



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON
HUMEDALES ARTIFICIALES EN TLAPANALOYA,
MUNICIPIO DE TEQUISQUIAC, ESTADO DE
MÉXICO**

Juan Uriel Avelar Roblero

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

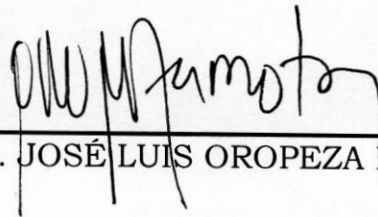
2011

La presente tesis titulada: TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON HUMEDALES ARTIFICIALES EN TLAPANALOYA, MUNICIPIO DE TEQUISQUIAC, ESTADO DE MÉXICO, realizada por el alumno: JUAN URIEL AVELAR ROBLERO bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

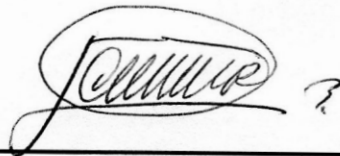
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



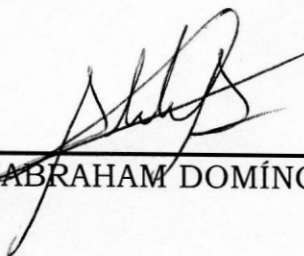
DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA

ASESOR



M.C. JOSÉ DONALDO RÍOS BERBER

ASESOR



M.C. ABRAHAM DOMÍNGUEZ ACEVEDO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2011

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por ser la fuente de financiamiento durante mi estancia en la maestría.

Al Colegio de Postgraduados, por aceptarme como estudiante en esta gran Institución.

Al Consejo Particular que dirigió la presente tesis: Dr. José Luis Oropeza Mota, M.C. José Donald Ríos Berber, M.C. Abraham Domínguez Acevedo.

A la Comisión Nacional del Agua y la Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación, por facilitar información relevante para el desarrollo de esta investigación.

A la M.C. Maricela Arteaga Mejía de la Universidad Nacional Autónoma de México y el Dr. Jaime Lara Borrero de la Pontificia Universidad Javeriana de Colombia por su incondicional apoyo para llevar a buen término este trabajo.

Este trabajo se lo dedico:

A Dios, que me ha dado la vida y una infinidad de razones para lograr mis objetivos

A mi esposa de quien he recibido apoyo día con día en todos los ámbitos de mi vida

A mi hijo que ha sido una fuente de motivación y amor para superar hasta los obstáculos que parecen imposibles

A mi padre por la constante lucha que ha tenido que librar y el esfuerzo realizado para dar siempre apoyo a sus seres queridos

Especialmente a mi madre que con su ejemplo me ha enseñado la manera de ser mejor cada día, por su fe inquebrantable, su fuerza y tenacidad, virtudes que le han ayudado y estoy seguro que le ayudarán a superar los obstáculos más difíciles

A mis hermanos que siempre han sido un apoyo emocional importante

A los amigos que siempre me han motivado a perseverar, y que me han brindado apoyo en todo momento

**TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON HUMEDALES
ARTIFICIALES EN TLAPANALOYA, MUNICIPIO DE TEQUISQUIAC,
ESTADO DE MÉXICO**

Juan Uriel Avelar Roblero, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2011

RESUMEN

La presente tesis tiene como objeto proponer, mostrar y validar una alternativa basada en el uso y acondicionamiento de humedales artificiales, para resolver el problema de salud pública y contaminación ambiental que genera la descarga de aguas residuales. El campo de estudio y evaluación fue la cabecera municipal de Hueypoxtla, Estado de México, cuyas aguas residuales vierten directamente al cauce del Río Salado, el cual cruza por la comunidad de Tlapanaloya, municipio de Tequisquiác, Estado de México.

Además de realizar el diseño, se construyó el tren de tratamiento que incluye: pretratamiento mediante un desarenador y sedimentador preliminar; tratamiento primario mediante un sistema modificado de tanque Imhoff y el tratamiento secundario utilizando 6 celdas de humedales artificiales.

Para efectuar un diseño óptimo en eficiencia de tratamiento y facilidad de operación se realizó una investigación bibliográfica detallada y se adecuaron algunos procesos a las condiciones climáticas que prevalecen en el área de trabajo. Finalmente, el sistema se diseñó y se construyó para un gasto de 4.5 L s^E, utilizando una superficie total de 2,520 m². La especie vegetal recomendada fue *Zantedeschia aethiopica* (alcatraz), la cual reporta beneficios económicos adicionales por ser una planta de ornato.

Palabras clave: salud pública, contaminación ambiental, humedales artificiales, diseño, construcción.

**TREATMENT WASTEWATER BY CONSTRUCTED WETLAND, AT
TLAPANALOYA, TEQUISQUIAC, STATE OF MÉXICO**

Juan Uriel Avelar Roblero, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2011

ABSTRACT

This aim of this thesis was to propose, show and validate an alternative, based on the use an implementation of constructed wetlands to solve the problem of public health and pollution generated by the wastewater discharge from the drainage of Hueypoxtla, State of Mexico, which discharged directly into the riverbed Salado, and cross Tlapanaloya community, municipality Tequisquiac, State of Mexico.

Besides the design, built the treatment train includes: preEtreatment using a sand trap and settling preliminary, primary treatment by a modified Imhoff tank and secondary treatment using six cells of constructed wetlands.

To design optimal treatment efficiency and ease of operation, it was conducted a detailed literature search and some processes were adapted to the climatic conditions prevailing in the work area. Finally, the system was designed and built for 4.5 L s^{-1} , using a total area of $2,520 \text{ m}^2$. The recommended plant species was *Zantedeschia aethiopica* (Alcatraz), which brings additional benefits for being an ornamental plant.

Palabras clave: public health, pollution, constructed wetlands, design, built.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
2	JUSTIFICACIÓN	3
3	OBJETIVOS	4
3.1	OBJETIVO GENERAL	4
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
4	HIPÓTESIS	5
5	REVISIÓN DE LITERATURA	6
5.1	AGUAS RESIDUALES	6
5.1.1	AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES	7
5.1.2	AGUAS RESIDUALES URBANAS	9
5.1.3	AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO	26
5.2	IMPORTANCIA DE LOS HUMEDALES NATURALES	33
5.2.1	LOS HUMEDALES COMO SISTEMAS NATURALES DE DEPURACIÓN	34
5.3	LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	38
5.3.1	EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL USO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	39
5.3.2	PRINCIPALES MECANISMOS DE DEPURACIÓN EN LOS HUMEDALES	45
5.4	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL	54
5.4.1	PLANEACIÓN	55
5.4.2	SELECCIÓN DEL SITIO	57
5.4.3	ASPECTOS HIDROLÓGICOS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	59

5.4.4 COMPONENTES BÁSICOS EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO CON HUMEDALES ARTIFICIALES	63
5.4.5 DISEÑO DEL PRETRATAMIENTO	67
5.4.6 DISEÑO DEL TRATAMIENTO PRIMARIO	70
5.4.7 DISEÑO DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO	72
6 MATERIALES Y MÉTODOS	86
6.1 ANÁLISIS CLIMÁTICO	87
6.2 ANÁLISIS DEMOGRÁFICO	90
6.3 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA	91
6.4 GASTO DE DISEÑO	92
7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	95
7.1 RESULTADOS	95
7.1.1 ESTRUCTURAS DE PRETRATAMIENTO	96
7.1.2 ESTRUCTURAS DE TRATAMIENTO PRIMARIO	99
7.1.3 ESTRUCTURAS DE TRATAMIENTO SECUNDARIO	102
7.1.4 CATÁLOGO DE CONCEPTOS GENERAL	113
8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
9 LITERATURA CITADA	117

