



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**PROPUESTA DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL EN UN EDIFICIO DE
OFICINAS UBICADO AL SUR DE LA CIUDAD DE MÉXICO**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN INGENIERÍA SANITARIA

PRESENTA:

ING. LAURA DANIELA CERVANTES SANDOVAL

DIRECTOR DE TESINA: M.I. RODRIGO TAKASHI SEPÚLVEDA HIROSE

CIUDAD MÉXICO

FEBRERO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



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

Introducción	1
Objetivo	2
1. Características de las Aguas Residuales en Edificaciones	3
2. Humedales.....	4
2.1. Humedales artificiales (HHAA)	5
2.2. Clasificación de humedales artificiales.....	5
2.2.1. Humedales Artificiales de Flujo Libre (HAFL)	5
2.2.2. Humedales Artificiales de Flujo Sub-superficial (HAFSS)	6
2.2.2.1. Humedales Artificiales de Flujo Horizontal (HAFH).....	6
2.2.2.2. Humedales Artificiales de Flujo Vertical (HAFV)	7
2.3. Componentes de los humedales artificiales	8
2.3.1. Material de soporte.....	8
2.3.2. Vegetación.....	9
2.3.3. Microorganismos.....	10
3. Características de la Edificación y Ubicación del Humedal	10
4. Diseño del Humedal Artificial.....	13
4.1. Cálculo del gasto recolectado	14
4.2. Área requerida para la construcción del humedal artificial.....	15
Área para un humedal horizontal de flujo libre	15
Área para un humedal horizontal de flujo sub-superficial.....	16
Área para un humedal vertical.....	17
4.3. Sistema de tratamiento primario	19
4.4. Dimensionamiento final del humedal artificial	24
4.5. Cálculo del agua pluvial en el humedal artificial	30
4.5.1. Diseño del aliviadero	31
5. Resultados	33
5.1. Construcción del humedal artificial.....	33
5.2. Configuración del humedal de flujo vertical	36
5.3. La obstrucción y la aireación del suelo en humedal de flujo vertical	39
5.4. Mantenimiento y operación del humedal	39
5.5. Establecimiento de la vegetación	40
6. Conclusiones y Recomendaciones	42
Anexos.....	43

Agua tratada (y aprovechamiento pluvial).....	43
Lectura 1: El sistema francés para tratamiento primario y secundario de aguas residuales	47
Lectura 2: Living Machine®	50
Referencias.....	51

INTRODUCCIÓN

En la actualidad los ingenieros buscan que sus construcciones causen el menor impacto al medio ambiente, es por eso que diversas tecnologías se han desarrollado e implementado hace ya algunas décadas.

En las edificaciones se ha buscado que sus elementos sean sostenibles, ya sea en el aprovechamiento de la energía solar o el reúso del agua.

Si bien ya existen pequeñas plantas de tratamiento prefabricadas que pueden ser utilizadas por edificios, este trabajo busca otra solución a una de las mayores preocupaciones en la actualidad, el tratamiento de las aguas residuales.

Los humedales artificiales ya son usados en diversos sistemas descentralizados en todo el mundo, pero solo pocos los utilizan en las ciudades, en las siguientes páginas se hablará de la propuesta de implementar en un edificio en construcción de la Ciudad de México, un humedal artificial para el tratamiento del agua residual cuyo efluente genere agua susceptible de ser aprovechada en inodoros, urinarios y riego.

El edificio que se va a construir al sur de la ciudad busca la certificación LEED GOLD, por lo que se requiere que cada aspecto, desde el manejo de residuos hasta el uso del agua, cumpla con los requisitos de esta certificación. Es por eso que un humedal artificial puede ayudar con el tema del agua residual, un humedal artificial no solo será un tratamiento, también será poco contaminante e impactante para el medio ambiente, y le dará al edificio un atractivo estético que lo hará único en la zona en la que será construido.

Con este trabajo esperamos que otros estudiantes y constructoras se interesen en implementar humedales artificiales en diferentes proyectos que se realicen en la Ciudad de México, como en resaltar la importancia de que edificios de tal magnitud ya sean sostenibles y cuenten con sistemas descentralizados para el tratamiento del agua residual que generen y poder darle un reúso a este recurso que es tan importante.

En el primer capítulo se habla sobre las características que tiene el agua residual de origen doméstico y las concentraciones en las que pueden estar presente los contaminantes. Estas características son muy parecidas al que tendrá el agua residual que se recolectará del edificio, ya que la edificación contará solo con lavamanos, excusados, urinarios y regaderas.

En el segundo capítulo se menciona qué es un humedal natural y qué es un humedal artificial, los diferentes tipos de humedales artificiales que existen (humedal de flujo horizontal superficial, humedal de flujo horizontal subsuperficial y humedal de flujo vertical) y los componentes principales que los conforman.

En el tercer capítulo se encuentran las características de la edificación donde será construido el humedal, cantidad de inodoros, urinarios, lavamanos y regaderas que este

tiene, así como el área que se dispone para la construcción del sistema de tratamiento de agua residual.

El capítulo 4 contiene el diseño del humedal artificial, las áreas preliminares que determinaron que el humedal de flujo vertical era el más adecuado para la edificación y las dimensiones finales que aseguren la remoción de DBO necesaria para cumplir con la NOM-003-SEMARNAT-1997. También se encuentra en este capítulo el diseño del tratamiento primario y el diseño de un aliviadero para prevenir lavado de biomasa e inundaciones en época de lluvia.

En el último capítulo se habla sobre los pasos que deben llevarse a cabo para la construcción adecuada del humedal, el mantenimiento y la operación que este debe tener para trabajar adecuadamente, el problema de obstrucción que presentan los humedales de flujo vertical, como debe de establecerse la vegetación en el humedal y las características de los estratos y las tuberías que el sistema de tratamiento del edificio tendrá.

OBJETIVO

Diseñar la ingeniería básica de un humedal artificial para un edificio de oficinas en construcción y cuyo efluente cumpla con la normatividad nacional correspondiente, considerando criterios de sostenibilidad, reúso y aprovechamiento del agua tratada, y evaluar la conveniencia de este tipo de sistemas de tratamiento.

1. CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES EN EDIFICACIONES

El agua residual municipal fresca y aerobia tiene olor a queroseno y color gris. El agua residual con más tiempo de haber sido generada es séptica y pestífera; su olor característico es a ácido sulfhídrico, similar al de los huevos podridos. El agua residual séptica es de color negro (César y Vázquez, 2003).

La temperatura del agua residual es mayor que la del agua potable, varía entre 10 y 20 °C; esto se debe a que se añade calor al agua en los sistemas de plomería de las edificaciones (César y Vázquez, 2003).

Las aguas residuales contienen características físicas, químicas y biológicas. En la tabla 1.1 se muestran los principales contaminantes del agua residual que se deben de tomar en cuenta a la hora de proporcionar un tratamiento.

Tabla 1.1, Contaminantes principales en el agua residual

Contaminantes	Importancia Ambiental
Sólidos Suspendidos	Causa depósitos de lodos y, cuando el agua no es tratada y es descargada en sistemas acuáticos provoca condiciones anaerobias.
Compuestos Orgánicos Biodegradables	Compuesto principalmente por proteínas, carbohidratos y grasas, se miden comúnmente en término de DBO (Demanda Bioquímica de Oxígeno) o DQO (Demanda Química de Oxígeno). Causan degradación biológica, que incrementa la demanda de oxígeno en los cuerpos receptores y ocasiona condiciones sépticas.
Patógenos	Causan enfermedades transmisibles.
Nutrientes	El nitrógeno, fosforo y el carbono son nutrientes esenciales para el crecimiento de la vegetación. Si el agua residual contiene grandes cantidades de estos nutrientes y se descarga a cuerpos de agua puede provocarse una eutrofización acelerada.
Metales Pesados	Son tóxicos, pueden interferir con el tratamiento y reúso del efluente.
Sólidos Inorgánicos Disueltos	Los constituyen generalmente el calcio, sodio y sulfato, si no se remueven en el tratamiento el agua tal vez no pueda ser reusada.

Elaborado con datos de: Metcalf y Eddy, César y Vázquez

En un análisis típico del agua residual municipal, se pueden encontrar los contaminantes en concentraciones fuertes, medias y débiles como se muestra en la tabla 1.2.

Tabla 1.2, Concentración de contaminantes

Constituyente	Concentración, mg/l*		
	Fuerte	Media	Débil
Sólidos totales	1200	720	350
Disueltos totales	850	500	250
Fijos	525	300	145
Volátiles	325	200	105
Suspendidos totales	350	220	100
Fijos	75	55	20
Volátiles	275	165	80
Sólidos sedimentables ml/l	20	10	5
Demanda bioquímica de oxígeno, DBO ₅₋₂₀	400	220	110
Carbono orgánico total (COT)	290	160	80
Demanda química de oxígeno (DQO)	1000	500	250
Nitrógeno total	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniacal	50	25	12
Fósforo total	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
Cloruros	100	50	30
Alcalinidad (como CaCO ₃)	200	100	50
Grasas	150	100	50

*Al menos que se especifique otra

Fuente: Metcalf y Eddy

2. HUMEDALES

Los humedales son tierras inundadas donde el agua es el principal factor que controla el ambiente; su vegetación y fauna reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas que le permiten ser un potencial auto depurador (Llagas y Guadalupe, 2006).

La Ley de Aguas Nacionales (2016) define humedales como las zonas de transición entre los sistemas acuáticos y terrestres que constituyen áreas de inundación temporal o permanente, sujetas o no a la influencia de mareas, como pantanos, ciénagas y marismas, cuyos límites los constituyen el tipo de vegetación hidrófila de presencia permanente o estacional; las áreas en donde el suelo es predominantemente hídrico; y las áreas lacustres o de suelos permanentemente húmedos por la descarga natural de acuíferos.

Las profundidades típicas del agua en estas extensiones de tierras son menores a 0.60 m donde crecen plantas emergentes como juncos, totora, lenteja de agua que contribuye a la reducción de contaminantes a través de procesos aerobios de degradación (Llagas y Guadalupe, 2006).

2.1. Humedales artificiales (HHAA)

La primera investigación sobre la posibilidad de tratar aguas residuales en humedales artificiales fue realizada por el Dr. Seidel en 1952 en el Instituto Max Planck de Plön, Alemania. En la década del '90 hubo un mayor aumento del número de HHAA debido a la ampliación de tratamiento de diferentes tipos de aguas residuales (domésticas, industriales y aguas pluviales) (Hoffmann, Platzer, Winker, y von Muech, 2011).

Un humedal artificial es un sistema de tratamiento de aguas residuales (grises o negras) poco profundo, construido por el hombre. Los humedales artificiales están constituidos por un material de soporte (grava, arena, etc.), plantas y microorganismos (bacterias y hongos) separados del entorno circundante mediante una membrana impermeable; estos elementos interactúan entre sí para remover los contaminantes de un agua residual mejorando su calidad. Esto se logra mediante procesos, físicos, químicos y biológicos (Guido, 2006).

2.2. Clasificación de humedales artificiales

Los humedales artificiales se clasifican por el tipo de flujo que existe en el sistema. A continuación, se muestra una clasificación típica.

2.2.1. Humedales Artificiales de Flujo Libre (HAFL)

Son aquellos humedales donde el agua está expuesta a la atmósfera, en la naturaleza estos suelen ser los fangales, zonas pantanosas y las praderas inundadas. En este tipo de humedales, el agua siempre se mantiene por arriba del material de soporte con una profundidad relativamente baja (0.1 a 0.6 m). Estos sistemas pueden tener plantas que flotan libremente y plantas con sus raíces extendidas desde la entrada hasta la salida de la descarga, o plantas con poca o ninguna raíz.

La lenta velocidad y el flujo laminar que se produce en el sistema proporciona una remoción efectiva de los sólidos suspendidos totales (STT).

En términos de paisaje, este sistema es bastante recomendable por su capacidad de albergar distintas especies de peces, anfibios, aves, entre otros.

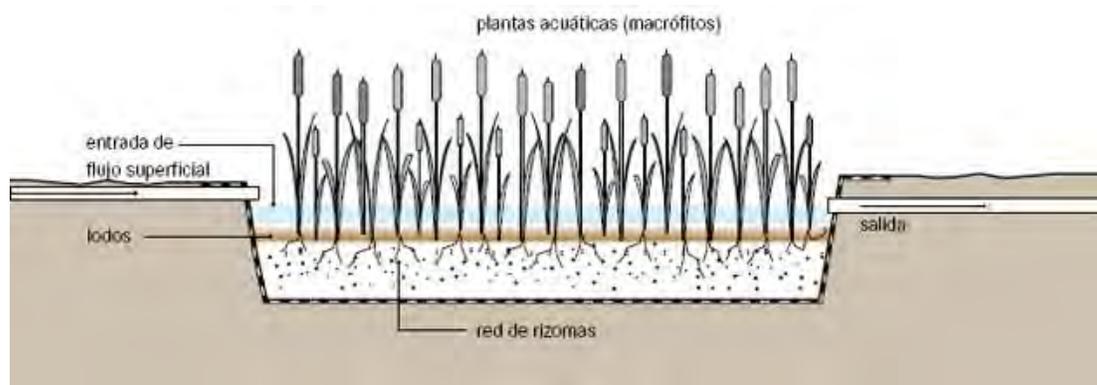


Ilustración 2.1, Humedal artificial de flujo libre
Fuente: Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento

2.2.2. Humedales Artificiales de Flujo Sub-superficial (HAFSS)

El diseño de estos sistemas, por lo general, consiste en una cama de material de soporte y vegetación cuyas raíces crecerán en dicho material. La grava y arena son comúnmente utilizados para el lecho de soporte, sin embargo, otros materiales locales también son buenos para este propósito o incluso el mismo suelo de la zona donde se instale el humedal, todo depende de las características del mismo. En este tipo de humedales artificiales el agua permanece a pocos centímetros por debajo del material de soporte (2 a 5 cm).

El agua ingresa en forma permanente. Entra por la parte superior de un extremo y sale por un tubo de drenaje en la parte opuesta inferior. El agua residual se trata a medida que fluye lateralmente a través de un medio poroso (flujo pistón). La profundidad del lecho varía entre 0,45 m a 1 m y tiene una pendiente de entre 0,5 % a 1 %. El agua residual no ingresa directamente al medio granular principal (cuerpo), sino que existe una zona de amortiguación generalmente formada por grava de mayor tamaño

Las principales ventajas de mantener un nivel sub-superficial del agua son la prevención de mosquitos y olores y la eliminación del riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada.

2.2.2.1. Humedales Artificiales de Flujo Horizontal (HAFH)

Este sistema es una variante del sistema de humedal artificial de flujo sub-superficial. El agua fluye de un lado al otro del filtro de manera horizontal varios centímetros debajo de la superficie (De León, 2011). Al fluir horizontalmente las aguas residuales por el canal, el material filtra partículas y microorganismos, y degrada el material orgánico.

