d}$$



Anexo 2

Caracterización del agua residual de la DICyG

Objetivo

Hacer la caracterización del agua residual generada por la DICyG, para la determinación de las concentraciones de ST, SST, SSD y las cantidades de oxígeno disuelto (OD_0) para la estimación de la DBO_5 .

Metodología

Para la determinación de la DBO se utilizó el método 5120 B del Estándar Methods (Dicromato de potasio).

La temperatura y el pH se determinaron por medio de los instrumentos del laboratorio disponibles en el Departamento de Ingeniería Ambiental.

Para la DBO y de acuerdo a nuestro objetivo se realizaron las pruebas correspondientes, sin embargo, para las muestras obtenidas los dos primeros días del programa de muestreo; es decir, los días 8 y 9 de noviembre, tuvieron que ser ajustados a la DBO de los 5 días ya que sus lecturas de oxígeno disuelto final fueron tomadas a los 6 y 7 días respectivamente. Para estas transformaciones se empleó el modelo matemático mostrado a continuación:

$$DBO_t = L_0(1 - e^{-kt})$$

donde:

t: Tiempo (días)

k: Constante de degradación, día⁻¹

L_0 : Demanda bioquímica última, mg/l

La constante de degradación a los 20 °C se propuso de 0.2779 (ver capítulo 7). Aunque es posible la obtención de esta constante por el método de mínimos cuadrados o diferenciales logarítmicas, no está en los alcances de este trabajo.

Para los SST y SSD se utilizó la norma mexicana NMX-AA-034-SCFI-2001. En el caso de los Sólidos Totales (ST), se empleó la relación de las deferencias de peso del crisol con muestra (evaporada), menos el peso del crisol sin muestra, entre el volumen de la muestra:

$$ST = \frac{W_{fcrisol} - W_{icrisol}}{V}$$



donde:

ST : Sólidos Totales, mg

$W_{icrisol}$: Peso del crisol a peso constante sin muestra, mg

$W_{fcrisol}$: Peso del crisol después de la evaporación completa de la muestra, mg

V : Volumen de la muestra, l

En el caso de los SST, se determinaron por la siguiente relación:

$$SST = \frac{W_{fgooch} - W_{igooch}}{V * D}$$

donde:

W_{igooch} : Peso del recipiente gooch a peso constante con filtro, mg

W_{fgooch} : Peso del recipiente gooch después de la filtración completa de la muestra, mg

V : Volumen de la muestra, l

%D : Porcentaje de dilución

A continuación se muestra el resumen de los resultados de las muestras analizadas en el laboratorio de Ingeniería Ambiental:



8 de noviembre de 2010

Parámetro	OD ₀ (mg/l)		OD ₇ (mg/l)		DBO ₇ (mg/l)
	% dilución	Lectura (9/11/2010)	Lectura (16/11/2010)	ΔOD (mg/l)	
DBO ₅	0.5	7.3	5.0	460	520
			4.4	580	
	1.0	7.2	3.4	380	325
			4.5	270	
Sólidos	Totales		760 mg/l	Vol =50 ml	Vol =20 ml
	Suspendidos Totales		180 mg/l	W _{igooch} =0.2439 g	W _{icrisol} =52.6949 g
	Suspendidos Disueltos		580 mg/l	W _{fgooch} =0.2457 g	W _{fcrisol} =52.7101 g
				%D =20%	ST =760 mg/l
			SST =180 mg/l		

DBO₇ promedio =423 mg/l

L₀ =493 mg/l

DBO₅ =370 mg/l

9 de noviembre de 2010

Parámetro	OD ₀ (mg/l)		OD ₆ (mg/l)		DBO ₆ (mg/l)
	% dilución	Lectura (10/11/2010)	Lectura (16/11/2010)	ΔOD (mg/l)	
DBO ₅	0.5	6.9	5.4	300	320
			5.2	340	
	1.0	6.8	3.9	290	275
			4.2	260	
Sólidos	Totales		835 mg/l	Vol =50 ml	Vol =20 ml
	Suspendidos Totales		280 mg/l	W _{igooch} =0.2647 g	W _{icrisol} =44.0766 g
	Suspendidos Disueltos		555 mg/l	W _{fgooch} =0.2675 g	W _{fcrisol} =44.0933 g
				%D =20%	ST =835 mg/l
			SST =280 mg/l		