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Clasificación de aguas residuales por su nivel de concentración de contaminantes	13
Cuadro 2.	Contaminantes de interés en el tratamiento de aguas residuales	18
Cuadro 3.	Efectos causados por los contaminantes presentes en aguas residuales	19
Cuadro 4.	Carga diaria de contaminantes promedio por persona	21
Cuadro 5.	Concentraciones de desechos en aguas residuales domésticas	21
Cuadro 6.	Análisis de aguas residuales domésticas realizado por la American Public Health Association.	22
Cuadro 7.	Descargas de aguas residuales municipales y no municipales en México.	27
Cuadro 8.	Principales procesos de tratamiento de aguas residuales.	30
Cuadro 9.	Calendario establecido en la NOME001ESEMARNATE1996	32
Cuadro 10.	Principales procesos que realizan el tratamiento del agua en un humedal artificial	46
Cuadro 11.	Valores recomendados de los parámetros de diseño de fosas sépticas:	72
Cuadro 12.	Parámetros indicativos para el diseño de HFSS	73
Cuadro 13.	Características de sustratos para la construcción de humedales artificiales	74
Cuadro 14.	Características típicas de especies vegetales para HFSS	74

Cuadro 15. Propiedades físicas del agua	83
Cuadro 16. Características típicas de los medios para humedales de flujo subsuperficial	84
Cuadro 18. Parámetros de diseño del humedal y sus componentes	95
Cuadro 19. Medidas de la estructura de tratamiento primario	97
Cuadro 20. Medidas para la construcción de las cámaras de sedimentación	101
Cuadro 21. Medidas de las celdas de mantenimiento del tratamiento secundario	105
Cuadro 22. Medidas del dispositivo de distribución del agua	107
Cuadro 23. Parámetros de diseño de la primera fase de las celdas de tratamiento secundario	109
Cuadro 24. Parámetros de diseño de la segunda fase o fase de refinación de las celdas de tratamiento secundario	109
Cuadro 25. Catálogo de conceptos general del tren de tratamiento	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema de las características cualitativas de aguas residuales urbanas.	16
Figura 2.	Mecanismos de transporte de contaminantes	24
Figura 3.	Incidencia de la precipitación en el transporte de las aguas residuales	26
Figura 4.	Comparativa de plantas de tratamiento por Entidad Federativa en México	28
Figura 6.	Cobertura de tratamiento de aguas residuales por entidad federativa (m ³ anuales por habitante).	29
Figura 7.	Funciones y beneficios de los humedales naturales. Fuente: WEF, 1992	35
Figura 8.	Componentes básicos del balance de masas en el humedal	61
Figura 9.	Área de captación de escurrimientos en un sistema de pantanos artificiales	62
Figura 10.	Ubicación del sitio de construcción del humedal	86
Figura 11.	Climograma de la estación Tlapanaloya	87
Figura 12.	Déficit climático en Tlapanaloya, municipio de Tequisquiac.	88
Figura 13.	Crecimiento poblacional del año 2005E2010, y su proyección al 2030.	90
Figura 14.	Proyección de la tasa de crecimiento poblacional del año 2006 al 2030.	91

Figura 15.	Distribución del volumen de descarga de agua residual obtenido mediante aforo directo en el afluente del proyecto	93
Figura 16.	Vista en planta de la estructura de tratamiento primario	97
Figura 17.	Rejilla de acero colocada a la entrada del pretratamiento	98
Figura 18.	Estructura construida para el pretratamiento	98
Figura 19.	Vista tridimensional de la cámara de sedimentación	100
Figura 20.	Vista en planta de una de las cámaras de sedimentación (unidades en metros)	100
Figura 21.	Perfil de la cámara de sedimentación o fosa séptica	101
Figura 22.	Vista superficial de la estructura de tratamiento primario	102
Figura 23.	Diseño de la celda de mantenimiento del tratamiento secundario	104
Figura 24.	Celdas de mantenimiento	105
Figura 25.	Dispositivo de distribución del agua	106
Figura 26.	Dispositivo de distribución del agua a los humedales	107
Figura 27.	Distribución esquemática de las seis celdas de tratamiento secundario	108
Figura 28.	Vista general de las celdas de tratamiento secundario	110
Figura 29.	Panorámica general del tren de tratamiento	111
Figura 30.	Plantación de alcatraz (<i>Zantedeschia aethiopica</i>)	112
Figura 31.	Crecimiento natural de tule (<i>Typha latifolia</i>)	113

1 INTRODUCCIÓN

La falta de tratamiento de aguas residuales, también señalada como “aguas negras” es uno de los principales problemas que afectan a la mayoría de los países subdesarrollados. En los países de América Latina, El Caribe, África y Asia en algunos casos no se alcanza un 10% de depuración del agua residual, caso contrario, en los países de América del Norte, Europa y Australia, que es donde se trata la mayor parte de aguas residuales.

Con la descarga sin tratamiento del agua residual, no solo se ve afectada la salud de millones de personas, sino que también se afecta el clima y los ecosistemas en general, por las emisiones de metano que contribuyen al calentamiento global. Particularmente en la población expuesta a las descargas de agua residual puede ocasionar múltiples perjuicios. Las aguas negras de origen doméstico contienen grandes cantidades de coliformes fecales que pueden llegar a infectar a los seres humanos que se encuentran en sus cercanías, al ingerir o tocar el agua contaminada o simplemente a través de animales vectores que llegan a estar en contacto con el agua. Las aguas residuales de origen industrial generalmente contienen productos tóxicos como el plomo, cromo, o productos radiactivos que pueden provocar daños en la población circundante.

Con frecuencia los planes de desarrollo urbano en su rubro de saneamiento, son relegados a último lugar, y estos se limitan a garantizar el desalojo de las aguas residuales, canalizándola a ríos, arroyos y barrancas, sin prestar atención a la calidad de dichas aguas y el afecto adverso de las mismas. Por no realizar las inversiones necesarias en tratamiento de agua y planes de saneamiento en general, se termina pagando por costos de salud, ecosistemas deteriorados, plantas y animales en peligro de extinción, y otros costos indirectos que la contaminación provoca en los ecosistemas naturales.

Por los altos costos de construcción, operación y mantenimiento de las plantas convencionales de tratamiento, actualmente en México se trata alrededor del 35% del volumen total de aguas residuales municipales (CONAGUA, 2011). Por esta razón, para realizar el tratamiento de aguas residuales en zonas rurales, una alternativa que ha empezado a cobrar importancia, es el uso de sistemas ecológicos de tratamiento, entre ellos los humedales artificiales, que son sistemas de bajo costo, altamente eficientes en la remoción de contaminantes y fácilmente adaptables a los ecosistemas naturales. Además, son sistemas que requieren mínima operación y mantenimiento, no usan productos químicos en los procesos de depuración y pueden ser atendidos por personas de la misma localidad, con una capacitación previa. Con este proyecto, se pretende proponer, mostrar y demostrar una alternativa eficiente ecológica y económica en el tratamiento del agua residual, y en segundo lugar formar un grupo de trabajo comunitario que haga partícipes a las personas mediante la plantación de especies ornamentales como el alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) dentro del mismo humedal, la cual puede agregar beneficios económicos al proyecto. Adicionalmente, el efluente obtenido puede ser utilizado en el riego de cultivos básicos de las parcelas aledañas al humedal.