El nivel de agua en un HAFH se mantiene entre 5 y 15 cm, el flujo del agua se logra mediante la pendiente que se le da al sistema de tal manera que la gravedad es la fuerza que permite

que el agua fluya a través de todo. El lecho debe ser ancho y poco profundo para que el flujo de agua sea maximizado. Se debe usar una ancha zona de entrada para distribuir uniformemente el flujo. La transferencia de oxígeno es menor en este tipo de sistemas ya que no existe una succión considerable al momento que el agua se desplaza como sucede en los sistemas de flujo vertical.

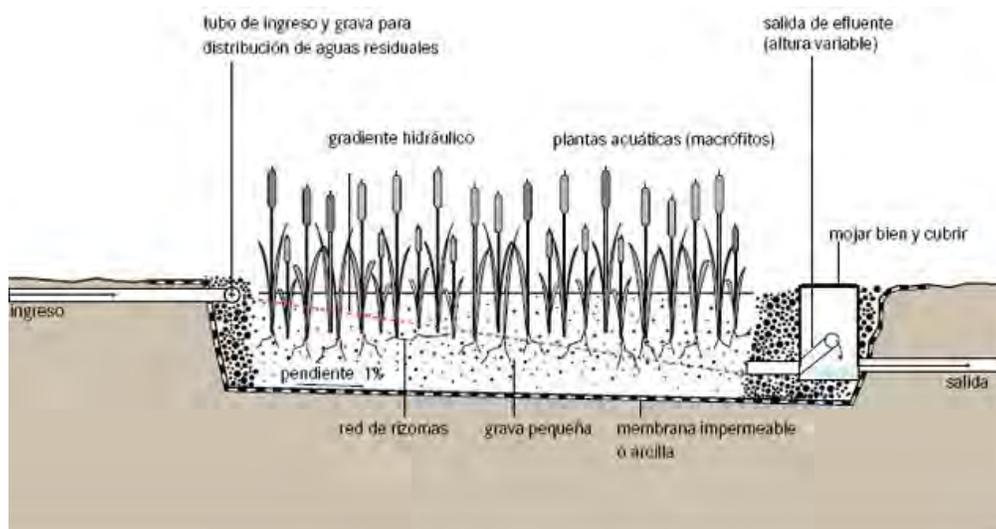


Ilustración 2.2, Humedal artificial de flujo horizontal
Fuente: Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento

2.2.2.2. Humedales Artificiales de Flujo Vertical (HAFV)

En este tipo de sistemas el agua es alimentada de manera uniforme y distribuida a lo largo y ancho de la superficie del humedal. Esto se logra mediante el empleo de una red de tuberías perforadas (generalmente de PVC). Se colocan redes de tuberías unos cuantos centímetros por encima de la superficie del humedal de tal manera que el agua que cae por ella se distribuya uniformemente a través de todo el humedal, evitando los flujos preferenciales y zonas muertas dentro del sistema. La transferencia de oxígeno en estos sistemas es mucho mejor que en los sistemas de flujo horizontal ya que cuando el sistema es operado intermitentemente, permite que el flujo de agua succione un volumen equivalente de aire que posteriormente se disuelve en el agua dentro del humedal y es utilizada por los microorganismos aerobios para su respiración mejorando considerablemente la degradación de la materia orgánica y previniendo las condiciones sépticas del sistema

Estos sistemas pueden funcionar de manera intermitente con periodos de 1-2 días de alimentación y de 4-8 días sin alimentar, se ha demostrado que algunos sistemas operando de esta manera han dado excelentes resultados en la remoción de materia orgánica (Moshiri, 1993). La principal ventaja radica en que durante el periodo donde el sistema permanece sin alimentar, el oxígeno se difunde hacia las raíces de las plantas y éste es

aprovechado por los microorganismos para la oxidación de la materia orgánica y del nitrógeno amoniacal.

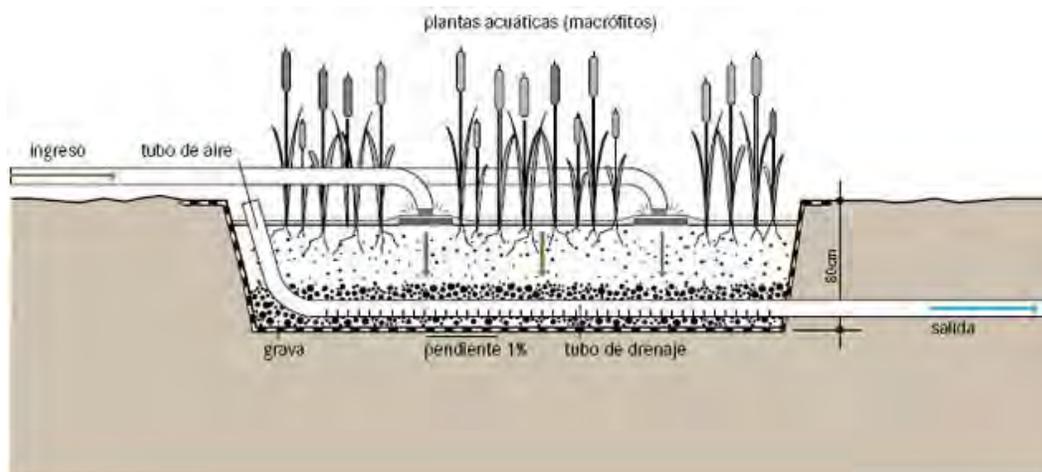


Ilustración 2.3, Humedal artificial de flujo vertical
Fuente: Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento

2.3. Componentes de los humedales artificiales

En general los elementos principales de un humedal artificial son, por su función depuradora el material de soporte, las plantas y los microorganismos. Otros componentes de los humedales son el drenaje de entrada, el sedimentador primario, la capa impermeable, el geotextil y el drenaje de salida.

2.3.1. Material de soporte

El material de empaque en un humedal artificial puede ser arena, grava, roca, escoria volcánica, entre otros, dependiendo de la disponibilidad del material y del tipo de sistema a instalar. Este material es importante porque:

- Sirve como soporte, tanto para los microorganismos como para las plantas.
- Muchas de las transformaciones bioquímicas ocurren dentro de los poros del material de soporte.
- Además de ser un material de soporte, sirve como filtro para muchos de los sólidos suspendidos en el agua residual.
- Dependiendo del tipo de material que se utilice puede modificar el movimiento del agua (hidráulica del sistema) y, consecuentemente, el tiempo de residencia hidráulica.

2.3.2. Vegetación

Las funciones más importantes de la vegetación para el tratamiento de aguas residuales en un humedal artificial son los efectos físicos, químicos y biológicos que originan (Brix, 1994). La vegetación estabiliza el material de soporte, proporciona un excelente medio para la filtración, impide que el material de soporte se azolve y provee de una gran área superficial para la adhesión de los microorganismos.

La vegetación también aporta oxígeno generado por el proceso de la fotosíntesis a la zona radicular. Los tallos, las hojas y, principalmente, las raíces de las plantas aportan oxígeno al humedal.

Otro beneficio es que cuando mueren, sirven como fuente de nutrientes para los microorganismos saprofitos y forman una biopelícula fija que contribuye también a la degradación de los contaminantes del agua residual, además de que crean canales y estabilizan la conductividad hidráulica del material de soporte

Para un humedal son adecuadas la vegetación de pantano, que se encuentra normalmente en zonas de tierra que se inundan periódicamente. Este tipo de vegetación crece bajo el agua y emerge en las riveras de lagos y pantanos (hidrófitas emergentes o halófitas), son por naturaleza resistentes a las aguas con alto contenido de materia orgánica y en condiciones controladas crecen sin ningún problema (De León, 2011).

Hay mucha vegetación de pantano que se puede usar para plantar un humedal construido, pero solo pocas han tenido un proceso exhaustivo de pruebas por lo que se recomienda usar las siguientes especies vegetales: Carrizo (*Phragmites australis*), caña de castilla (*Arundo donax*), junco (*Juncus effusus*), tule y/o tulinillo (*Typha angustifolia*, *T. latifolia* u.a. Arten) e iris amarillo (*Iris pseudacorus*) (De León, 2011).

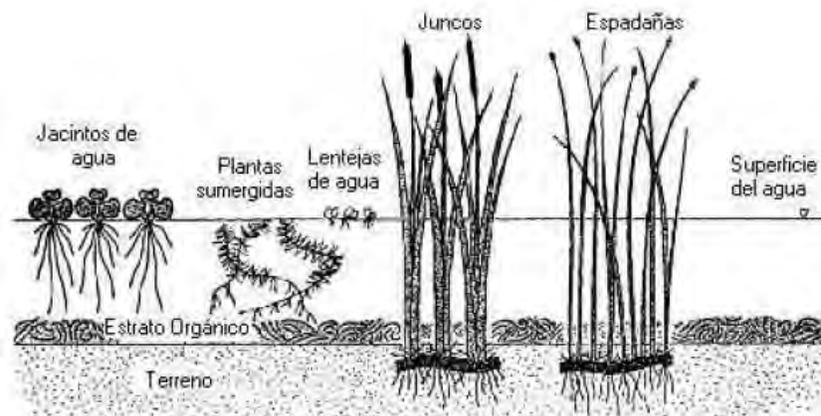


Ilustración 2.4, Vegetación común en humedales artificiales
Fuente: (Montiel, 2014)

2.3.3. Microorganismos

Los microorganismos presentes en el material de soporte son los responsables de llevar a cabo la degradación biológica de la materia orgánica. Estos consumen el C, N y P disueltos en el agua y parte de estos nutrientes se integran al tejido celular produciendo nuevos organismos y la otra parte se “mineraliza” o transforma (se transforma en CO₂, nitritos, nitratos e incluso nitrógeno molecular). Los microorganismos presentes en un humedal artificial incluyen a bacterias, hongos, protozoos, etc.

Los microorganismos en los humedales artificiales:

- Degradan la materia orgánica contaminante incorporando ciertos nutrientes a sus tejidos.
- Alteran las condiciones del potencial de óxido-reducción al ser los responsables de llevar a cabo las reacciones de óxido-reducción (Borrero, 1999).
- Transforman los contaminantes (compuestos de nitrógeno a través de la nitrificación) y los hacen asimilables para las plantas.

Dentro de un humedal artificial existen zonas micro aerobias donde se lleva a cabo la oxidación de la materia orgánica (en las zonas radicales y aquéllas cercanas a la superficie en contacto con el aire atmosférico). A medida que la profundidad aumenta, la disponibilidad de oxígeno disminuye hasta llegar a condiciones totalmente anaerobias o anóxicas, donde solamente comunidades microbianas anaerobias o facultativas llevan a cabo las reacciones de descomposición.

3. CARACTERÍSTICAS DE LA EDIFICACIÓN Y UBICACIÓN DEL HUMEDAL

El edificio que será construido en Insurgentes Sur tendrá las siguientes características:

Consta de once sótanos y medio, planta baja y veinticuatro niveles, como se muestra en la ilustración 3.3.

Se espera que el número de empleados que trabajaran en la zona de oficinas sea de 2156 personas. Y el número de trabajadores que incluyen el personal de limpieza, mantenimiento, etc. sea 50 personas.

El agua residual que se tratará del edificio en el humedal artificial será exclusivamente el agua de los inodoros, urinarios, lavamanos, regaderas y tarjas de servicio que se encuentran en los 24 niveles de oficinas, planta baja y sótano -1. El agua de lluvia recolectada pasara directamente a la cisterna de agua tratada que se utiliza para el funcionamiento de inodoros y urinarios.

El sótano -1 cuenta con catorce regaderas, seis inodoros, ocho lavamanos, cuatro urinarios y una tarja de servicio como se muestra en la ilustración 3.1.

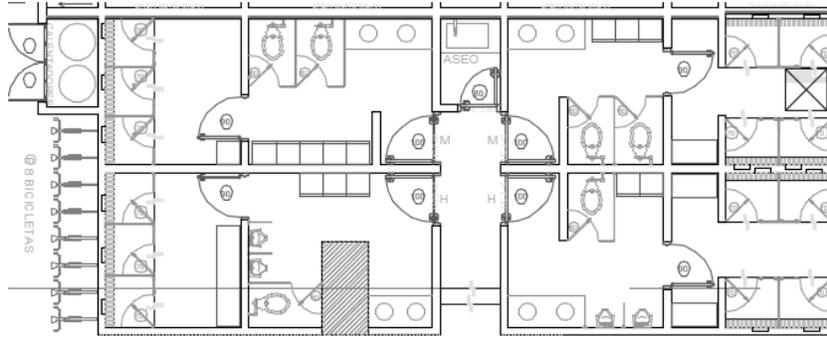


Ilustración 3.1, Planta sótano -1

La planta baja contiene un inodoro y un lavamanos. El nivel 1 tiene cuatro inodoros, cinco lavamanos, dos urinarios y una tarja de servicio. Los niveles del 2 al 24 tienen la misma cantidad y configuración de muebles sanitarios, cuatro inodoros, cinco lavamanos, dos urinarios y una tarja de servicio. En la ilustración 3.2 se muestra los muebles sanitarios del nivel 2 al 24.