DBO₆ promedio =298 mg/l

L₀ =367 mg/l

DBO₅ =275 mg/l



10 de noviembre de 2010

Parámetro	OD ₀ (mg/l)		OD ₆ (mg/l)		DBO ₅ (mg/l)	
	% dilución	Lectura (11/11/2010)	Lectura (16/11/2010)	ΔOD (mg/l)		
DBO ₅	0.5	6.9	5.1	360	340	
			5.3	320		
	1.0	6.9	2.8	410	405	
			2.9	400		
Sólidos	Totales		1125 mg/l		Vol =50 ml	Vol =20 ml
	Suspendidos Totales		330 mg/l		W _{igooch} =0.2579 g	W _{icrisol} =44.8982 g
	Suspendidos Disueltos		795 mg/l		W _{igooch} =0.2612 g	W _{fcrisol} =44.9207 g
					%D =20%	ST =1125 mg/l
				SST =330 mg/l		

DBO₅ =373 mg/l

11 de noviembre de 2010

Parámetro	OD ₀ (mg/l)		OD ₆ (mg/l)		DBO ₅ (mg/l)	
	% dilución	Lectura (12/11/2010)	Lectura (17/11/2010)	ΔOD (mg/l)		
DBO ₅	0.5	6.4	5.9	100	110	
			5.8	120		
	1.0	6.4	4.4	200	210	
			4.2	220		
Sólidos	Totales		895 mg/l		Vol =50 ml	Vol =20 ml
	Suspendidos Totales		300 mg/l		W _{igooch} =0.2391 g	W _{icrisol} =69.4959 g
	Suspendidos Disueltos		595 mg/l		W _{fgooch} =0.2421 g	W _{fcrisol} =69.5138 g
					%D =20%	ST =895 mg/l
				SST =300 mg/l		

DBO₅ =160 mg/l



12 de noviembre de 2010

Parámetro	OD ₀ (mg/l)		OD ₆ (mg/l)		DBO ₅ (mg/l)
	% dilución	Lectura (13/11/2010)	Lectura (18/11/2010)	ΔOD (mg/l)	
DBO ₅	0.5	5.7	4.9	160	150
			5.0	140	
	1.0	6.4	3.3	310	290
			3.7	270	
Sólidos	Totales		870 mg/l		Vol =50 ml
	Suspendidos Totales		270 mg/l		W _{igooch} =0.2524 g
	Suspendidos Disueltos		600 mg/l		W _{icrisol} =53.5915 g
					W _{fgooch} =0.2551 g
				%D =20%	W _{ferisol} =53.6089 g
				SST =270 mg/l	ST =870 mg/l
					Vol =20 ml

DBO₅ =220 mg/l

Resumen de resultados:

Día	DBO ₅ (mg/l)	ST (mg/l)	SST (mg/l)	SSD (mg/l)
8/11/2010	370	760	180	580
9/11/2010	275	835	280	555
10/11/2010	373	1125	330	795
11/11/2010	160	895	300	595
12/11/2010	220	870	270	600

Concentración media DBO₅ =280-287 mg/l (por redondeo en los decimales)

Concentración máxima DBO₅ =373 mg/l

Concentración mínima DBO₅ =160 mg/l



Glosario de términos

Ácidos: Sustancia que en disolución aumenta la concentración de iones de hidrógeno y se combina con las bases para formar las sales.

Álcali: Hidróxido metálico muy soluble en el agua, que se comporta como una base fuerte.

Anemófilo: El término se aplica a cualquier dispersión de esporas realizado por el viento.

Animales homeotérmicos: Aquellos que mantienen constante su temperatura y al margen de la temperatura ambiental.

Cationes: Un catión es un ion (sea átomo o molécula) con carga eléctrica positiva, es decir, ha perdido electrones. Los cationes se describen con un estado de oxidación positivo.

Cieno: Lodo blando que forma depósito en ríos, y sobre todo en lagunas o en sitios bajos y húmedos.

D₁₀: Diámetro efectivo, o sea el diámetro que corresponde a las partículas cuyo tamaño es mayor o igual que el 10 % en peso del total de partículas de un suelo.

Detritus: Resultado de la descomposición de una masa sólida en partículas.

DICyG: División de Ingeniería Civil y Geomática.

Entomófilo: Es un conjunto de caracteres de las flores destinados a atraer a un tipo particular de polinizador o conjunto de características de las flores polinizadas preferentemente por insectos.