2 JUSTIFICACIÓN

El problema que se atiende con el presente trabajo, tiene que ver con la descarga de agua residual al aire libre y los efectos negativos que conlleva, sociales, económicos y ambientales, en el municipio de Tequisquiac, Estado de México. El agua proviene directamente del drenaje de la cabecera municipal de Hueypoxtla, Estado de México. Desde que se construyó la infraestructura de drenaje en la cabecera municipal de Hueypoxtla, la descarga de aguas negras se realiza en el cauce del Río Salado, el cual pasa por terrenos que son parte del municipio de Tequisquiac, poniendo en riesgo la salud de la población cercana a la descarga. Los malos olores, la contaminación ambiental y los riesgos a la salud de la población, son argumentos suficientes para realizar la depuración del agua residual. Una planta de tratamiento de $4.5 \text{ L s}^{\text{E1}}$ requiere una fuerte inversión y demanda gastos constantes por energía eléctrica, operación, manejo, mantenimiento e insumos, los cuales no podrían ser sufragados por el H. Ayuntamiento. Lo anterior justifica la construcción de un sistema eficiente, económico, de mínima operación y amigable con el medio ambiente natural, como son los humedales artificiales.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

1. Proponer, diseñar y construir un sistema alternativo de tratamiento de agua residual utilizando humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, para minimizar los riesgos sanitarios y la contaminación ambiental en la comunidad de Tlapanaloya, municipio de Tequisquiatic, Estado de México.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar un estudio general de las características del agua residual descargada, del área destinada para las construcciones, del clima y del crecimiento demográfico de la población involucrada.
2. Realizar el diseño general del tren de tratamiento siguiendo la metodología de Kadlec, modificada para las condiciones climáticas de la zona de estudio y utilizando 3 fases de tratamiento: pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario.
3. Minimizar el riesgo sanitario y la contaminación ambiental en la comunidad de Tlapanaloya, municipio de Tequisquiatic, Estado de México, mediante el diseño y la construcción de un humedal artificial de flujo subsuperficial horizontal, para tratar el agua residual vertida en el cauce del Río Salado.

4 HIPÓTESIS

1. Los humedales artificiales son sistemas eficientes y económicos para el tratamiento de agua residual, que no dañan ni alteran el medio ambiente natural donde se construyen.
2. La construcción de un sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales, incluyendo las etapas preliminares de depuración, resulta más económica que un sistema de tratamiento convencional.

5 REVISIÓN DE LITERATURA

Los humedales artificiales tienen fundamento científico en el funcionamiento de los humedales naturales. Los procesos físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo dentro de un humedal natural son capaces de depurar casi cualquier tipo de contaminante en el agua, pero son incapaces de depurar cualquier concentración de contaminantes. Durante miles de años, la naturaleza ha creado soluciones eficientes para toda clase de problemas complejos del mundo real y la contaminación del agua es uno de ellos, siempre y cuando se generen las condiciones idóneas para el desarrollo de la vegetación, los microorganismos, y los demás componentes. Para ello, actualmente se desarrollan metodologías para el diseño de sistemas de humedales artificiales, adecuados para cada tipo y cantidad de descargas de agua residual.

Para desarrollar un diseño de tratamiento mediante humedales artificiales, es necesario conocer a detalle el funcionamiento de los humedales naturales, con todos los procesos que se llevan a cabo dentro de ellos. Cuando los componentes son confinados a un área de menor tamaño en un humedal artificial de flujo subsuperficial, los procesos son alterados y se requiere de cálculos precisos que garanticen un buen funcionamiento del tren de tratamiento. Además, es necesario conocer las características generales del agua residual porque mediante su estudio y análisis se pueden modificar sus características, convirtiendo las sustancias contaminantes en sustancias inocuas.

5.1 AGUAS RESIDUALES

Las actividades humanas por naturaleza generan residuos, tanto líquidos como sólidos y en forma de gases. Las aguas residuales están constituidas

por una fracción líquida y por una fracción sólida. La parte líquida es esencialmente el agua de abastecimiento, después de haber sido contaminada por los usos a los que ha sido sometida. La parte sólida a la que comúnmente se le llama “lodos”, está conformada principalmente por materia orgánica, dependiendo del tipo de agua residual.

Las aguas residuales por su origen se clasifican en aguas residuales industriales y aguas residuales urbanas.

5.1.1 AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES

La industria genera en México alrededor de 160 m³ s^{E1} de agua residual. Sin embargo, únicamente recibe tratamiento alrededor del 13% (CONAGUA, 2011). Además, el enfoque del tratamiento está dirigido a la eliminación de la materia orgánica sin considerar el abatimiento de la toxicidad. Este aspecto es relevante en ciertos efluentes, como los generados por la industria química orgánica (química, petroquímica, farmacéutica, textil, de los plásticos, de la fabricación de fibras sintéticas, etc.), pues representa cerca del 40% de las aguas residuales industriales. Independientemente de la evidente necesidad del tratamiento de las aguas residuales con fines ecológicos, para México es de vital importancia tratar las aguas residuales industriales con fines de reúso (Buitrón, 2006).

Las aguas residuales industriales se definen como “todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para efectuar cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial”. Los compuestos orgánicos e inorgánicos se encuentran en aguas residuales procedentes de instalaciones industriales diversas. A diferencia de las aguas residuales domésticas, los efluentes industriales contienen con frecuencia sustancias que no se eliminan por un tratamiento

convencional, ya sea por estar en concentraciones elevadas, o por su naturaleza química. Muchos de los compuestos orgánicos e inorgánicos que se han identificado en aguas residuales industriales son objeto de regulación especial debido a su toxicidad o a sus efectos biológicos a largo plazo. La gran variedad de procesos industriales genera un amplio abanico de efluentes, que requiere en cada caso una investigación individual y frecuentemente un proceso de tratamiento específico. Además, es necesario conocer el sistema de producción de la industria en concreto y los sistemas de organización de los procesos involucrados. Hay tres tipos más comunes de efluentes industriales a considerar:

1. Efluentes de los procesos generales de fabricación. La mayoría de procesos aumentan la contaminación de los efluentes por el contacto que tienen con gases, líquidos o sólidos. Los efluentes pueden ser continuos o intermitentes. Generalmente la producción de aguas residuales es continua, produciendo flujos de contaminantes conocidos. Sin embargo, para determinados sectores (química sintética, farmacéutica, etc.) es muy difícil analizar los efluentes, ya que cambian constantemente, en este caso los efluentes se consideran intermitentes.
2. Efluentes específicos. Algunos efluentes son separados de corrientes específicas del proceso, por ejemplo:
 - Baños de electroplatinado, sosa cáustica gastada, licores de amonio de plantas de carbón.
 - Condensados de la producción de papel, líquidos madres de la industria alimentaria.
 - Efluentes tóxicos y concentrados
3. Efluentes intermitentes. Son efluentes que pueden provenir de vertidos accidentales de productos, durante su manejo o almacenamiento.