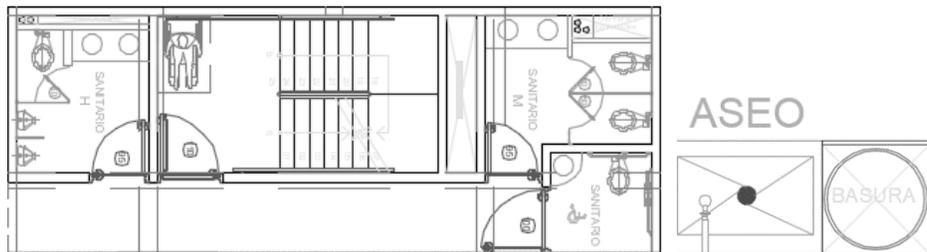


Ilustración 3.2, Planta tipo (nivel 2 al 24)

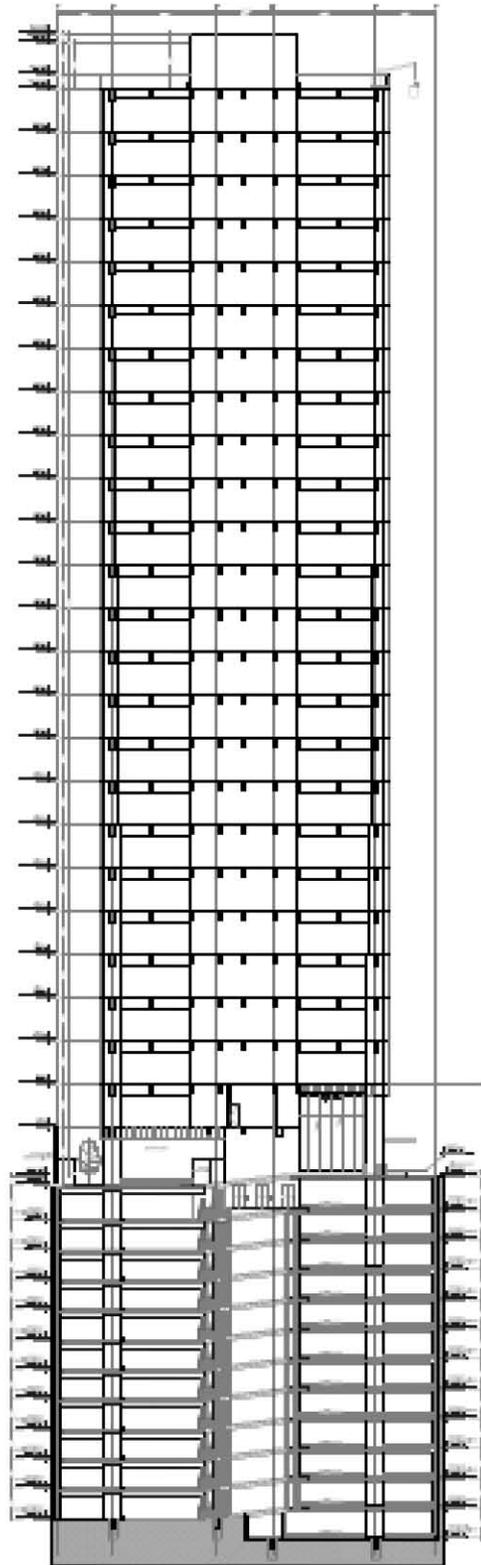


Ilustración 3.3, Edificio en Insurgentes Sur

La ubicación ideal para un humedal artificial es la que tiene una pendiente muy suave, sombra parcial y está cerca de la fuente de aguas negras (US EPA1999). Para la uniformidad del flujo, un cimiento firme es necesario. Los humedales construidos para tratar aguas negras no deben ser construidos en áreas donde haya suelos inundados. Como es una edificación en construcción, esta puede ser construida o modificada para que el humedal tenga una ubicación con las características que se necesitan.

El humedal artificial se piensa construir en la planta baja, en el área trasera del edificio. La sección se muestra en la ilustración 3.4 y del lado derecho de la esta se encuentra la salida al alcantarillado municipal y la cisterna de agua tratada. La sección consta de 401 m².

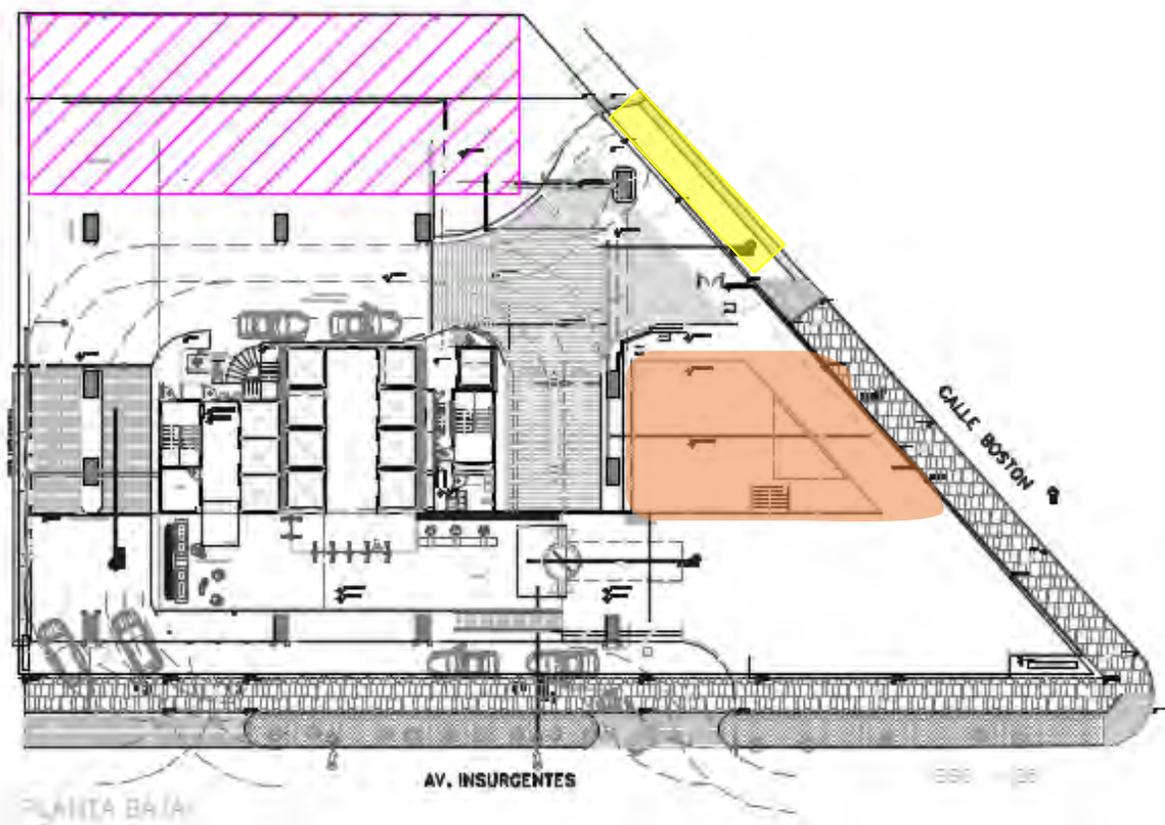


Ilustración 3.4, Ubicación del humedal artificial

4. DISEÑO DEL HUMEDAL ARTIFICIAL

Para el diseño de un humedal artificial hay dos parámetros importantes que nos indican el área necesaria para su construcción y el tipo de humedal que se implementara. Estos parámetros son el gasto que se recolecta en los muebles sanitarios y la DBO que el agua residual contiene.

En la tabla 4.1 se muestran las características de diseño y rendimiento esperado para cuatro tipos de humedales (Crites, Middlebrooks, Bastian, y Reed, 2014).

Tabla 4.1, Características de diseño y rendimiento de humedales artificiales

Concepto	Objetivo del Tratamiento	Necesidades Climatológicas	Tiempo de Retención (d)	Profundidad (m)	Carga Orgánica (kg/ha-d)	Características del Efluente (mg/L)
Humedal Natural	Clarificar, tratamiento avanzado del agua con entrada secundaria	Cálido	10	0.2-1	100	DBO, 5-10
						SST, 5-15
						NT, 5-15
Humedal Artificial						
De Flujo Libre	Secundario con tratamiento avanzado del agua		7-15	0.1-0.6	100	DBO, 5-10
						SST, 5-15
						NT, 5-20
De Flujo Sub-superficial	Secundario con tratamiento avanzado del agua		3-14	0.3-0.6	90	DBO, 5-40
						SST, 5-20
						NT, 5-20
Flujo Vertical	Primario con tratamiento avanzado del agua		1-2	0.6-0.9	200	DBO, 5-10
						SST, 5-10
						NT, 10-20

Fuente: Crites, Middlebrooks, Bastian, y Reed (2014)

4.1. Cálculo del gasto recolectado

Para el edificio de Insurgentes Sur lo primero que se hará es calcular el gasto que se recolectará de los muebles sanitarios.

La Dotación, de acuerdo con las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Ejecución de Obras e Instalaciones Hidráulicas es:

- Empleados oficinas: 50.00 L/día/persona
- Trabajadores: 100.00 L/día/persona

Población

- Número de ocupantes total de oficinas: 2,156 personas

➤ Trabajadores: 50 personas

Consumo estimado diario del conjunto:

*Dotación * Num. de empleados de oficina* 107,800 lts/día

*Dotación * Num. de trabajadores* 5000 lts/día

Consumo diario Total 112,800 l/día

Del gasto que se va a suministrar a los muebles sanitarios, el sistema de drenaje recolecta aproximadamente del 85 al 90%. En este caso tomaremos como un 90% de aportación para tener una mayor precisión en el diseño.

La aportación será:

$$Aportación = Consumo Diario * 0.9 = 112,800 \frac{l}{día} * 0.9$$

$$Aportación = 101,520 \frac{l}{día}$$

4.2. Área requerida para la construcción del humedal artificial

Los cálculos que se mostraran a continuación nos dan una idea general del espacio que necesitara el humedal para el edificio ubicado en Insurgentes Sur. Los cálculos se realizan para un humedal de flujo libre, un humedal de flujo sub-superficial y un humedal vertical, este dato no es el final y no incluye el tratamiento primario, solo nos da una aproximación del área que debemos de disponer para este tratamiento (Crites, Middlebrooks, Bastian, y Reed, 2014).

Área para un humedal horizontal de flujo libre

Para el cálculo del área de un humedal de flujo libre, se considerará un tiempo de retención de 7 días, una profundidad de 0.3 m y una carga orgánica de <100 kg/ha·d. Se espera un efluente de DBO = 10 mg/L, SST = 10 mg/L, Nitrógeno total < 10 mg/L (durante clima cálido), y P > 5 mg/L.

$$A_{HFL} = (k)(Q)$$

Donde:

A_{HFL} = El área para construir el humedal de flujo libre, en ha.

k = Factor de 4.31×10^{-3} , en m

Q = Al gasto de diseño, en m^3/d

Con nuestro dato de $101.52 m^3/d$ obtenemos un área de:

$$A_{HFL} = (4.31 \times 10^{-3} m)(101.52 \frac{m^3}{d})$$

$$A_{HFL} = 0.438 ha$$

Área para un humedal horizontal de flujo sub-superficial

Para el cálculo del área de un humedal de flujo sub-superficial, se considerará un tiempo de retención de 3 días, una profundidad de 0.3 m, una profundidad media de 0.45 m y una carga orgánica de $<80 kg/ha \cdot d$. Se espera un efluente de $DBO = 10 mg/L$, $SST = 10 mg/L$, Nitrógeno total $< 10 mg/L$ (durante clima cálido), y $P > 5 mg/L$.

$$A_{HFSS} = (k)(Q)$$

Donde:

A_{HFSS} = El área para construir el humedal de flujo sub-superficial, en ha.

k = Factor de 1.85×10^{-3} , en m

Q = Al gasto de diseño, en m^3/d

Con nuestro dato de $101.52 m^3/d$ obtenemos un área de:

$$A_{HFSS} = (1.85 \times 10^{-3} m)(101.52 \frac{m^3}{d})$$

$$A_{HFSS} = 0.188 ha$$

Área para un humedal vertical

El área de un humedal vertical depende de la carga hidráulica y del gasto de diseño. Una carga hidráulica común es de $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ (Crites, Middlebrooks, Bastian, y Reed, 2014).

$$A_{HV} = (k)(Q)$$

Donde:

A_{HV} = El área para construir el humedal vertical, en m^2 .

k = Factor de 3.272, en m

Q = Al gasto de diseño, en m^3/d

Con nuestro dato de $101.52 \text{ m}^3/\text{d}$ obtenemos un área de:

$$A_{HV} = (3.272 \text{ m})(101.52 \frac{\text{m}^3}{\text{d}})$$

$$A_{HV} = 332.21 \text{ m}^2$$

Con las áreas obtenidas en estos cálculos, se puede apreciar que el sistema de humedal artificial que más conviene a la obra, por el área disponible y las condiciones de la edificación, es el humedal artificial vertical.

Como se mencionó en el capítulo 2, un humedal artificial de flujo vertical consiste en que el agua fluya desde la parte superior del humedal por tuberías perforadas a través de todo su eje.

Comúnmente las celdas se dosifican por dos días y se dejan de dosificar por 4 a 8 días. 2 días húmedos y 4 días en seco (2/4) o 2 días húmedos y 8 secos (2/8) (Crites, Middlebrooks, Bastian, y Reed, 2014).

La principal ventaja de este concepto es la restauración de las condiciones aeróbicas durante el período de descanso y secado periódico. Esto permite la eliminación de la DBO y el nitrógeno amoniacal a tasas más altas que las que se pueden lograr en el lecho del humedal de flujo horizontal continuamente saturado y generalmente anaeróbico. Es por eso por lo que los lechos de flujo vertical pueden tener un área más pequeña que un humedal de flujo horizontal diseñado para el mismo nivel de rendimiento (Crites, Middlebrooks, Bastian, y Reed, 2014).

Durante el periodo de dosificación, la carga hidráulica típica en la etapa I es de 0.3 m/d por el efluente primario, y el doble para las celdas de la etapa II. Así las dos etapas pueden eliminar hasta el 90 % de DBO y de SST (Crites, Middlebrooks, Bastian, y Reed, 2014).

Un lecho contiene varias capas de material granular. Es común que estas capas sean conformadas por:

- 25 cm de bordo libre
- 8 cm de arena gruesa, plantada con carrizos
- 15 cm de gravilla (6 mm)
- 10 cm de grava mediana lavada (12 mm)
- 15 cm de grava gruesa lavada (40 mm)

Las tuberías de drenaje son colocadas en la parte inferior de las celdas, aproximadamente a cada metro. El inicio de estas tuberías se encuentra en la parte superior del humedal para fomentar el flujo a gravedad a través de todo el humedal. Esta tubería debe estar perforada solo donde tiene contacto con la parte inferior del humedal, ya que si se perfora antes el agua no hará todo el recorrido vertical hasta la salida. Adicionalmente se colocan tuberías en forma vertical para la transferencia del oxígeno en centros de 2 m, están perforadas en la capa inferior de grava hasta la superficie (Crites, Middlebrooks, Bastian, y Reed, 2014).

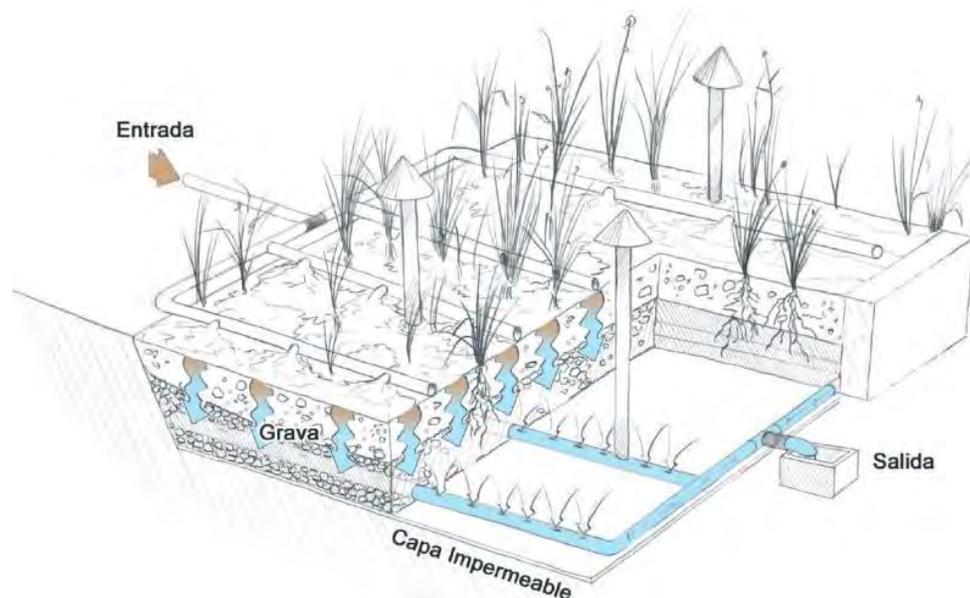


Ilustración 4.1 Esquema del funcionamiento de un humedal de flujo vertical
Fuente: Sistema de depuración natural

4.3. Sistema de tratamiento primario

Un sistema de tratamiento primario debe estar previo al humedal construido. Se puede utilizar un tanque séptico como tratamiento primario para tener la ventaja de mantener mucho del desecho fuera de vista, conteniendo los olores, y previniendo las condiciones insalubres (Hammer, 1989).