FLS: Siglas para abreviar los humedales de flujo libre superficial.

FS: Siglas para abreviar los humedales de flujo subsuperficial.

Hibernación: La hibernación es un estado de hipotermia regulada, durante algunos días, semanas o meses, que permite a los animales conservar su energía durante el invierno.

Ictiofauna: Se llama ictiofauna al conjunto de especies de peces que existen en una determinada región biogeográfica.

Lixiviación: Tratar una sustancia compleja, como un mineral, con un disolvente adecuado para separar sus partes solubles de las insolubles.

Macrófitas: Las macrófitas son plantas superiores, algas, musgos macroscópicos, adaptadas a la vida en el medio acuático.



Oxígeno disuelto: El oxígeno disuelto es un indicador de la contaminación del agua. Su solubilidad es función de la temperatura del agua, las sales o impurezas en el agua y la presión atmosférica. Es decir, el agua con una menor temperatura puede tener más oxígeno disuelto en ella que el agua con una mayor temperatura, asimismo una diferencia de los niveles de oxígeno varía con la profundidad del agua y dependiendo del contacto con la atmósfera. Además el oxígeno disuelto puede ser proporcionado por fenómenos de fotosíntesis.

Protoplasma: Es el lugar donde ocurre el metabolismo celular.

Protozoos: Son organismos animales microscópicos formados por una sola célula (unicelulares), heterótrofos, que viven en medios líquidos, son capaces de moverse y se reproducen por bipartición (la célula se divide en dos). Algunos de ellos pueden formar colonias.

Rotíferos: Constituyen un filo de organismos microscópicos (entre 0,1 y 0,5 mm) que habitan en aguas dulces, tierra húmeda, musgos, líquenes, hongos, e incluso agua salada.

ST: Sólidos Totales.

SSD: Sólidos Suspendidos Disueltos.

SST: Sólidos Suspendidos Totales.

T med: Temperatura media.

Tricoptera: Son un orden de insectos (con metamorfosis completa) cuyas larvas son acuáticas, y viven dentro de pequeños estuches en forma de tubo que ellas mismas fabrican a base de seda a la que adhieren granos de arena, restos vegetales.



Bibliografía

- **Benfield, L.D. and C.W. Randall;*
Biological process desing for wastewater treatment;
Pretice - Hall, Inc,
Englewood Cliffs, N.J.1980
- **C.P. Leslie Grady;*
Biological Wastewater Treatment
Second edition, revised and expanded,
Nueva York, 1999
- **Crites, R., Tchobanoglous, G.;*
Sistemas de Manejo de Aguas Residuales para Núcleos Pequeños y Descentralizados;
Tomos 1, 2 y 3. Traducido de la primera edición en inglés,
Bogotá, Colombia, 2000
- **C. Reed Sherwood, Crites Ronald W.;*
Natural Systems for Waste Management and Treatment
McGraw-Hill
U.S.A, 1995
- **Jorgensen, B. B.;*
Mineralization of organic matter in the sea bed the role of sulfate reduction;
1982
- **Lienard, A.;*
U.S. Enviromental Protection Agency;
1987
- **Marín Galvín Rafael;*
Fisicoquímica y Microbiología de los medios acuáticos: Tratamiento y control de calidad de
aguas;
Ediciones Díaz Santos,
2003
- **Mitsch, W. J. and J. G. Gosselink;*
Wetlands;
John Wiley and Sons Inc.,
Nueva York, 2000
- **Seoáenz Calvo Mariano;*
Depuración de las aguas residuales por tecnologías ecológicas y de bajo costo;
Madrid, 2005



**Seoáenz Calvo Mariano;*

Manual de tratamiento, reciclado, aprovechamiento y gestión de las aguas residuales de las industrias agroalimentarias;
Madrid, 2005

**Servicio Meteorológico Nacional*
México, 2010

**Sistema de Transporte Colectivo*
Especificación general para el tendido y compactación de rellenos
México, 2008

**U.S. EPA;*
Design Manual Constructed Wetlands for Municipal Wastewater Treatment;
Cincinnati, Ohio, 2000

**U.S. EPA;*
Subsurface Flow Constructed Wetlands for Wastewater Treatment A Technology Assessment;
Washington, DC, 1993

**www.evi.com.mx/evicom/prod_geomembrana.html*

**www.agua.org.mx*