Las descargas residuales industriales pueden ser tratadas mediante sistemas alternativos, incluyendo humedales artificiales. A pesar de que los métodos y procesos para tratar las aguas residuales industriales son similares a los utilizados para tratar las domésticas o municipales, hay una gran diferencia: las plantas utilizadas en la fitodepuración de aguas residuales industriales pueden estar peligrosamente contaminadas con sustancias tóxicas, por lo que su disposición final debe ser segura, no pueden utilizarse para compostas ni ser diseminadas en terrenos de cultivo. Estas plantas podrían utilizarse para la producción de biogás, sin embargo, surge el problema de la disposición de los lodos contaminados. La única solución aceptable sería la extracción química de los tóxicos concentrados en las plantas o de los lodos, aunque esto representa una inversión económica adicional.

5.1.2 AGUAS RESIDUALES URBANAS

Las aguas residuales urbanas son aquellas provenientes de los núcleos urbanos y que han sido utilizadas en inodoros, fregaderos, lavadoras, etc., y que además pueden contener algún residuo de los arrastres pluviales y en algunos casos, de pequeñas actividades industriales urbanas (Seoanez, 1999). Las aguas residuales urbanas se diferencian en función de los tipos de vertidos que las componen.

Así, se pueden desglosar en:

Aguas domiciliarias. Se pueden a su vez subdividir en aguas de cocina, con sales, materia orgánica y sólidos, aguas de baño, con jabones y productos de limpieza, y aguas de lavado de locales, con jabones, arenas y papel.

Aguas negras. Transportan la defecación humana y contienen residuos fecales del orden de 100 a 250 gramos por habitante y día, con gran cantidad de microorganismos aerobios y anaerobios.

Aguas de limpieza pública y riego. Se caracterizan en función de su procedencia de abastecimiento y contiene materiales sólidos de arrastre así como elementos fertilizantes de parques y jardines.

Aguas pluviales. Aunque en origen se trate de un agua pura, su paso por áreas urbanas o industriales altera enormemente su composición.

5.1.2.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS

TEMPERATURA

Suele ser un parámetro bastante uniforme a lo largo de los años. Por poner un ejemplo, la literatura reporta que en España, la temperatura del agua residual suele oscilar entre los 15 °C en invierno y los 20 °C en verano (Seoanez, 2009).

OLOR

Teóricamente, el agua residual no debería presentar olor alguno. Si se producen olores desagradables es síntoma de que los procesos de putrefacción han comenzado, ya sea por distancias o tiempos de transporte largos de las aguas residuales.

COLOR

Debe ser gris con sólidos en suspensión o flotantes fácilmente reconocibles. Con el paso del tiempo el color se torna más negro y los sólidos son menos reconocibles y se denominan en estas condiciones aguas sépticas.

SÓLIDOS

Los sólidos totales lo compone el residuo seco resultante de evaporar toda el agua, independientemente de su naturaleza y son la suma de los sólidos en

suspensión, aquellos que retiene el papel filtro, más los sólidos disueltos, que lo atraviesan. Los sólidos en suspensión se reparten, a su vez, en sedimentables, capaces de separarse del agua residual por sedimentación, y no sedimentables, los coloides. El contenido promedio de sólidos totales en las aguas residuales urbanas es de 0,1%. De ellos, el 80% se puede considerar como sólidos disueltos, un 13% sólidos sedimentables y un 7% coloides, es decir, un total de un 20% de sólidos en suspensión (Otis, 1994).

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica indica el contenido en sales disueltas en el agua. El uso doméstico de las aguas suele elevar su conductividad a valores de entre 1,000 y 2,000 VSiemens $\text{cm}^{\text{E}1}$. La medida de la conductividad es útil para establecer la posible infiltración de agua marina o para evaluar el uso de las aguas depuradas en riego y otros usos afines (Tebbutt, 1994).

5.1.2.2 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS

MATERIA ORGÁNICA

Es una de las características fundamentales de las aguas residuales por su impacto en el medio y el uso posterior de las aguas. Las medidas más habituales de materia orgánica son la Demanda Biológica de Oxígeno a los cinco días (DBO_5) y la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

La DBO_5 representa la cantidad de oxígeno disuelto que se consume en un agua residual durante 5 días a 20°C por efecto de la oxidación biológica de la materia orgánica biodegradable presente en dicho agua residual. La oxidación se efectúa por los propios microorganismos presentes en el agua. Es decir, reproduce el consumo de oxígeno que se ocasionaría con ese vertido en el medio natural. Las aguas residuales urbanas presentan valores de

DBO₅ que oscilan entre 100 y 300 mg L^{E1}. La DQO estima el oxígeno necesario para oxidar químicamente toda la materia orgánica contenida en la muestra de agua. Dado que por medios químicos la oxidación es más completa que en el caso anterior, los valores de DQO suelen ser mayores que los de la DBO₅. Para el caso de las aguas residuales urbanas la relación entre la DBO₅ y la DQO suele ser alrededor de 0.5, es decir, la DQO suele ser doble que la DBO₅. Las aguas residuales urbanas presentan valores de DQO que oscilan entre 150 y 800 mg L^{E1}(Zalewski, 2004).

5.1.2.3 CARACTERÍSTICAS BIOLÓGICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS

Por sus altas concentraciones en materia orgánica, el agua residual presenta altas concentraciones de organismos patógenos. Las bacterias se utilizan como indicadores de contaminación fecal en las aguas, siendo la más utilizada la *Escherichia coli*. Una persona adulta puede excretar diariamente hasta 2,000,000,000 de bacterias coliformes al día. Destaca la presencia también de salmonelas y el *Vibrio cholerae*, causante del cólera. Finalmente, también aparecen protozoos y parásitos como lombrices. El contenido medio de coliformes totales en las aguas residuales oscila entre las 10⁶ y las 10⁹ colonias/100 ml y el de estreptococos fecales entre las 10⁴ y las 10⁷ colonias /100 ml. En muchos casos, el tratamiento de las aguas residuales tiene un efecto pequeño en la eliminación de estos patógenos y sólo son útiles cuando transcurre el tiempo necesario para que se produzca la muerte del organismo. En general y en función del origen y mezcla de las aguas urbanas, de las costumbres de la población, de la presencia de áreas industriales con vertidos a la red de alcantarillado y del régimen de lluvias, principalmente, la composición de las aguas residuales urbanas es muy variable (APHA, 1981). En función de los diferentes parámetros de calidad, éstas (las aguas residuales urbanas) se subdividen, de forma genérica, en

aguas con concentraciones débiles, medias o fuertes, según se indica en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de aguas residuales por su nivel de concentración de contaminantes

Parámetros	Contaminación		
	Fuerte	Media	Baja
Sólidos totales	1,000	500	200
Volátiles	700	350	120
Fijos	300	150	80
Sólidos en suspensión	500	300	100
Volátiles	400	250	70
Fijos	100	50	30
Sólidos sedimentables	250	180	40
Volátiles	100	72	16
Fijos	150	108	24
Sólidos disueltos	500	200	100
Volátiles	300	100	50
Fijos	200	100	50
DBO _{5a} 20°C	300	200	100
DQO	800	450	160
Oxígeno disuelto	0	0.1	0.2
Nitrógeno total	86	50	25
Nitrógeno orgánico	35	20	10
Amoniaco libre (NENH ₃)	50	30	15
Nitritos (NENQ)	0.1	0.05	0
Nitratos (NENQ ₃)	0.4	0.2	0.1
Fósforo total (P)	17	7	2
Cloruros (Cl)	175	100	15
pH	6.9	6.9	6.9
Grasas	40	20	0
Todos los valores están en mg L ^{E1} , a excepción del pH.			