Los principios que han de orientar el diseño de un tanque séptico son los siguientes:

- Prever un tiempo de retención de las aguas servidas, en el tanque séptico, suficiente para la separación de los sólidos y la estabilización de los líquidos.
- Prever condiciones de estabilidad hidráulica para una eficiente sedimentación y flotación de sólidos.
- Asegurar que el tanque sea lo bastante grande para la acumulación de los lodos y espuma.
- Prevenir las obstrucciones y asegurar la adecuada ventilación de los gases.

El diseño del tanque séptico se realizará según la metodología del “Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento” de CONAGUA, en su apartado de “Saneamiento Rural”.

Un tanque séptico debe tener la capacidad para remover casi todos los sólidos sedimentables en un tiempo de retención de 24 a 72 h.

Normalmente tres cuartas partes del tanque se usan para almacenar los sólidos y la nata cloacal; por lo tanto, el tamaño del tanque séptico debe basarse en una retención inicial de tres días. Se sugiere la forma rectangular con una longitud igual al doble o triple del ancho (CONAGUA, 2007).

En el periodo de retención los sólidos ligeros y las grasas forman una costra o nata gruesa, la cual puede fluir a través de una salida localizada inmediatamente debajo de la capa de grasas, o podrían ser interceptadas mediante una trampa para grasas que se construye antes del tanque séptico (CONAGUA, 2007).

El primer dato importante es la aportación de agua residual que se genera, como ya lo obtuvimos anteriormente, sabemos que este es de:

$$Aportación = 101,520 \frac{l}{dia}$$

Aportación de solidos

En “Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento” de CONAGUA, en su apartado de “Saneamiento Rural” recomienda utilizar 70 g/día*hab como la aportación de solidos

por habitante, y una densidad de los sólidos de 1200 kg/m³, con estos datos podemos obtener la cantidad de lodos producidos al día, como se muestra a continuación:

$$Vd = 10^{-3} \times \text{Lodos producidos} \times P$$

Donde:

Vd = Volumen de lodos, en m³

Lodos producidos= Es la aportación de sólidos por habitante al día por su densidad, en m³/día*hab

P= Población, en habitantes

$$Vd = \frac{70 \text{ g} \times 10^{-3} \times 2,206 \text{ hab}}{\text{hab} \times \text{año}} / 1200 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Vd = 0.129 \text{ m}^3$$

Al año tenemos un volumen de lodos:

$$Vd = 46.97 \frac{\text{m}^3}{\text{año}}$$

El volumen de natas se considera como mínimo 0.7 m³ (OPS/OMS, 2005)

Tiempo de limpieza de sólidos

El tanque séptico debe limpiarse antes de que la acumulación de lodos llegue al tubo de salida. Si estos alcanzan la salida el tiempo de retención disminuye y el agua residual arrastrará los lodos al campo de absorción, atascando el sistema. Se recomienda que en el diseño de un tanque séptico se consideren tiempos de limpieza, TL, de 2 a 5 años. (CONAGUA, 2007).

Consideraremos un TI de 2 años para el tanque de esta edificación.

El volumen de lodos anuales (Vla) se calculará como se muestra a continuación.

$$Vla = Vd * TL$$

Donde:

Vla = Volumen de lodos anuales, en m^3

Vd = Volumen de lodos en un año, en $m^3/año$

TL = Tiempo de limpieza del tanque, en años

$$Vla = 47.67 \frac{m^3}{año} * 2 \text{ años}$$

$$Vla = 95.34 m^3$$

Dimensiones de las cámaras

Se recomienda que la profundidad efectiva, H , que, es la distancia del tubo de salida al fondo del tanque más el espacio requerido para las natas, sea de 1 a 1.5 m para facilitar su mantenimiento, mientras que la longitud, l , debe ser igual al doble o triple del ancho, b (CONAGUA, 2007).

La primera cámara se diseña para retener el 75% de los lodos (CONAGUA, 2007), por lo que el volumen de la cámara ($Vc1$), es igual al 75% del $Vla3$ (volumen de lodos en tres años).

$$Vc1 = Vla * 0.75$$

$$Vc1 = 95.34 m^3 * 0.75$$

$$Vc1 = 71.51 m^3$$

El diseño de la segunda cámara se calcula para retener el 25% de los lodos por lo tanto el volumen de la cámara, $Vc2$, será igual al 25% del $Vsa3$:

$$Vc2 = Vla * 0.25$$

$$Vc2 = 95.34 m^3 * 0.25$$

$$Vc2 = 23.84 m^3$$

Medidas de las cámaras

La geometría de las cámaras se calcula considerando que el largo l , es igual al doble del ancho b :

$$l = 2b$$

Y consideraremos la profundidad, $H = 1.5$ m.

Para la cámara 1:

$$Vc1 = A1 * H \rightarrow A1 = \frac{Vc1}{H}$$

$$A1 = \frac{71.51 \text{ m}^3}{1.5 \text{ m}}$$

$$A1 = 47.67 \text{ m}^2$$

$$A1 = l1 * b1 \rightarrow A1 = 2b1^2$$

$$b1 = \sqrt{\frac{A1}{2}}$$

$$b1 = \sqrt{\frac{47.67 \text{ m}^2}{2}}$$

$$\mathbf{b1 = 4.88 \text{ m}}$$

$$l1 = 2b1$$

$$l1 = 2 * 4.88$$

$$\mathbf{l1 = 9.76 \text{ m}}$$

Para la cámara 2:

$$Vc2 = A2 * H \rightarrow A2 = \frac{Vc2}{H}$$

$$A2 = \frac{23.84 \text{ m}^3}{1.5 \text{ m}}$$

$$A2 = 15.89 \text{ m}^2$$

$$A2 = l2 * b2 \rightarrow A2 = 2b2^2$$

$$b2 = \sqrt{\frac{A2}{2}}$$

$$b2 = \sqrt{\frac{15.89 \text{ m}^2}{2}}$$

$$b2 = 2.82 \text{ m}$$

$$l2 = 2b2$$

$$l2 = 2 * 2.82$$

$$l2 = 5.64 \text{ m}$$

Volumen del líquido

Con un tiempo de retención de 24 horas

La cámara 1 tendrá un tiempo de retención de 18 horas

La cámara 2 tendrá un tiempo de retención de 6 horas

Volumen de líquido en la cámara 1:

$$Vl1 = 0.75 * \text{Aportación}$$

$$Vl1 = 0.75 * 101,520 \frac{l}{\text{dia}}$$

$$Vl1 = 76.14 \text{ m}^3$$

Con el ancho y el largo revisaremos H.

$$b1 = 4.88 \text{ m}$$

$$l1 = 9.76 \text{ m}$$

$$H1 = \frac{Vl1}{b1 * l1}$$

$$H1 = \frac{76.14 \text{ m}^3}{4.88 \text{ m} * 9.76 \text{ m}}$$

$$H1 = 1.60 \text{ m}$$

Volumen de líquido en la cámara 2:

$$Vl2 = 0.25 * \text{Aportación}$$

$$Vl2 = 0.25 * 101,520 \frac{l}{\text{dia}}$$

$$Vl2 = 25.38 \text{ m}^3$$

Con el ancho y el largo revisaremos H.

$$b2 = 2.82 \text{ m}$$

$$l2 = 5.64 \text{ m}$$

$$H2 = \frac{Vl2}{b2 * l2}$$

$$H2 = \frac{25.38 \text{ m}^3}{2.82 \text{ m} * 5.64 \text{ m}}$$

$$H1 = 1.60 \text{ m}$$

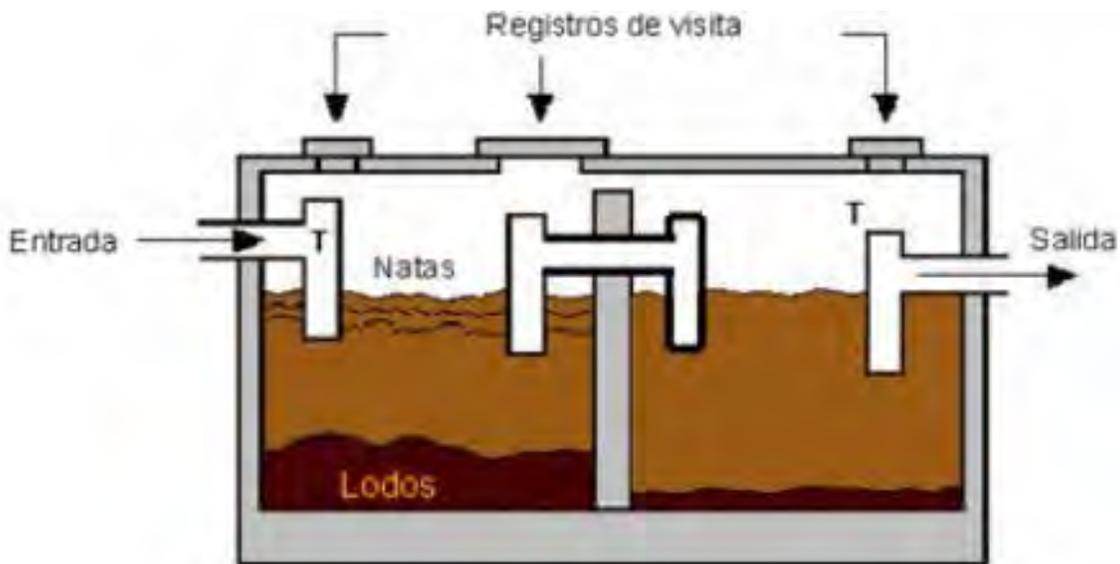


Ilustración 4.2, Tanque séptico de dos cámaras
Fuente: (CONAGUA, 2007)

4.4. Dimensionamiento final del humedal artificial

Como se mencionó anteriormente el área necesaria para un humedal artificial se determina con la aportación de agua residual que recibe y con la DBO que esta contiene.

Las siguientes recomendaciones son básicas para el diseño del humedal de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales domésticas (Hoffmann, Platzer, Winker, y von Muech, 2011):

- La superficie superior del filtro debe mantener un mismo nivel y las tuberías de distribución a menudo son cubiertas con grava para evitar la acumulación de agua durante los períodos de bombeo.
- Las tuberías de distribución deben ser diseñadas de tal manera que den una distribución uniforme de las aguas residuales, previamente tratadas, en toda la superficie del humedal artificial. Esto se consigue seleccionando el tamaño exacto de las tuberías de distribución, la longitud de las tuberías, el diámetro de los agujeros y el espaciamiento entre los agujeros en las tuberías de distribución.
- Para los grandes humedales es importante que el fondo tenga una pendiente de 0,5-1% en dirección a la salida.
- En la base para cubrir las tuberías de drenaje se necesita 20 cm de grava y en la parte superior del lecho 10 cm de grava. La grava en la parte superior evita la acumulación de agua al aire libre, y se podría omitir si no hubiese acceso del público al humedal artificial, se debe evitar que la superficie sea pisada.
- El área de superficie específica requerida (tratamiento primario) es generalmente de 3-4 m²/PE en las regiones frías y de 1-2 m²/PE en regiones cálidas.
- Los autores han tenido buenas experiencias con humedales de flujo vertical diseñados en climas cálidos con una carga orgánica de alrededor de unos 30-35 g DBO₅/m²/d.
- Las aguas residuales deben ser bombeadas al humedal de flujo vertical intermitentemente de 4 a 12 veces al día.

La carga intermitente de lotes aumenta la transferencia de oxígeno y conduce a una alta actividad de degradación aerobia. Por lo tanto, los humedales de flujo vertical siempre necesitan bombas o de lo contrario sifones que carguen por pulsos (Hoffmann, Platzer, Winker, y von Muech, 2011).

Para este tipo de humedales no existe un modelo matemático definido, es por eso por lo que su diseño es más bien empírico y por experiencia. Aunque muchos autores dan diferentes métodos para diseñar un humedal artificial de flujo vertical, generalmente el diseño está en función a las poblaciones equivalentes.

La población equivalente se puede definir como la carga orgánica biodegradable con una demanda bioquímica de oxígeno de cinco días (DBO₅) de 60 g de oxígeno por día. En otros términos, la carga orgánica biodegradable generada por una persona por día (Delgadillo, Camacho, Pérez, y Andrade, 2010). La Población equivalente (PE) se calcula de la siguiente manera:

$$PE = \frac{DBO_5 * Q}{60}$$

Donde:

PE = Población equivalente, en hab.

DBO₅ = Demanda Bioquímica de Oxígeno, en mg/l

Q = Caudal de aportación, m^3/d
60= Gramos de DBO al día por habitante

Como este edificio aún está en construcción, no se puede realizar pruebas para determinar la DBO que contiene el agua residual del edificio.

Es por eso que tomaremos la DBO de la concentración media de la tabla 1.2, y compararemos con otros documentos donde se haya hecho pruebas en edificios.

La concentración media de DBO_{5-20} es de 220 mg/l.

En una prueba de DBO_{5-20} que se realizó al edificio de la “División de Ingeniería Civil y Geomática” de la UNAM (Montiel, 2014), se determinó que la concentración a la salida del tratamiento preliminar era de 284 mg/l.

La caracterización del agua residual de la “División Académica de Ciencias Biológicas” de la UJAT, determino que la DBO_{5-20} es de 205 mg/l (Reyes, Laines, y Díaz, 2011).

El humedal artificial diseñado para esta edificación es un tratamiento secundario o de pulimiento la DBO_{5-20} que entrara al humedal no es de 310 mg/l ya que antes pasara por el tanque séptico. En la “Serie Autodidacta de Medición de la Calidad del Agua” (CNA & IMTA, 2005), nos dice que el porcentaje de remoción de la DBO está alrededor del 30% en un tanque séptico.