Fuente: Fresenius, 1991

Las aguas residuales urbanas típicas tienen componentes normalmente fácilmente separables o biodegradables, como sólidos, materia orgánica, aceites y grasas y no suelen presentar sustancias peligrosas. Los volúmenes generados por habitante son variables dependiendo del tamaño de la

población y época del año. Por lo general, las pequeñas comunidades tienen consumos por habitante inferiores a los grandes núcleos, pero con vertidos más concentrados.

Las zonas turísticas presentan el problema de una fuerte estacionalidad en la producción de aguas residuales, con la consiguiente dificultad a la hora de dimensionar las estaciones de tratamiento.

Los contaminantes en las aguas residuales son normalmente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos. Normalmente no es muy práctico obtener un análisis completo de la mayoría de las aguas residuales. Por esta razón, se han desarrollado una serie de métodos empíricos para evaluar la concentración de contaminantes en las aguas residuales, cuya aplicación no requiere un conocimiento completo de la composición química específica de las aguas residuales consideradas. Existen dos tipos de impurezas en el agua: aquellas que se encuentran suspendidas y las que están disueltas. El material suspendido son partículas grandes que se sostienen en el agua debido a fuerzas de viscosidad. El material disuelto lo componen las moléculas o iones que se retienen en el agua debido a su estructura molecular.

Los componentes encontrados en las aguas residuales pueden ser clasificados como físicos, químicos y biológicos. Existen cinco características físicas esenciales en el agua residual que pueden ser fácilmente percibidas por los sentidos:

Sólidos

Gases disueltos

Turbiedad

Color

Temperatura

En las aguas residuales se encuentran todo tipo de sólidos, distinguiéndose entre ellos orgánicos e inorgánicos. Los sólidos orgánicos son sustancias que contienen carbón, hidrógeno y oxígeno, pudiendo alguno de estos elementos combinarse nitrógeno, azufre o fósforo. Los principales grupos los conforman las proteínas, los carbohidratos y las grasas, susceptibles todos de ser degradados por medio de bacterias y de organismos vivos que son combustibles, es decir, pueden ser quemados. Los sólidos inorgánicos son sustancias inertes y no susceptibles de ser degradados, designándoseles comúnmente como minerales. Dentro de estos se incluyen arenas, aceites y sales minerales disueltas en el agua potable y sin propiedades combustibles.

Aquellas partículas orgánicas, inorgánicas o líquidos inmiscibles que se encuentran en el agua. Algunos sólidos orgánicos pueden ser arcillas, limos u otros componentes del suelo. De la misma manera, pueden ser encontrados sólidos orgánicos como restos de plantas y microorganismos. Sumados a estos sólidos naturales, existen grandes cantidades de sólidos en suspensión orgánicos e inorgánicos, producto de los procesos industriales y domésticos, así como también líquidos inmiscibles como aceites y grasas.

Las aguas residuales domésticas están constituidas, en un elevado porcentaje (en peso) por agua, cerca de 99.9 % y apenas 0.1 % de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos (Figura 1). Esta pequeña fracción de sólidos es la que presenta los mayores problemas en el tratamiento y su disposición. El agua es apenas el medio de transporte de los sólidos. El agua residual está compuesta de componentes físicos, químicos y biológicos. Es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos en el agua (Otis, 1994).

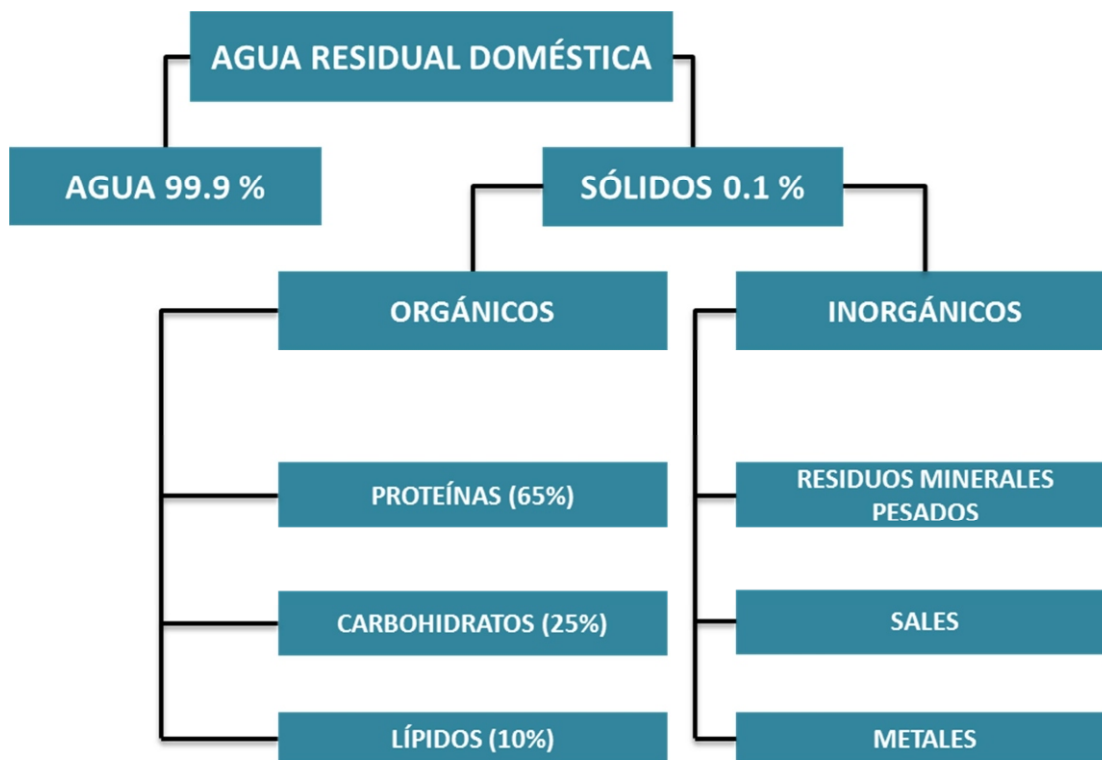


Figura 1. Esquema de las características cualitativas de aguas residuales urbanas.

La mayor parte de la materia orgánica consiste en residuos alimenticios, heces, material vegetal, sales minerales, materiales orgánicos y materiales diversos como jabones y detergentes sintéticos. Las proteínas son el principal componente del organismo animal, pero también están presentes también en los vegetales. El gas sulfuro de hidrógeno presente en las aguas residuales proviene del Azufre de las proteínas. Los carbohidratos son las primeras sustancias degradadas por las bacterias, con producción de ácidos orgánicos (por esta razón, las aguas residuales estancadas presentan una mayor acidez). Entre los principales ejemplos se pueden citar los azúcares, el almidón, la celulosa y la lignina (madera).

Los lípidos (aceites y grasas) incluyen gran número de sustancias que tienen, generalmente, como principal característica común la insolubilidad en agua,

pero son solubles en ciertos solventes como cloroformo, alcoholes y benceno. Están siempre presentes en las aguas residuales domésticas, debido al uso de manteca, grasas y aceites vegetales en cocinas. Pueden estar presentes también bajo la forma de aceites minerales derivados de petróleo, debido a contribuciones no permitidas (de estaciones de servicio, por ejemplo), y son altamente indeseables, porque se adhieren a las tuberías, provocando su obstrucción.

Las grasas no son deseables, ya que provocan mal olor, forman espuma, inhiben la vida de los microorganismos, provocan problemas de mantenimiento, etc. La materia inorgánica presente en las aguas residuales está formada principalmente de arena y sustancias minerales disueltas. El agua residual también contiene pequeñas concentraciones de gases disueltos. Entre ellos, el más importante es el oxígeno proveniente del aire que eventualmente entra en contacto con las superficies del agua residual en movimiento.

Además, del Oxígeno, el agua residual puede contener otros gases, como dióxido de Carbono, resultante de la descomposición de la materia orgánica, nitrógeno disuelto de la atmósfera, sulfuro de hidrógeno formado por la descomposición de compuestos orgánicos, gas amoníaco y ciertas formas inorgánicas del Azufre. Estos gases, aunque en pequeñas cantidades, se relacionan con la descomposición y el tratamiento de los componentes del agua residual.

Los contaminantes importantes de interés en el tratamiento de las aguas residuales se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Contaminantes de interés en el tratamiento de aguas residuales

Contaminante	Motivo de su importancia
Sólidos suspendidos	Los sólidos suspendidos pueden llevar al desarrollo de depósitos de lodos y condiciones anaerobias, cuando los residuos no tratados son volcados en un ambiente saturado.
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente de proteínas, carbohidratos y grasas, por lo general, se mide en términos de DBO ₅ y DQO. Si es descargada sin tratamiento al medio ambiente, su estabilización biológica puede llevar al consumo del Oxígeno natural y al desarrollo de condiciones sépticas.
Microorganismos patógenos	Los organismos patógenos existentes en las aguas residuales pueden transmitir enfermedades.
Nutrientes	Tanto el Nitrógeno como el Fósforo, junto con el Carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando son lanzados en el ambiente acuático, pueden llevar al crecimiento de la vida acuática indeseable. Cuando son lanzados en cantidades excesiva en el suelo, pueden contaminar también el agua subterránea
Contaminantes importantes	Compuestos orgánicos e inorgánicos seleccionados en función de su conocimiento o sospecha de carcinogenicidad, mutanogenicidad, teratogenicidad o elevada toxicidad. Muchos de estos compuestos se encuentran en las aguas residuales
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento de aguas residuales. Ejemplos típicos incluyen detergentes, pesticidas agrícolas, etc.
Metales pesados	Los metales pesados son normalmente adicionados a los residuos de actividades comerciales e industriales, debiendo ser removidos si se va a usar nuevamente el agua residual.
Sólidos inorgánicos disueltos	Componentes inorgánicos como el calcio, sodio y sulfato son adicionados a los sistemas domésticos de abastecimiento de agua, debiendo ser removidos si se va a reutilizar el agua residual.

Fuente: Escalas, 2006

Los efectos que causan los contaminantes mencionados, tanto en el medio ambiente como en la salud humana, se señalan en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Efectos causados por los contaminantes presentes en aguas residuales

Contaminantes	Parámetro de caracterización	Tipo de efluentes	Consecuencias
Sólidos suspendidos	Sólidos suspendidos totales	Domésticos Industriales	Problemas estéticos Depósitos de lodos Adsorción de contaminantes Protección de patógenos
Sólidos flotante	Aceites y grasa	Domésticos Industriales	Problemas estéticos
Materia orgánica biodegradable	DBO	Domésticos Industriales	Consumo de Oxígeno Mortalidad de peces Condiciones sépticas
Patógenos	Coliformes	Domésticos	Enfermedades transmitidas por el agua
Nutrientes	Nitrógeno Fósforo	Domésticos Industriales	Crecimiento excesivo de algas (eutrofización del cuerpo receptor) Toxicidad para los peces (amonio) Enfermedades en niños por nitratos Contaminación del agua subterránea.
Compuestos no biodegradable	Pesticidas Detergentes Otro	Industriales Agrícolas	Toxicidad (varios) Espumas (detergentes) Reducción de la transferencia de oxígeno (detergentes) No biodegradabilidad Malos olores
Metales pesados	Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn).	Industriales	Toxicidad Inhibición al tratamiento biológico de las aguas residuales Problemas con la disposición de los lodos en la agricultura Contaminación del agua subterránea

Fuente: Fresenius, 1991

La peligrosidad de las aguas residuales domésticas radica en la posible presencia de una población alta de microorganismos patógenos, por ejemplo *Escherichia coli*, las que generalmente son inocuas y suelen estar presentes en los intestinos del ser humano y los animales de sangre caliente, agrupándose en colonias. Estas sirven como indicadores de contaminación fecal. Aproximadamente entre 10^{11} y 10^{13} bacterias coli son evacuadas en las aguas residuales diariamente por persona. El número total de bacterias, incluidos los grupos que se consideran relativamente inofensivos, es casi 10^3 veces mayor (Sánchez, 2004).

Los microorganismos están presentes en las aguas residuales en forma de virus y bacterias (como las salmonellas causantes de la tifoidea o la paratifoidea) y en forma de parásitos como por ejemplo huevos de helmintos. Estos microorganismos provienen de hospitales, de viviendas con personas infectadas, de portadores de enfermedades, etc. El agua residual tratada no es bacteriológicamente pura y, en algunos casos, es necesario esterilizarla, además de aplicarle un tratamiento mecánico – biológico.

Aparte de organismos patógenos, en las aguas residuales domésticas están presentes bacterias no patógenas que descomponen la materia orgánica mediante procesos de hidrólisis, reducción y oxidación. En esta descomposición también participan fermentadores y enzimas. Finalmente, estas aguas contienen también hormonas, estimulantes y vitaminas provenientes de las excretas de las personas y animales.

Los valores de carga de las aguas residuales domésticas mediante un aforo directo puede ser evadido al diseñar una planta de tratamiento. En su lugar, se pueden tomar en cuenta los valores mostrados en el Cuadro 4, en el supuesto de que el consumo diario de agua por persona es de 150 litros. En el Cuadro 5 se muestran las concentraciones promedio de contaminantes en aguas residuales urbanas.

Cuadro 4. Carga diaria de contaminantes promedio por persona

	Total (g d⁻¹)	Orgánico (g d⁻¹)	Inorgánico (g d⁻¹)
Total de desechos	190	110	80
Sustancias disueltas	100	50	50
En suspensión	90	60	30
Sedimentables	60	40	20
No sedimentables	30	20	10

Fuente: Imhoff, 2007

Cuadro 5. Concentraciones de desechos en aguas residuales domésticas

	Total (mg L⁻¹)	Orgánico (mg L⁻¹)	Inorgánico (mg L⁻¹)
Total de desechos	1,260	730	530
Sustancias disueltas	660	330	330
En suspensión	600	400	200
Sedimentables	400	270	130
No sedimentables	200	130	70

Fuente: Imhoff, 2007

Para conocer las posibilidades de uso de las aguas residuales urbanas, su peligrosidad potencial, sus posibles aplicaciones en reciclado de materias, recuperación de productos, recuperación de suelos, etc., es preciso conocer las características de la composición y demás factores que conforman las descargas. La concentración de contaminantes según diversas muestras tomadas en distintas descargas de aguas residuales municipales, se muestran en el Cuadro 6. Estos datos fueron presentados por la American Public Health Association, en 1981.

Cuadro 6. Análisis de aguas residuales domésticas realizado por la American Public Health Association.