Teniendo esto en cuenta la DBO que entrará al humedal artificial será:

$$DBO_{5-20} = 220 \frac{mg}{l} * 0.7$$

$$DBO_{5-20} = 154 \frac{mg}{l}$$

Por lo que la población equivalente es:

$$PE = \frac{154 \frac{mg}{l} * \frac{101.52m^3}{d}}{60}$$

$$PE = 260.56 \approx 260$$

Como nuestro humedal no es tratamiento primario, se puede utilizar 1 m^2/PE (Delgadillo, Camacho, Pérez, y Andrade, 2010). Pero países como Alemania y Austria utilizan 1.7 m^2/PE (Hoffmann, Platzer, Winker, y von Muech, 2011) que tienen un clima similar a la Ciudad de México, es por eso por lo que se decidió en nuestro caso utilizar 1.3 m^2/PE .

$$As = 1.3 \frac{m^2}{PE} * PE$$

Donde:

As= Área superficial del humedal, en m²

PE= Población equivalente, en hab.

$$As = 1.3 \frac{m^2}{PE} * 260$$

$$As = 338 m^2$$

Con esta área y el caudal de aportación obtendremos la carga hidráulica.

$$CH = \frac{Q}{A}$$

Donde:

CH= Carga hidráulica, en m/d

Q= Caudal de aportación, en m³/d

A= Área superficial del humedal, en m²

$$CH = \frac{101.52 \frac{m^3}{d}}{338 m^2}$$

$$CH = 0.30 \frac{m}{d}$$

La carga hidráulica que obtenemos es igual a la carga hidráulica común, 0.3 m/d, que nos dice Crites, R. *et al* (2014) que existe en humedales de flujo vertical.

Para conocer la remoción de DBO utilizaremos la siguiente ecuación, que se ha obtenido de experiencias empíricas (Crites, Middlebrooks, Bastian, y Reed, 2014).

$$Ce = e^{-kt/CH} * Co$$

Donde:

Ce= DBO del efluente, en mg/l

Co= DBO del influente, en mg/l

kt= Constante de degradación, en días

CH= Carga hidráulica en el ciclo de dosificación, en m/d

Como Kt depende de la temperatura, la calcularemos según Reed.

$$kt = k_{20}(1.06)^{T-20}$$

$$k_{20} = 1.104 d^{-1}$$

En la tabla 4.2, se muestra las temperaturas mínimas promedio anual de la Ciudad de México en los últimos 10 años, con el promedio de estas temperaturas obtendremos la kt necesaria para la degradación de la DBO de este humedal.

Tabla 4.2, Temperatura mínima al año en CDMX

Año	Temperatura (°C)
2017	11.4
2016	11.6
2015	11.7
2014	11.5
2013	11.6
2012	10.6
2011	10.6
2010	10.5
2009	11.1
2008	10.6
2007	10.9
Promedio	11.10

Fuente: SMN

Por lo tanto, kt tendrá un valor de:

$$kt = 1.104 * (1.06)^{11.1^{\circ}-20^{\circ}}$$

$$kt = 0.66 d^{-1}$$

$$Ce = e^{-\frac{0.66}{0.30}} * 154 \frac{mg}{l}$$

$$Ce = 17.06 \frac{mg}{l}$$

La NOM-003-SEMARNAT-1997, nos da los límites permisibles para el agua residual tratada de reúso. Esta norma nos dice que el uso del agua tratada para servicios con contacto directo al público debe tener como máximo una concentración de DBO₅ igual a 20 mg/l, por lo tanto, el valor que obtuvimos de Ce cumple con la norma.

La profundidad del humedal suele ser de 60 cm.

La relación ancho-largo aceptables 1:1, 1:3 y 4:1 (Montiel, 2014). Utilizaremos la relación 1:3, por lo tanto:

$$l = 3b$$

El área superficial del humedal se define como:

$$As = l * b$$

Sustituyendo l con la primera ecuación tenemos:

$$As = 3b^2$$

$$As = 3b^2$$

$$b = \sqrt{\frac{As}{3}}$$

$$b = \sqrt{\frac{338 \text{ m}^2}{3}}$$

$$b = 10.61 \text{ m}$$

$$l = 3(10.61 \text{ m})$$

$$l = 31.84 \text{ m}$$

Para fines de construcción el largo y ancho serán de:

$$b = 10.6 \text{ m}$$

$$l = 31.9 \text{ m}$$

El humedal será de una sola celda y las aguas residuales sean vertidas al humedal intermitentemente 12 veces al día.

La pendiente de la superficie del humedal es plana (0%), este debe ser realizado con mucho cuidado para evitar que se formen charcos de agua sobre la superficie. La pendiente del fondo o lecho del humedal varía de 0.5 a 2% pero generalmente se utiliza una pendiente ligera del 1% (Delgadillo, Camacho, Pérez, y Andrade, 2010).

4.5. Cálculo del agua pluvial en el humedal artificial

Calcularemos el agua pluvial que caerá sobre el humedal para evitar el desbordamiento de este en época de lluvia.

Este flujo lo calcularemos con el Método de la Fórmula Racional.

$$Qp = 2.778 CIA$$

Donde:

Qp = Gasto pluvial, en l/s

A = Área de captación, en ha

C = Coeficiente de escurrimiento, adimensional

I = Intensidad de precipitación, en mm/hr

2.778 Coeficiente de conversión de unidades

El área será la superficie del humedal artificial que calculamos con anterioridad $A = 338 \text{ m}^2$, que en hectáreas será $A = 0.0338 \text{ ha}$.

El coeficiente de escurrimiento en humedales no está registrado en las tablas de autores conocidos. Buenfil reporta en humedales de Yucatán, un valor de 0.05 como coeficiente de escurrimiento (Buenfil, 2009). Como queremos conocer el gasto de agua que entra el humedal se utilizara el complemento al coeficiente de escurrimiento que es de 0.95.

Para la intensidad utilizamos las isoyetas que proporciona la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, en el Distrito Federal, que se muestra en la ilustración 4.2. Como el edificio se encuentra entre las isoyetas 180 y 160 utilizaremos 170 mm/hr como dato, un periodo de retorno de 10 años y una duración de 5 min.

$$Qp = 2.778 * 0.95 * \frac{170 \text{ mm}}{\text{hr}} * 0.0338 \text{ ha}$$

$$Qp = 15.16 \frac{\text{l}}{\text{s}}$$

Para asegurar que el humedal no tendrá problemas de lavado de biomasa y desbordamiento en temporadas de lluvia, se implementara un aliviadero que conducirá el caudal excedente directo al drenaje público.

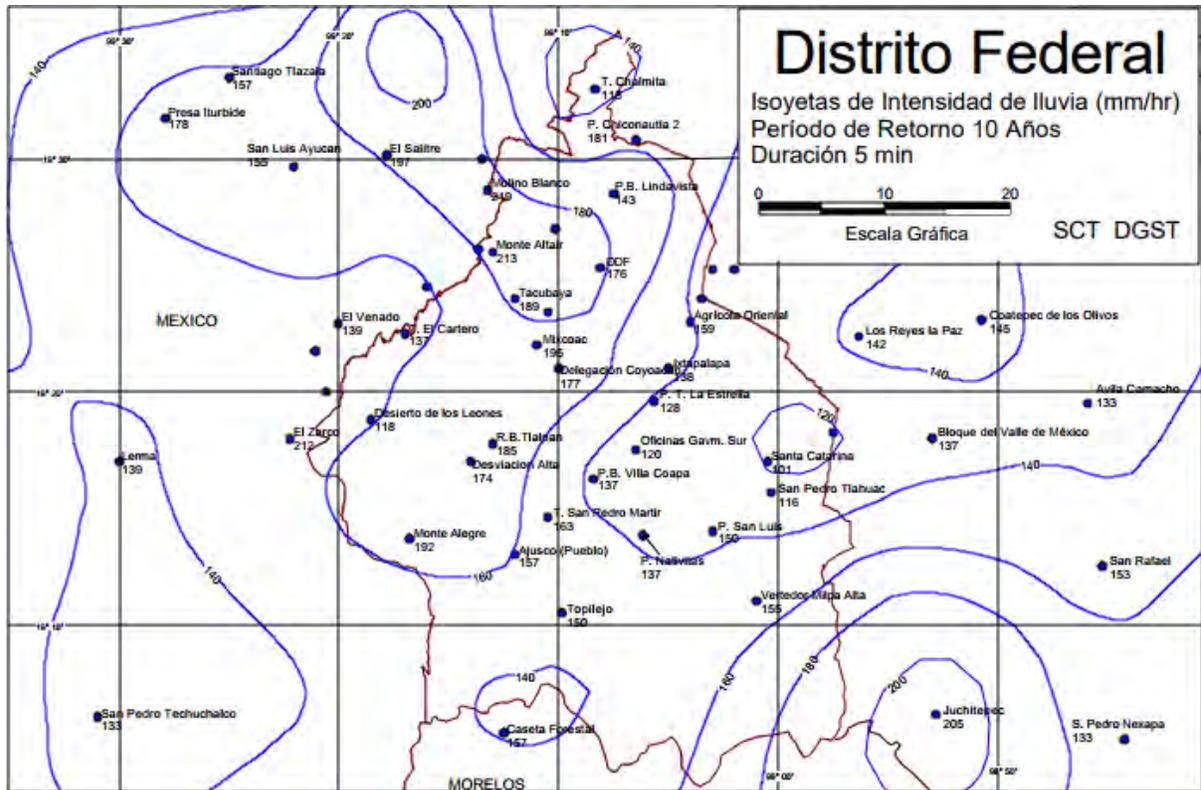


Ilustración 4.3, Isoyetas en el Distrito Federal
Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transporte

4.5.1. Diseño del aliviadero

La misión del aliviadero es la de evacuar el excedente de caudal sobre el que se ha calculado como tope para el funcionamiento del humedal artificial y que podría provocar un lavado en la biomasa activa (Rodríguez, 2017).

Consiste en una arqueta de planta rectangular en la que, a cierta altura de agua, toda aquella fracción de caudal que supere dicha altura es separada y vertida directamente pasando tan solo por una reja en un canal. El diseño del aliviadero se basa en que el agua residual excedente está tan diluida que la concentración de los contaminantes será similar a la que tendría si fuese tratada. A tal efecto, el aliviadero se diseña para que empiece a actuar cuando se supera 10 veces el caudal medio que llega a la estación depuradora y se determina por la siguiente ecuación (Rodríguez, 2017).

$$Q_v = Q_p - 10 * Q_{med}$$

Donde:

Q_v =Caudal de vertido que debe evacuar el aliviadero, en m³/s

Q_p =Caudal de lluvia más el caudal de aportación que llega al humedal, en m³/s

Q_{med} = Caudal medio, en m^3/s

$$Q_v = (0.01516 + 0.001175) \frac{m^3}{s} - 10 * 0.001175 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_v = 0.004585 \frac{m^3}{s}$$

La altura del aliviadero se calcula tanto para el caudal de lluvia más alto como para el caudal máximo instantáneo, y se suele considerar una velocidad del agua cuando ocurren estos dos caudales simultáneamente, la bibliografía recomienda es de 0.9 m/s, y para el ancho del canal se sugiere 0.3 m. Esta altura viene dada por la expresión (Rodríguez, 2017):

$$P = \frac{Q}{vel * b}$$

Donde:

P = Altura de la lámina de agua, en m

Q = Caudal de lluvia o de agua residual, en m^3/s

vel = Velocidad de los dos caudales simultáneos, en m/s

b = Ancho del canal, en m

Para el máximo instantáneo:

$$P_{Max} = \frac{0.01175 \frac{m^3}{s}}{0.9 \frac{m}{s} * 0.3 m}$$

$$P_{Max} = 0.0435 m$$

Para la lluvia

$$P_{ll} = \frac{0.016335 \frac{m^3}{s}}{0.9 \frac{m}{s} * 0.3 m}$$

$$P_{ll} = 0.0605 m$$

El valor de la altura necesaria para evacuar el caudal de vertido (H) se obtiene de la diferencia entre P_{ll} y P_{Max} .

$$H = P_{ll} - P_{Max} = 0.0605 \text{ m} - 0.0435 \text{ m}$$

$$H = 0.017 \text{ m}$$

Para calcular la longitud del vertedero se necesita dividir el caudal a aliviar entre el caudal por metro lineal de vertedero. Éste último, se determina mediante la fórmula simplificada de Francis (Rodríguez, 2017):

$$Q_{ml} = 1.83 * (1 - (0.2 * H)) * H^{1.5}$$

Donde:

Q_{ml} = Caudal por metro lineal, en $\text{m}^3/\text{m} * \text{s}$

H = Altura del aliviadero, en m

$$Q_{ml} = 1.83 * (1 - (0.2 * 0.017\text{m})) * 0.017^{1.5}$$

$$Q_{ml} = 0.004042 \frac{\text{m}^3}{\text{m} * \text{s}}$$

La longitud del vertedero se calcula al dividir el caudal a aliviar entre el caudal por metro lineal.

$$L = \frac{Q_v}{Q_{ml}}$$

Donde:

L = Longitud del aliviadero, en m

$$L = \frac{0.004585 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{0.004042 \frac{\text{m}^3}{\text{m} * \text{s}}}$$

$$L = 1.13 \text{ m}$$

5. RESULTADOS

5.1. Construcción del humedal artificial

De forma similar a muchas actividades de construcción y en base a la experiencia adquirida en la construcción de los humedales, para su construcción se sugieren seguir los siguientes pasos (Delgadillo, Camacho, Pérez, y Andrade, 2010):

1. Reconocimiento del terreno.
2. Estudios geotécnicos.
3. Desmonte.
4. Levantamiento topográfico y replanteo.
5. Toma de energía eléctrica.
6. Construcción del dique de contención.
7. Construcción de cámaras de registro (de entrada y salida).
8. Construcción de casetas de bombeo.
9. Impermeabilización del dique (fosa o embalse) de contención.
10. Ensamblado del sistema de drenaje o colección.
11. Llenado de gravas y/o arena.
12. Ensamblado del sistema de aplicación.

El reconocimiento del terreno, los estudios geotécnicos y el desmonte, será diferente en este caso, ya que el humedal se construirá al lado de un edificio en la ciudad.

Levantamiento topográfico

El levantamiento topográfico se realizará terminada la estructura de la edificación y los acabados generales para así limpiar la zona del humedal y realizar esta actividad. Una vez obtenido el plano, se procede a realizar el trazo, que consiste en la propuesta y posterior replanteo sobre el terreno de las estructuras diseñadas y establecidas en los planos. No solo se debe tomar en cuenta el humedal, también se debe establecer en el plano el tanque séptico, el dique del humedal, y todos los demás componentes necesarios para su buen funcionamiento.

Toma de energía eléctrica

Para la toma eléctrica del humedal, es necesario que los electricistas construyan un tablero exclusivo para su funcionamiento, esto con el fin de que las instalaciones eléctricas del edificio y del humedal no interfieran entre sí.

Construcción del dique de contención

Después de delimitar el lugar en el cual se implementará el humedal, es necesario proceder con la construcción de las paredes mismas del humedal.

Construcción de cámaras de registro (de entrada y salida) y de casetas de bombeo

Las cámaras de registro y las casetas de bombeo deben ser construidas lo suficientemente grandes para que una persona pueda entrar y moverse al realizar mantenimiento o una reparación.

Impermeabilización del dique de contención

Antes de la impermeabilización del dique de contención del humedal, se debe nivelar la base, dando la pendiente del 1% hacia la(s) tubería(s) de drenaje.

Aunque el humedal su base será hecha de concreto, evitaremos problemas de infiltración con una geomembrana. Para colocar la geomembrana es necesario que su despliegue sea en sentido de máxima pendiente de la superficie.

Ensamblado del sistema de drenaje o recolección

El sistema de drenaje es construido con tubería de desagüe con perforaciones de acuerdo con la gradación de grava diseñada para el drenaje del humedal. Para el humedal de flujo vertical las tuberías deben de estar distribuidas a lo largo del humedal en forma de espina de pescado.

Llenado de gravas y/o arena

Se recomienda colocar una capa de 5 a 10 cm de arena, antes de comenzar con el llenado de grava del humedal. Esto para proteger a la geomembrana de pinchazos y cortaduras ocasionados por herramientas o durante la colocación de grava (Delgadillo, Camacho, Pérez, y Andrade, 2010).

Una vez acumulado el material gravoso en la zona de construcción, el mismo es dispuesto en capas en toda la superficie del humedal, hasta llenar la cantidad de grava según el diseño.

Ensamblado del sistema de aplicación

Ya con la grava de base, se procede a colocar las tuberías perforadas.

Una vez armado el sistema de aplicación es posible proceder a la plantación según la especie escogida. Esto debido a que en ese momento se puede garantizar el suministro de agua, necesario para la adaptación y sobrevivencia de las plantas.

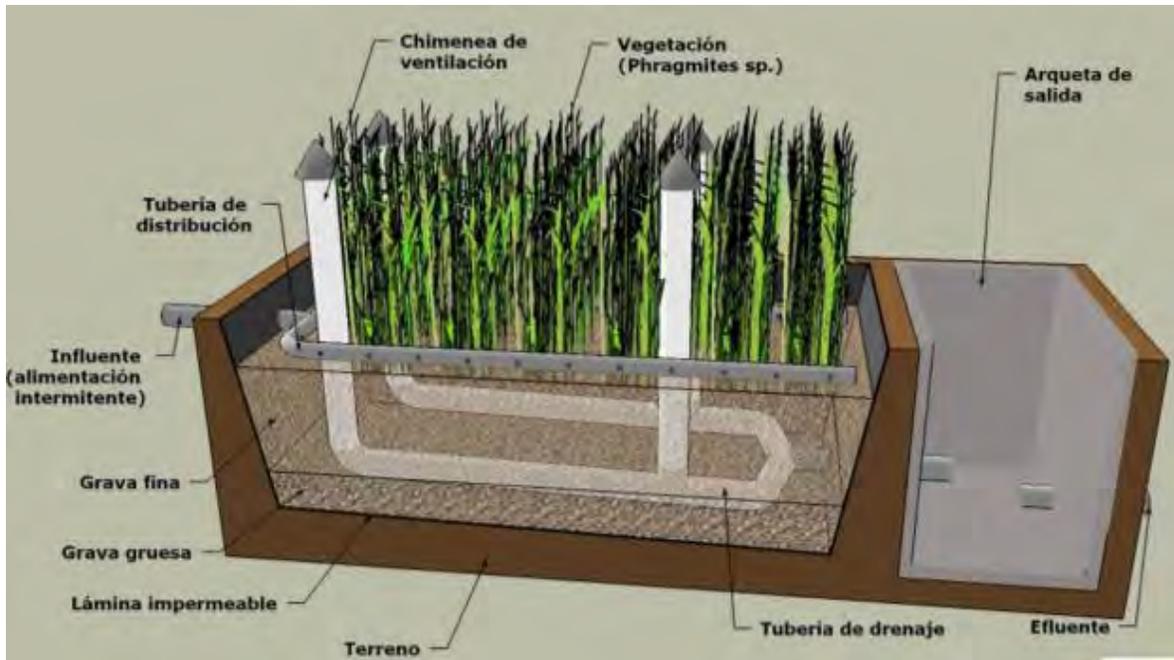


Ilustración 5.1 Componentes de un humedal artificial de flujo vertical
Fuente: Aquaberry

5.2. Configuración del humedal de flujo vertical

Capas de arena y grava

Para las capas de arena y grava que tendrá el humedal artificial, utilizaremos las recomendaciones dadas por Crites, R. *et al.*, (2014).

Para empezar, se necesita 10 cm de arena fina compactada para crear una capa que proteja la geomembrana y de soporte a las tuberías de drenaje que se instalaran en la base del humedal.

Después se colocará una capa de grava gruesa lavada (40 mm) de 15 cm, para continuar con una capa de grava mediana lavada (12 mm) de 10 cm.

Para finalizar se colocará 15 cm de gravilla (6 mm) y 10 cm de arena gruesa donde se plantará la vegetación que se escogerá según lo que se encuentre en los viveros locales.

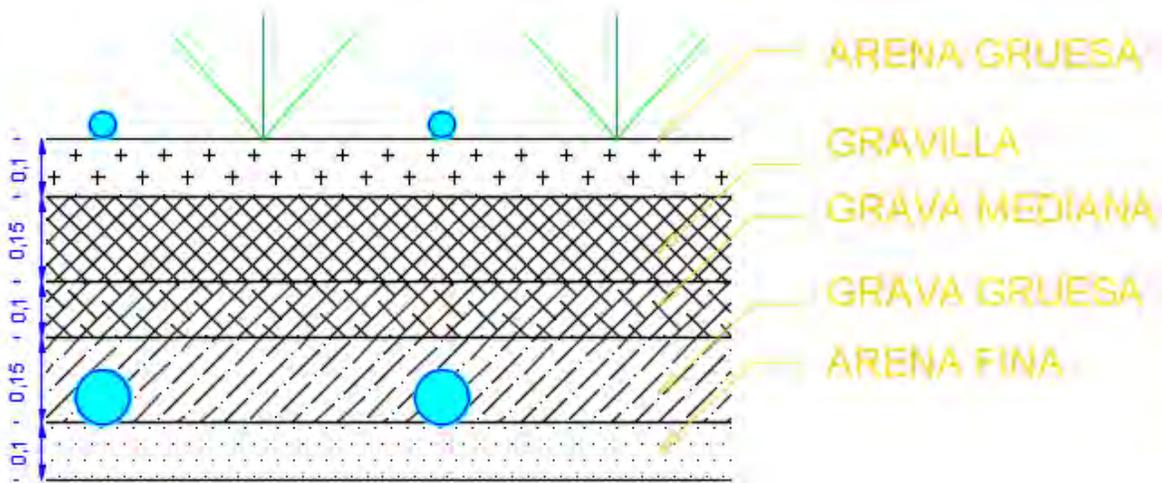


Ilustración 5.2, Estructura de arena y grava en el humedal

Tuberías

En la tabla 5.1 se muestra algunas características que deben de tener las tuberías del humedal de flujo vertical y el valor usual que se recomienda según las experiencias de otros humedales de este tipo.

Tabla 5.1, Características comunes de tuberías para humedal de flujo vertical

Factor	Unidad	Intervalo	Valor usual
Drenaje			
Tamaño de tubería	Pulg.	3-4	4
Pendiente	%	0.5-2	1
Distribución del agua			
Diámetro tubería	Pulg.	1-2	1.5
Factor	Unidad	Intervalo	Valor usual
Distancia entre tuberías	m	0.5-1.2	0.6
Orificios distribución	mm	3-12	6
Distancia entre orificios	m	0.5-1.2	0.6

Fuente: Delgadillo, Camacho, Pérez, y Andrade, 2010

La tubería de drenaje será de 4" a cada 0.6 m de separación y sus orificios serán de 1 cm a cada 0.6 m de distancia. A las tuberías de drenaje deben de empezar en la parte superior del humedal, como se muestra en la ilustración 5.3, para propiciar el flujo a gravedad.

Para las tuberías de distribución de agua serán de 2" a cada 0.6 m de separación y sus orificios serán de 0.6 cm a cada 0.5 m.

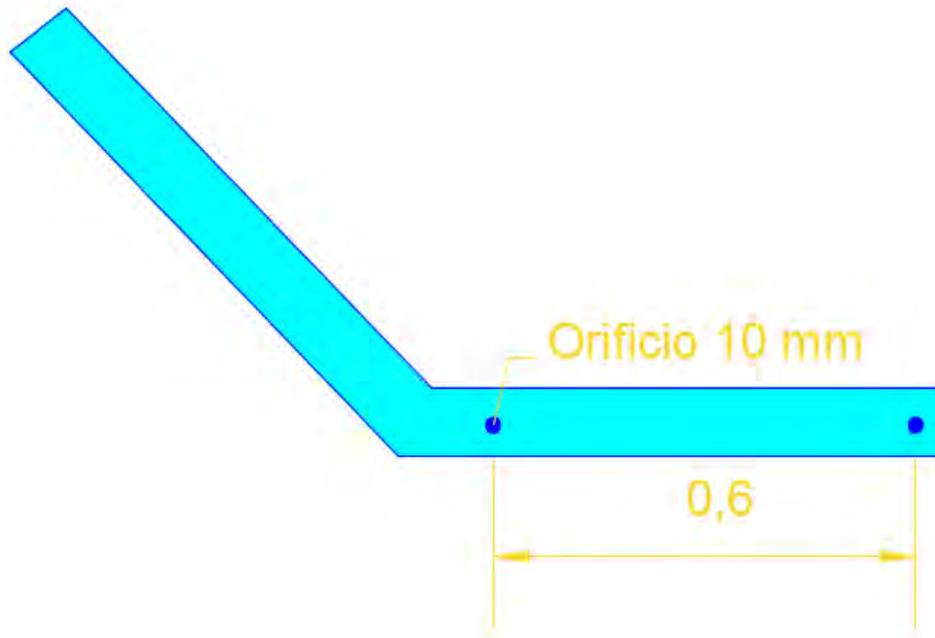
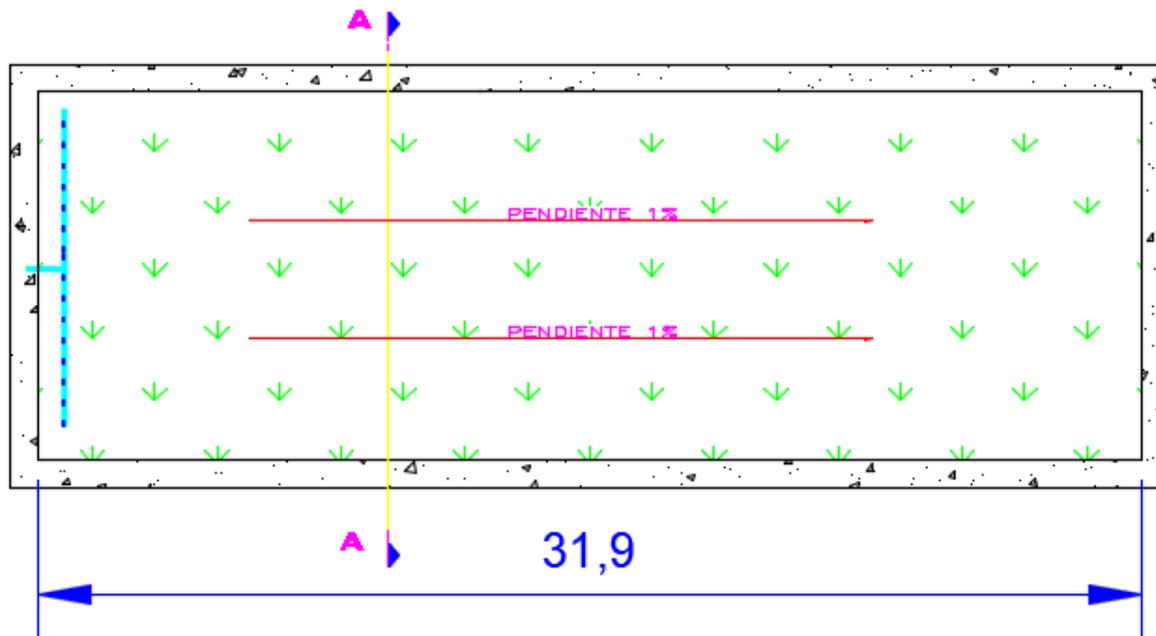
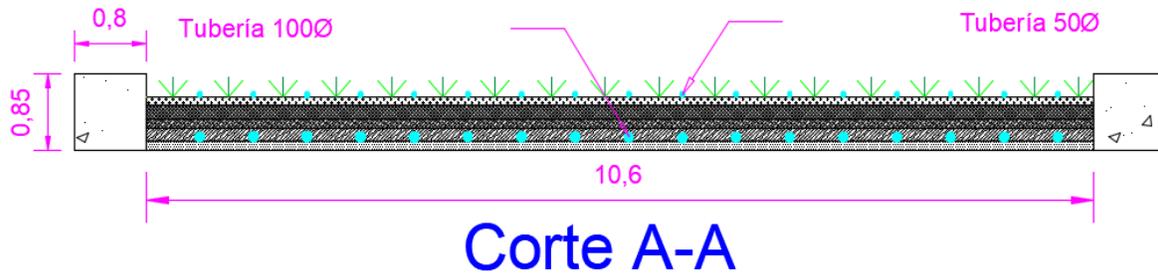


Ilustración 5.3, Tubería de drenaje

A continuación, se muestra un diagrama del humedal vertical de vista en planta y un corte que nos muestra los estratos de grava y arena, así como las tuberías.



*Dimensiones en m y diámetros en mm



*Dimensiones en m y diámetros en mm

5.3. La obstrucción y la aireación del suelo en humedal de flujo vertical

Un aspecto muy importante de los humedales de flujo vertical es el riesgo de obstrucción de la superficie del lecho filtrante que da lugar a la falla general del sistema.

Las obstrucciones o colmataciones temporales son parte del proceso y se producen regularmente en los humedales verticales. La obstrucción temporal se revierte con el reposo frecuente de la superficie afectada. En el diseño y la operación de los humedales, especialmente para una población mayor de 50 PE, siempre se debe considerar esta condición (Hoffmann, Platzer, Winker, y von Muech, 2011).

La obstrucción de la superficie de los humedales, que ocurren por la acumulación de los sólidos en suspensión o por el rápido crecimiento de lodos, es causada por un pobre pretratamiento, una carga alta o una arena muy fina.