Parámetro	Concentración (mg L ⁻¹)		
	alta	media	baja
Sólidos totales	1,000	500	200
EVolátiles	700	350	120
EFijos	300	150	80
Totales en suspensión	500	300	100
EVolátiles	400	250	70
EFijos	200	100	50
Totales disueltos	500	200	100
EVolátiles	300	100	50
EFijos	200	100	50
Sedimentables, ml L ^{E1}	12	8	4
DBO ₅	300	200	100
Consumo de oxígeno	150	75	300
Oxígeno disuelto	0	0	0
Nitrógeno total	85	50	25
EOrgánico	35	20	10
EAmónico	30	30	15
ENitrito	0.1	0.05	0
ENitrato	0.4	0.20	0.1
Cloruros	175	100	15
Alcalinidad (CaCO ₃)	200	100	50
Grasas y aceites	40	20	0

Nota: No se incluyen los sedimentos.

Fuente: APHA, 1981

Dependiendo de las exigencias de calidad requerida del efluente de tratamiento, se pueden tomar como válidos los valores medios y altos para realizar el diseño del tratamiento mediante humedales artificiales.

5.1.2.4 NATURALEZA DEL FLUJO Y TRANSPORTE DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS

El escurrimiento pluvial urbano se rige por los procesos naturales del ciclo hidrológico: precipitación; intercepción por parte de la vegetación y detención superficial, infiltración y almacenamiento subterráneo (pérdidas);

escurrimiento superficial y encauzado (tránsito) [Riccardi, 1997a]. La antropización de ambientes naturales produce profundas alteraciones en el medio generando impactos significativos tanto en la cantidad de agua (crecientes o inundaciones) como en la calidad de la misma (degradación de los recursos hídricos) (Tucci y Genz, 1995). Al desarrollarse la urbanización de un área se llevan a cabo limpieza de terrenos modificando la vegetación y la permeabilidad del suelo, se impermeabilizan grandes superficies disminuyendo la infiltración y alterando el flujo hacia los acuíferos subterráneos. Se sustituyen las vías naturales de drenaje por canales y conductos impermeables. Depresiones naturales que funcionaban como retardadores del flujo son rellenadas, muchas veces con rellenos sanitarios, para edificar sobre ellas [Riccardi, 1997a]. Estos factores disminuyen las pérdidas por infiltración, transpiración y detención, provocando un aumento del volumen total de escurrimiento superficial y de la frecuencia con que se producen inundaciones urbanas. Por la menor resistencia al flujo se incrementa el caudal pico y disminuye el tiempo de concentración, consecuentemente, las velocidades de escurrimiento aumentan. Esto se traduce en una mayor capacidad de erosión y de arrastre de contaminantes.

Por otra parte, las actividades del hombre imponen una carga contaminante muy grande, no sólo en la cantidad de material sino también en la variedad de contaminantes. Es lo que se denomina contaminación difusa: escombros y residuos de las construcciones, los basurales, el uso de fertilizantes y pesticidas en parques, jardines y sembradíos de las zonas periurbanas, grasas, aceites e hidrocarburos que quedan depositados en las calles a causa del uso de vehículos, efluentes de limpieza de pisos de talleres, industrias y veredas, etc. Todas estas sustancias se depositan y acumulan en superficies como calles, techos, etcétera, para luego ser lavados y arrastrados por el agua de lluvia, escurriendo por la superficie de la cuenca Esistema mayorE y por los sistemas de conductos Esistema menor, hasta alcanzar los receptores.

Tradicionalmente, la concepción de drenaje urbano consistía en llevar lo más rápido posible el agua lejos o al menos fuera de los límites del municipio sin considerar el impacto sobre el cuerpo receptor o sobre las otras regiones de aguas abajo (Bertoni, 2001). Actualmente, la disminución de contaminación del flujo constituye uno de los principales objetivos en la gestión del drenaje urbano. En la Figura 2 se observan los componentes aportadores de contaminantes y los mecanismos de transporte; algunos de ellos son la precipitación pluvial, los sedimentos y la lluvia ácida.

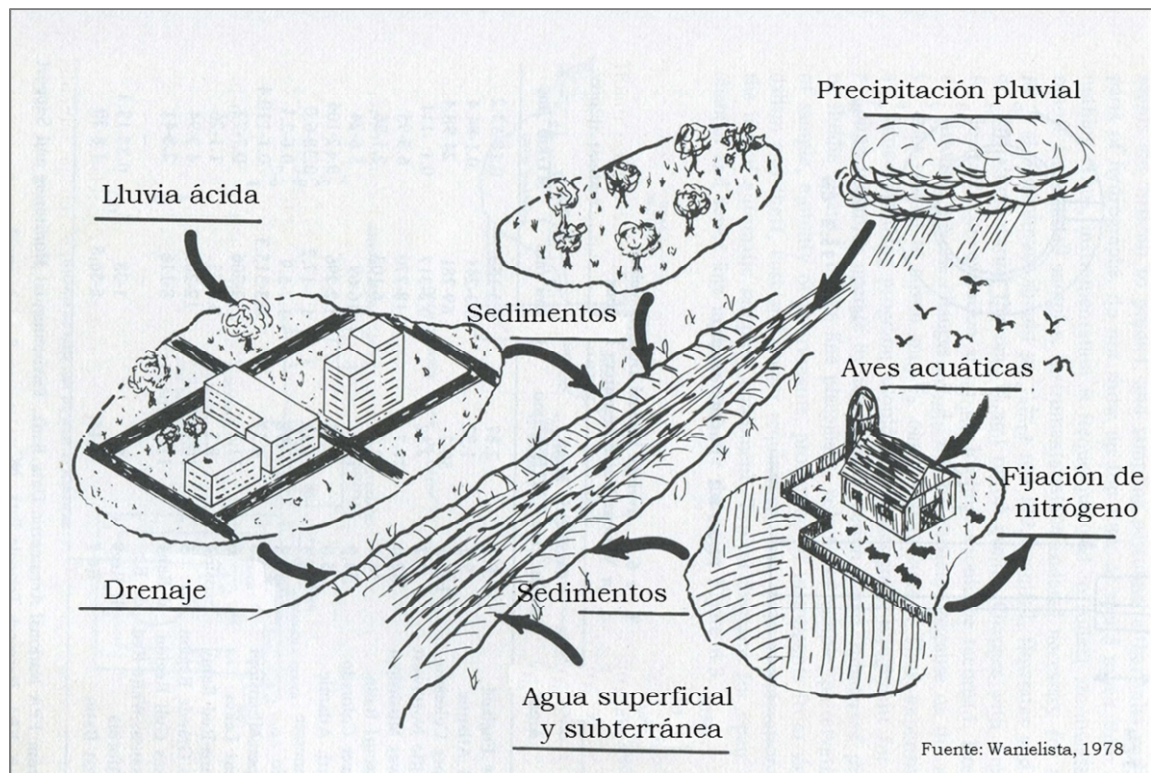


Figura 2. Mecanismos de transporte de contaminantes

LA CONTAMINACIÓN DIFUSA

Se denominan fuentes de contaminación difusa o “no puntual” debido a que la carga contaminante que producen, provienen de actividades que depositan dichas sustancias en forma dispersa sobre la superficie. Luego de ocurrir el evento de lluvia, el escurrimiento generado produce un efecto de lavado

arrastrando el material hacia las aguas receptoras. Browne, 1990 considera que está relacionada con ciertos factores como el uso del suelo y las variables hidrogeológicas, de los cuales sólo el manejo de la tierra puede ser controlado por la sociedad.