La obstrucción es una reacción normal causada por la actividad biológica de los microorganismos. Por lo tanto, el sistema tiene que ser diseñado suficientemente grande para que los periodos de descanso puedan ocurrir, periodos que se tienen que dar por partes y en alternó. El principal factor para un buen funcionamiento de los HFV es una óptima aireación del lecho filtrante (Hoffmann, Platzer, Winker, y von Muech, 2011).

5.4. Mantenimiento y operación del humedal

Los humedales artificiales de Flujo vertical necesitan de más operación y mantenimiento que los de flujo horizontal. Las siguientes actividades de operación y mantenimiento se deben realizar para el humedal (Hoffmann, Platzer, Winker, y von Muech, 2011):

- Para los humedales de flujo vertical es importante la distribución uniforme del efluente pre-tratado en toda la superficie, esto debe controlarse especialmente. Válvulas antes de la distribución de las tuberías y las tapas removibles al final permiten la limpieza de las tuberías durante la fase de bombeo. En caso de que el lecho filtrante, o una parte de él, se vean afectados por la obstrucción y tenga que descansar, las válvulas se pueden cerrar.

- Los intervalos de alimentación de las aguas residuales tienen que ser mantenidos por un sistema automático de bombas o sifones.
- La superficie debe de tener la posibilidad de secarse entre cada carga de aguas residuales.
- Se deben tomar acciones inmediatas en caso de obstrucción. El humedal de flujo vertical se puede recuperar bien después de un período de descanso de dos semanas en el que el lecho filtrante se seque.
- Es mejor sobrecargar una parte del lecho filtrante con el fin de dejar descansar la otra parte que esperar a que todo el sistema se recupere al mismo tiempo. Una vez obstruido, el sistema no se puede recuperar, sin periodos de descanso. Se ha demostrado que el humedal de flujo vertical puede recuperar casi por completo su eficacia después de largos períodos de reposo.

También se pueden realizar algunas actividades para saber si el funcionamiento del humedal es correcto. A continuación, se menciona algunas de estas actividades.

- Controlar regularmente el color y olor del efluente del humedal que da información importante acerca de la calidad y el funcionamiento del lecho.
- La detección de turbiedad y/o color grisáceo, indica un insuficiente suministro de oxígeno. La reacción debe ser: El drenaje del efluente debe reducirse con la finalidad de permitir una mayor entrada de oxígeno.
- El mal olor del agua tratadas indica procesos anaeróbicos y por lo tanto una situación muy crítica. El lecho debe estar en reposo y la recarga debe disminuir o el suministro de oxígeno en el humedal debe ser mejorado.
- Efluentes claros, pero con color, ligeramente amarillo o marrón, es una situación normal en los tratamientos biológicos, especialmente en humedales (por los ácidos húmicos).
- Inspeccionar en la vegetación de los humedales que no haya “enfermedades”, insectos, etc.
- Se debe prestar atención a las malezas o plantas depredadoras hasta que la vegetación del humedal esté plenamente establecida.

5.5. Establecimiento de la vegetación

La adaptación de la vegetación que se va a plantar en el humedal es muy importante para el buen funcionamiento de este. Las plantas locales ya están adaptadas al entorno regional y son preferibles, si están disponibles. Varios viveros comerciales también son capaces de proporcionar el inventario de plantas para grandes proyectos, como por ejemplo Xochimilco donde se pueden encontrar carrizos, juncos o tule. El desarrollo de la planta a partir de la semilla lleva mucho tiempo y requiere un control muy cuidadoso del agua, y el consumo de semillas por parte de las aves puede ser un problema. El enfoque más rápido y

confiable es trasplantar rizomas de la vegetación que se elija en el lecho de tratamiento preparado (Crites, Middlebrooks, Bastian, y Reed, 2014).

Cada corte de rizoma debe tener al menos un brote en crecimiento y se planta con un extremo a unos 5 cm por debajo de la superficie del medio con el brote expuesto a la atmósfera, por encima del medio saturado. El lecho se inunda y el nivel de agua se mantiene en el suelo o en la superficie de los medios durante al menos 6 semanas o hasta que se desarrolle y emerja un nuevo crecimiento significativo. En esta etapa, el humedal debe ponerse en pleno funcionamiento de poco a poco para permitir el nuevo crecimiento de la planta. Si las limitaciones de costos son un problema, es ventajoso colocar aproximadamente el 75% del total de vegetación en la última mitad de la celda y el 25% en la primera mitad (Crites, Middlebrooks, Bastian, y Reed, 2014).



Ilustración 5.4, Carrizos

Si las plantas de los humedales artificiales deben ser cosechadas o no es aún discutible. No se puede dar una respuesta general, pero las plantas deben ser podadas si afectan el funcionamiento o las actividades de mantenimiento. Las experiencias en zonas de clima cálido han demostrado que las plantas en los humedales de flujo vertical deben ser removidas cada dos años para permitir una inspección visual del sistema de distribución (Hoffmann, Platzer, Winker, y von Muech, 2011).

Los beneficios de cosechar las plantas de los humedales artificiales incluyen:

- Los nutrientes que han sido tomados por las plantas son removidos del sistema.
- En el caso de los humedales de flujo vertical la menor biomasa de las plantas puede hacer más fáciles las tareas de mantenimiento.
- El material vegetal es posible utilizarlo como cultivo de forraje o paja, mientras no contengan sustancias tóxicas.

Los beneficios de no cosechar las plantas de los humedales artificiales incluyen:

- La creación de una capa aislante del material vegetal muerto. Esto sólo es importante para las zonas de clima moderado.
- Suministro de una fuente de carbono para la desnitrificación, si la eliminación de nitrógeno es importante.
- No hay alteración del funcionamiento ecológico del humedal.
- Menos trabajo para el personal de mantenimiento.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este trabajo se diseñó la ingeniería básica para un humedal de flujo vertical que servirá como sistema de tratamiento de aguas residuales en un edificio de oficinas en la Ciudad de México. El efluente tiene una concentración que se encuentra dentro de las normas, por lo que el agua puede ser reutilizada.

El agua tratada que será depositada en la cisterna de agua tratada y agua pluvial proveniente del techo del edificio será usada en las áreas verdes, para las torres de enfriamiento, y en los urinarios e inodoros, beneficiando no solo al medio ambiente sino también a la economía del edificio ya que se utilizara menos agua potable para estos muebles sanitarios.

El humedal artificial no solo será funcional para el edificio ubicado en Insurgentes Sur, también será un distintivo estético que le puede dar mayor valor a las oficinas que se van a rentar.

El humedal artificial puede ayudar a la edificación a obtener la certificación LEED que está buscando, ya que cumpliría con varios elementos de los requisitos del uso eficiente del agua y la de calidad ambiental.

Los humedales de flujo vertical son ideales para áreas pequeñas, ya que pueden tener la misma eficiencia de un humedal de flujo horizontal, pero con un área menor, lo que los hace ideales para las ciudades donde los terrenos no son extensos.

Los humedales artificiales son sistemas que cada día van tomando más importancia en el ámbito del tratamiento de aguas residuales. En países desarrollados como Alemania, Francia, Polonia, entre otros, es común ver la implementación de estos sistemas. Aún falta mucho por conocer e investigar sobre los humedales artificiales, pero se espera que también sean comunes en países de América latina, no solo en las comunidades pequeñas, sino también en las grandes ciudades.

Es importante darle mantenimiento constante al humedal y cumplir con los ciclos de dosificación para que este funcione adecuadamente. No se debe de olvidar limpiar los lodos de las cámaras del tanque séptico, ya que puede provocar que los lodos acumulados

obstruyan las tuberías que dosifican el agua al humedal, u obstruyan los estratos del humedal resultando en malos olores, el incumplimiento de la NOM-003-SEMARNAT-1997 o consecuencias más grandes como el tener que cambiar la arena y la grava.

Para la vegetación se recomienda buscar plantas acuáticas locales que ya estén acostumbradas al clima de la ciudad y que sean brotes y no semillas para tener mejor éxito en el crecimiento de la vegetación dentro del humedal. Según sea el caso se puede considerar la cosecha de la vegetación. Ya que el humedal queda en un lugar donde la mayoría del día recibirá sombra, es recomendable que la vegetación sea de hoja ancha. No se debe olvidar que el humedal deberá empezar a funcionar de poco para permitir el crecimiento de la vegetación.

Si bien en este trabajo se trató de tomar en cuenta todos los elementos para dimensionar el humedal artificial de flujo vertical, muchos datos fueron obtenidos de libros y trabajos relacionados a los humedales, es por eso que se recomienda que una vez terminado el edificio se realicen diferentes muestreos y pruebas para corroborar los datos utilizados para su dimensionamiento, o bien, utilizar los valores reales para implementar cambios y mejoras al humedal hasta que este funcione según las necesidades.

ANEXOS

Agua tratada (y aprovechamiento pluvial)

El agua tratada será utilizada para riego de áreas verdes, reposición a torres de enfriamiento y alimentación de inodoros y mingitorios públicos. El volumen de agua tratada por día se considera el mismo calculado para la demanda diaria de agua potable, suponiendo que la totalidad del agua potable se va al drenaje, menos un porcentaje de pérdidas. Para los faltantes de agua tratada en temporada de lluvias, se utilizará el agua pluvial captada en la cisterna de agua pluvial, que se enviará mediante un sistema de bombeo y un filtro de lecho profundo hacia la cisterna de agua tratada. En temporada de estiaje los faltantes de agua tratada se obtendrán de agua tratada exterior o de la toma de agua potable.

El sistema de agua tratada consta de una cisterna ubicada en sótano -1 y -2 donde se almacena el agua tratada y está compuesta por dos celdas. El agua tratada excedente, si existiera, será vertida al colector municipal.

De esta cisterna se envía el agua mediante un sistema de bombeo programado a un tanque elevado desde donde se alimentan por gravedad todos los servicios que requieren de agua tratada.

El sistema de bombeo a tanques elevados se encuentra ubicado junto a la cisterna de agua tratada, en el sótano -2. Todo el edificio se alimenta desde el tanque elevado. Para alimentar los tres niveles superiores del edificio (22, 23 y 24, además de azotea) se contará con un sistema de bombeo de velocidad variable ubicado junto al tanque elevado para proporcionar la presión adecuada a estos niveles. Para la alimentación por gravedad se cuenta con cuatro sistemas de presión, el primero alimenta por gravedad los niveles 17 al 21 directamente del tinaco, los siguientes sistemas de gravedad de los niveles inferiores se alimentan mediante una válvula reguladora de presión por sistema, debido a la alta presión estática de estos niveles.

Dotación para riego

La dotación para este tipo de construcciones está establecida de acuerdo al Reglamento de Construcciones del D.D.F. (art.82) y de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, de esta manera se tiene como dotación mínima para riego 5 l/m²/d estimando para este caso el siguiente consumo:

Dotación para riego: 5.0 l/m²/d
Área jardineada = 600.0 m²

Consumo estimado diario = Dotación * Área de riego = 3,000 litros

Consumo estimado diario: 3,000 litros

Reposición a torres de enfriamiento

Según información calculada y proporcionada por los proyectistas del sistema de aire acondicionado:

Consumo máximo de agua por torre: 9.14 GPM
Numero de torres de enfriamiento: 3.00 torres
Tiempo de operación diario: 10.00 Horas (600.00 minutos)

Consumo máximo estimado por día:

9.14 gpm x 3 torres x 60 min x 10 horas = 16,452 Galones (62,277.6 Litros)

Consumo estimado por día: 62,277.6 litros

Agua tratada para alimentación a inodoros y mingitorios

Gasto por descarga WC: 6.00 litros
Gasto por descarga mingitorio: 3.00 litros
El predio cuenta como máximo con: 2,156 empleados de oficinas

50 trabajadores

Considerando: 50% son hombres y 50% son mujeres

1,078 Empleados (mujeres)

1,078 Empleados (hombres)

1.00 usos de WC máximo por habitante por día (Hombre) empleados.

5.00 usos de WC máximo por habitante por día (Mujer).

3.00 usos de mingitorio máximo por usuario por día (Empleados).

Consumo = Número de habitantes * No. De usos de WC/Ming * Consumo por descarga

Mueble	No. Mujeres	No. Hombres	Uso por Mueble	Consumo (l/descarga)	Total (l)
WC-Mujeres	1078	0	5	6	32340
WC-Hombres	0	1078	1	6	6468
Mueble	No. Mujeres	No. Hombres	Uso por Mueble	Consumo (l/descarga)	Total (l)
Mingitorios	0	1078	3	3	9702
TOTAL					48,510

Consumo estimado diario para inodoros: 48,510 litros

Consumo estimado de agua tratada por día: 113,787.6 l/d

Agua tratada para riego de áreas verdes:

- Consumo estimado diario: 3,000 l
- Días de Almacenamiento: 3.0 días
- Volumen de Almacenamiento: 9,000 l

Agua tratada para reposición a torres de enfriamiento:

- Consumo estimado diario: 62,277.6 l
- Días de Almacenamiento: 1.0 días
- Volumen de Almacenamiento: 62,277.6 l

Agua tratada para inodoros y mingitorios:

- Consumo estimado diario: 48,510. l
- Días de Almacenamiento: 1.5 días
- Volumen de Almacenamiento: 72,765 l

Volumen de cisterna de agua tratada: 144,042.6 l

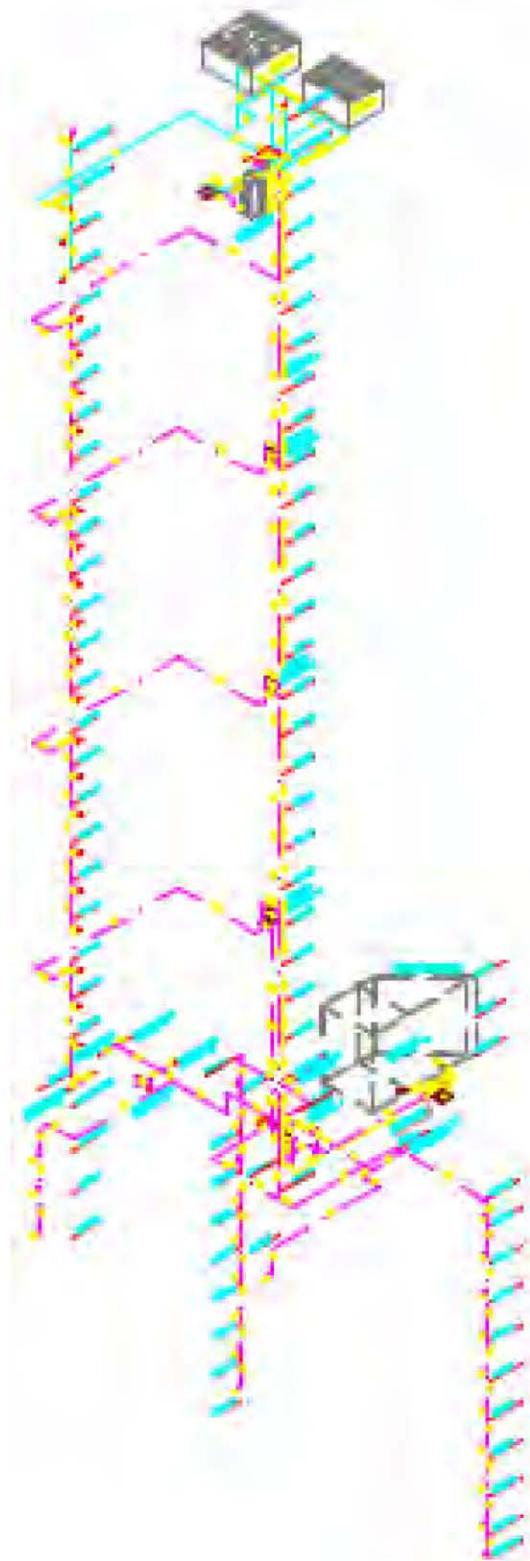


Ilustración 0.1, Instalaciones de agua tratada

Lectura 1: El sistema francés para tratamiento primario y secundario de aguas residuales

La siguiente información se obtuvo del libro de Hoffman (2011) y Molle (2005). Es importante conocer otro tipo de humedales artificiales además de los convencionales, ya sea un acomodo singular como el "sistema francés" o un híbrido entre sistema de flujo vertical y de flujo horizontal.

En Francia, alrededor de 1990 se creó un tratamiento especial de flujo vertical con humedales artificiales para aguas residuales crudas llamado "sistema francés". Un aspecto muy interesante de este sistema es que el pretratamiento es parte de este sistema, pero no genera lodos, no libera biogás ni provoca costos adicionales para su mantenimiento, sin embargo, es altamente eficiente y por lo tanto es ideal para comunidades que tienen suficiente espacio para implementar el sistema (Hoffmann, Platzer, Winker, y von Muech, 2011).

La primera etapa del sistema francés es un humedal de flujo vertical (HFV), pero con grava de lecho filtrante, el cual ha sido diseñado para el pretratamiento del agua residual cruda. Las aguas residuales pueden pasar o no previamente por cribas o rejillas, para separar los sólidos más grandes, y luego ser bombeadas a la superficie del primer humedal a través de tuberías de distribución de aproximadamente de 100mm de diámetro. Las cuales están abiertas para descargar las aguas residuales crudas en diversos puntos y distribuir las directamente en la superficie del lecho. Acá los sólidos se acumulan y se oxidan en contacto con el oxígeno del aire, mientras el líquido filtra hacia el fondo del humedal para seguir su tratamiento. El líquido pretratado pasa en la segunda etapa, a un HFV "convencional" con arena gruesa como lecho filtrante (Molle, Liégnard, Boutin, Merlin, y Ivema, 2005).

Se recomienda dividir la superficie de la primera etapa del tratamiento de en tres compartimentos sin dependientes o construir tres humedales separados. Para la segunda etapa se recomienda la construcción de dos humedales separados.

Los 3 compartimentos o humedales de la primera etapa se operan en alterno para controlar el crecimiento de la biomasa, mantener las condiciones aerobias en el lecho y permitir que el lodo se seque. Cada compartimento o humedal recibe todas las aguas residuales durante 3-4 días, y luego descansa durante 6-8 días, mientras que los otros compartimentos o humedales son utilizados (Molle, Liégnard, Boutin, Merlin, y Ivema, 2005).

El agua residual cruda es pretratada (filtrada) en la primera etapa: pasando primero a través de una capa de 30 cm de grava fina (tamaño de partícula de 2-8 mm), después a través de una capa de 10-20 cm de grava de transición (tamaño de partícula de 5-20 mm) y luego por la capa de drenaje (grava con un tamaño de partícula de 20 a 40 mm o incluso de 30 a 60 mm) en la parte inferior del lecho del filtro. Los sólidos retenidos en la superficie se mineralizan.



**Ilustración 0.2, Sistema francés para 800 PE, de izquierda a derecha: tres HFV (filtros) para el pretratamiento y dos HFV para el tratamiento secundario en Albondón, España.
Fuente: (Hoffmann, Platzer, Winker, y von Muech, 2011)**

Los dos HFV de la segunda etapa se utilizan en paralelo, con la opción de descansar un filtro o alternar la operación. Estos humedales tienen una capa de arena de 30 cm (d₁₀ de 0,25 mm a 0,4 mm). En Francia generalmente los lechos del filtro son plantados con carrizo (*Phragmites australis*).

En el dimensionamiento del Sistema Francés para el tratamiento de aguas residuales municipales Molle (2005) recomienda:

- Para la primera etapa del pretratamiento: 1,2 m²/PE (equivalente a una carga promedio de 100 g DQO/m²/d, 50g de SST/m²/d, 10 g NTK/m²/d y 120 L/m/d dividido en más de tres unidades idénticamente alimentadas alternadamente.
- Para el tratamiento secundario (segunda etapa): 0,8 m²/PE dividido en dos líneas paralelas o lechos alimentados en alterno. Esto resulta en una carga media baja del efluente de 25g DQO/m²/d.

Molle (2005) reporto que el lecho de grava que es altamente cargado remueve el 80% de DQO, el 86% de SST y el 50% de TKN, siendo el sistema más eficiente que cualquier otro tratamiento convencional primario. Los sólidos retenidos en la superficie del lecho del filtro de grava forman una capa de lodo, que limita la infiltración y mejora la distribución del agua en la superficie.

El lodo acumulado en el lecho del filtro crece alrededor de 1,5 cm por año. La operación se alterna en tres unidades de pre-tratamiento que posibilita el secado y la mineralización del lodo. Después de 10-15 años se tendrá acumulado una capa de hasta unos 20cm que deberá ser retirada. Es posible el uso de esta tierra negra con fines agrícolas, como abono, pero

como siempre, la reutilización también depende del contenido de metales pesados de las aguas residuales. La segunda etapa es necesaria para completar la nitrificación y eliminar los patógenos. Además para completar la reducción de la DQO y los SST, el tratamiento total (primera y segunda etapa) del sistema Francés normalmente elimina el 90% de DQO, el 96% de SST y el 85% de TKN.

Este sistema es una opción interesante para pequeñas comunidades, ya que es sencillo y de bajo costo. Evita las desventajas de los pretratamientos convencionales, es decir la producción de lodos primarios y las emisiones de biogás. El sistema Francés se ha utilizado desde hace más de 20 años, y existen cerca de 500 humedales de este tipo en Francia. También ahora algunas de estas plantas son usadas en Alemania, Portugal y España.

Una de sus ventajas es que ya cuenta con pretratamiento por lo tanto ya no se debe de considerar el área que él ocupa como en los humedales convencionales de flujo vertical y flujo horizontal. El pretratamiento (lecho de grava) del sistema francés es muy eficiente y permite reducir el área de tratamiento principal (Hoffmann, Platzer, Winker, y von Muech, 2011). Se recomienda considerar la siguiente relación (siempre y cuando se comparen con pretratamientos eficientes, como por ejemplo el tanque Baffled):

- **Para climas fríos:**

PrTr + HFH > PrTr + HFV > Sistema Francés (es decir, el sistema Francés requiere menos espacio)

- **Para climas cálidos:**

PrTr + HFH > Sistema Francés > PrTr + HFV (significa que humedales de FV requieren menos espacio)

Las desventajas del sistema Francés incluyen:

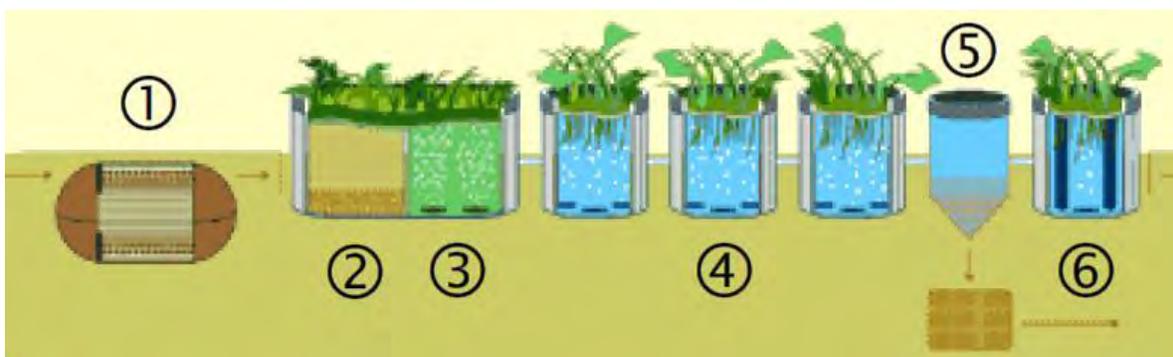
- Debido a la necesidad de carga intermitente para cada una de las dos etapas, son necesarias dos estaciones de bombeo. Para evitar el bombeo se puede utilizar un sifón autocebante para la carga intermitente de los lotes en lechos filtrante. Los sifones necesitan diferencia de altura entre el nivel del afluente y la superficie.
- El sistema Francés no es adecuado para pequeñas instalaciones de nivel domésticos debido a los posibles problemas de higiene al tener acceso libre de las aguas residuales crudas cerca de la casa.
- Muchos expertos dudan en construir el sistema Francés, porque le temen a la falta de aceptación debido a la aplicación de aguas residuales crudas sobre el lecho del filtro. Con el fin de evitar problemas con la aceptación social, el sistema no debería ser construido en áreas densamente pobladas.

Lectura 2: Living Machine®

Living Machine® es una tecnología emergente para el tratamiento de agua residual, que utiliza una serie de tanques que sirve de soporte para vegetación y microorganismos. El creador de Living Machine® es el Dr. John Todd, presidente de la organización sin fines de lucro "Ocean Arks International", y obtiene su nombre de los componentes ecológicos que se incorporan dentro de sus procesos de tratamiento (microorganismos, protozoos, animales superiores como caracoles y plantas).

Living Machine® incorpora muchos de los mismos procesos básicos (por ejemplo, sedimentación, filtración, clarificación, adsorción, nitrificación y desnitrificación, volatilización y descomposición aerobia y anaerobia) que se utilizan en sistemas convencionales de tratamiento biológico. Lo que hace diferente a este sistema es que también incorpora plantas y animales para el tratamiento del agua residual, y su estética única. En climas templados, el proceso generalmente se aloja dentro de un gran invernadero, que protege el proceso de frías temperaturas.

Una composición de Living Machine® típica comprende seis componentes principales de tratamiento. En orden los componentes son (1) un reactor anaeróbico, (2) un tanque anóxico, (3) un reactor aeróbico cerrado, (4) reactores aeróbicos, (5) un clarificador, y (6) "lechos fluidizados ecológicos" (EFB, por sus siglas en inglés). Mientras los reactores aeróbicos abiertos y los EFB se encuentran en casi todos los Living Machines®, los otros componentes no siempre se utilizan en el proceso de tratamiento. Los componentes específicos utilizados son seleccionados por diseñadores según las características de las aguas residuales que se van a tratar y los objetivos de tratamiento. Algunas veces otros componentes pueden agregarse si se considera necesario por los diseñadores (Living Machine, 2018).



Fuente: (Living Machine, 2018)

Las ventajas de Living Machines son:

- Es capaz de lograr un tratamiento terciario

- Su costo de operación es menor que el de un sistema de tratamiento primario convencional
- No requiere químicos que son perjudiciales para el medio ambiente
- Cumple con los límites que estipula la EPA

Actualmente este sistema solo es vendido por Living Machine, Inc. Ubicado en Nuevo México para escuelas, edificios de gobierno, entre otros desarrollos de los Estados Unidos.

REFERENCIAS

- Borrero, J. (1999). *Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales*. Barcelona, España: Instituto Catalán de Tecnología.
- Brix, H. (1994). Functions of Macrophytes in Constructed Wetlands. *Water Sci. Technol*, 71-78.
- Buenfil, J. (2009). *Adaptación a los Impactos del Cambio Climático en los Humedales Costeros del Golfo de México*. Ciudad de México: SEMARNAT.
- César, E., & Vázquez, A. (2003). *Ingeniería de los Sistemas de Tratamiento y Disposición de aguas residuales*. Ciudad de México: Fundación ICA.
- CNA, & IMTA. (2005). *Serie Autodidáctica de Medición de la Calidad del Agua: Inspección de Fosas Sépticas y Letrinas*. Ciudad de México.
- CONAGUA. (2007). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*. Ciudad de México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Crites, R., Middlebrooks, E., Bastian, R., & Reed, S. (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*. Florida: IWA Publishing.
- De León, J. (2011). *Estabilización y Deseccación de Lodos en Fosas Sépticas en un Humedal Artificial*. Ciudad de México: UNAM.
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de Aguas Residuales por Medio de Humedales Artificiales*. Cochamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA).
- Guido, A. (2006). *Estudios de los Potenciales de Óxido Reducción en Reactores Biológicos que Simulan un Humedal Artificial*. Ciudad de México: UNAM.
- Hammer, D. (1989). *Constructed Wetlands for Wasterwater Treatment: Municipal, Industrial and Agricultural*. Lewis Publishers, Inc.
- Hernández, J., Pérez, M., Domínguez, E., & Cachaldora, I. (2012). Humedal Subsuperficial Vertical para el Tratamiento de Aguas Residuales: Diseño, Construcción y Evaluación. *Revista Cubana de Química*, 147-154.
- Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M., & von Muech, E. (2011). *Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*. Eschborn: Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, GIZ .

- Living Machine, I. (19 de febrero de 2018). *Living Machine Water Treatment and Reuse*. Obtenido de Living Machine Water Treatment and Reuse: <http://www.livingmachines.com/Home.aspx>
- Llagas, W., & Guadalupe, E. (2006). Diseño de Humedales Artificiales para el Tratamiento de Aguas Residuales en la UNMSM. *Revista del Instituto de Investigación del FIGMMG*, 85-96.
- Molle, P., Liégnard, A., Boutin, C., Merlin, G., & Ivema, A. (2005). How to treat raw sewage with constructed wetlands, an overview of the French system. *Water Science and Technology*, 11-21.
- Montiel, P. (2014). *Humedal Artificial*. Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Moshiri, G. (1993). *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*. EEUUA: Lewis Publishers.
- OPS/OMS. (2005). *Guía para el Diseño de Tanques Sépticos, Tanques Imhoff y Lagunas de Estabilización*. Perú: COSUDE.
- Reyes, J., Laines, J., & Díaz, R. (2011). Caracterización y Propuesta de Tratamiento de las Aguas Residuales Generadas en la División Académica de Ciencias Biológicas-UJAT. *Kuxulkab*, 61-70.
- Rodríguez, A. (2017). *Diseño de un Humedal Artificial para el Municipio Arcos de las Salinas (Teruel)*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- SMN, S. M. (10 de Febrero de 2018). *Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia*. Obtenido de Resúmenes Mensuales de Temperaturas y Lluvia: <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>