La contaminación difusa es un fenómeno aleatorio, al igual que los procesos hidrológicos involucrados. Esto, sumado a la gran cantidad de fuentes de este tipo de contaminación y a la enorme cantidad de factores que intervienen, hace que no se pueda definir correctamente su origen y por ello no se la puede monitorear desde el origen. También hace prácticamente imposible establecer una correlación estricta caudal versus la carga contaminante. Algunos factores que intervienen en los procesos de la polución difusa son: la cantidad de fuentes y de contaminantes (sólidos suspendidos, nutrientes, metales pesados, bacterias); la intensidad y duración del evento de precipitación; del área de producción en aquel evento; del tiempo de acumulación entre eventos; uso del suelo, factores geológicos y geográficos, otras variables meteorológicas y de la velocidad del escurrimiento (Wanielista, 1978). Los cuerpos de agua que reciben los efluentes pluviales con una carga contaminante asociada sufren ciertas perturbaciones a corto y largo plazo: aumento de la turbidez por sólidos en suspensión, modificación de la flora y fauna acuática, eutroficación, depósitos de sedimentos, disminución de la concentración de oxígeno disuelto por aporte de material biodegradable, contaminación por organismos patógenos y elementos tóxicos como metales pesados (Porto, 1995). De una manera sencilla, estos procesos pueden explicarse mediante el esquema de la Figura 3, en donde se observa que la lluvia como un componente esencial en el transporte de los contaminantes, se encarga de llevar consigo los contaminantes en las cuencas urbanas y también los productos de la erosión y los escurrimientos superficiales hasta los cuerpos receptores de aguas residuales, que en la mayoría de los casos son ríos, arroyos y barrancas.

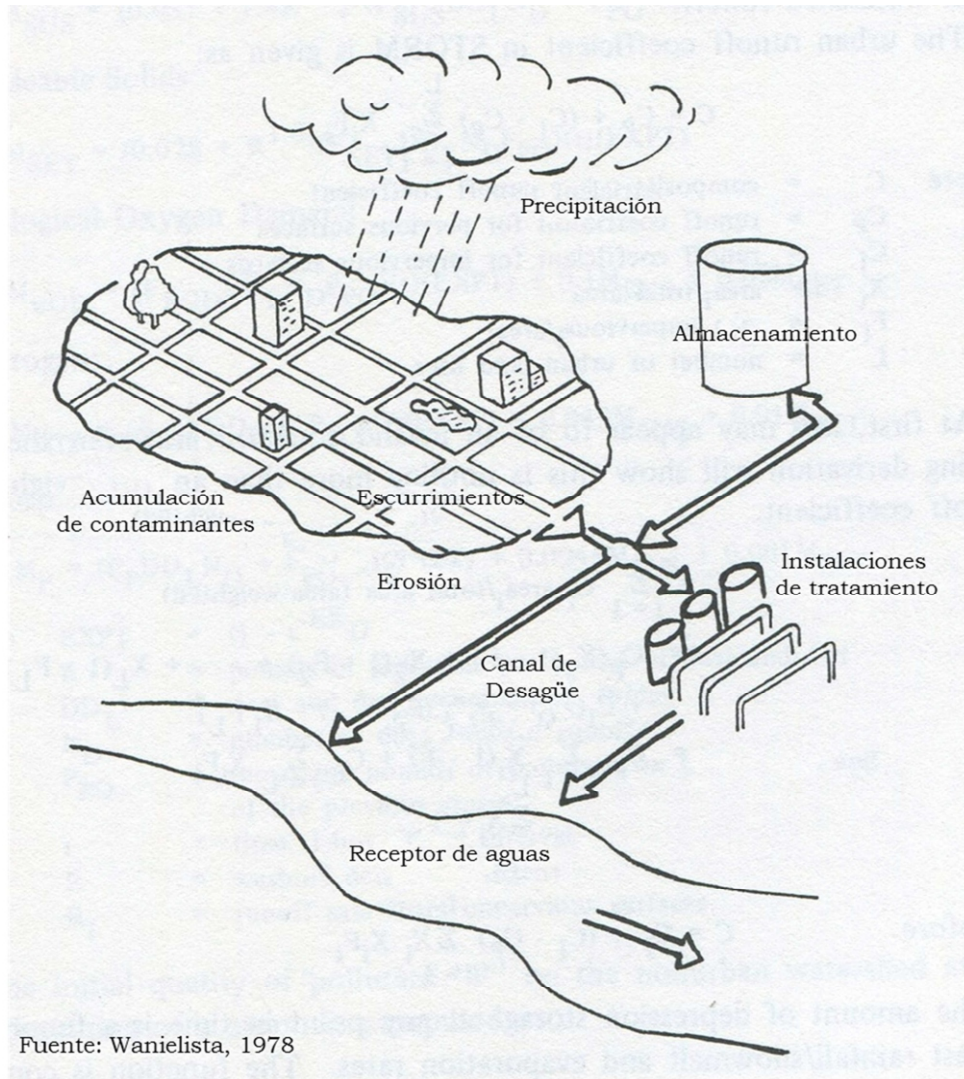


Figura 3. Incidencia de la precipitación en el transporte de las aguas residuales

5.1.3 AGUAS RESIDUALES EN MÉXICO

Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las primeras corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado municipales urbanos y rurales, en tanto que las segundas son aquellas descargadas directamente a los cuerpos receptores de propiedad nacional, como es el caso de la industria autoabastecida. Como se

puede apreciar en el Cuadro 7, del total de aguas residuales municipales generadas en México, se trata alrededor del 35%, en tanto que de las aguas residuales industriales, el porcentaje de tratamiento es el 18% (CONAGUA, 2011).

Cuadro 7. Descargas de aguas residuales municipales y no municipales en México.

Parámetro	Cantidad	Unidad
Centros urbanos (descargas municipales)		
Total de aguas residuales	7.44	km ³ año ^{E1} (235.8 m ³ s ^{E1})
Se colectan en alcantarillado	6.56	km ³ año ^{E1} (208.0 m ³ s ^{E1})
Se tratan	2.64	km ³ año ^{E1} (83.64 m ³ s ^{E1})
Generación de DBO ₅	2.01	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Recolección de DBO ₅ en alcantarillado	1.77	millones de toneladas al año
Remoción de DBO ₅ en los sistemas de tratamiento	0.58	millones de toneladas al año
Usos no municipales (incluyendo a la industria)		
Total de aguas residuales	6.01	km ³ año ^{E1} (190.4 m ³ s ^{E1})
Se tratan	1.07	km ³ año ^{E1} (33.7 m ³ s ^{E1})
Generación de DBO ₅	7.00	millones de toneladas al año
Remoción de DBO ₅ en los sistemas de tratamiento	1.15	millones de toneladas al año
DBO ₅ = Demanda Bioquímica de Oxígeno en 5 días 1 km ³ = 1 000 hm ³ = mil millones de m ³ . FUENTE: CONAGUA. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. CONAGUA. Subdirección General Técnica. Estadísticas del Agua en México, edición 2010.		

En la Figura 4 se hace un comparativo del número de plantas de tratamiento por Entidad Federativa, y en la Figura 5 la capacidad instalada y el caudal tratado (Fuente de los datos: CONAGUA, 2011).

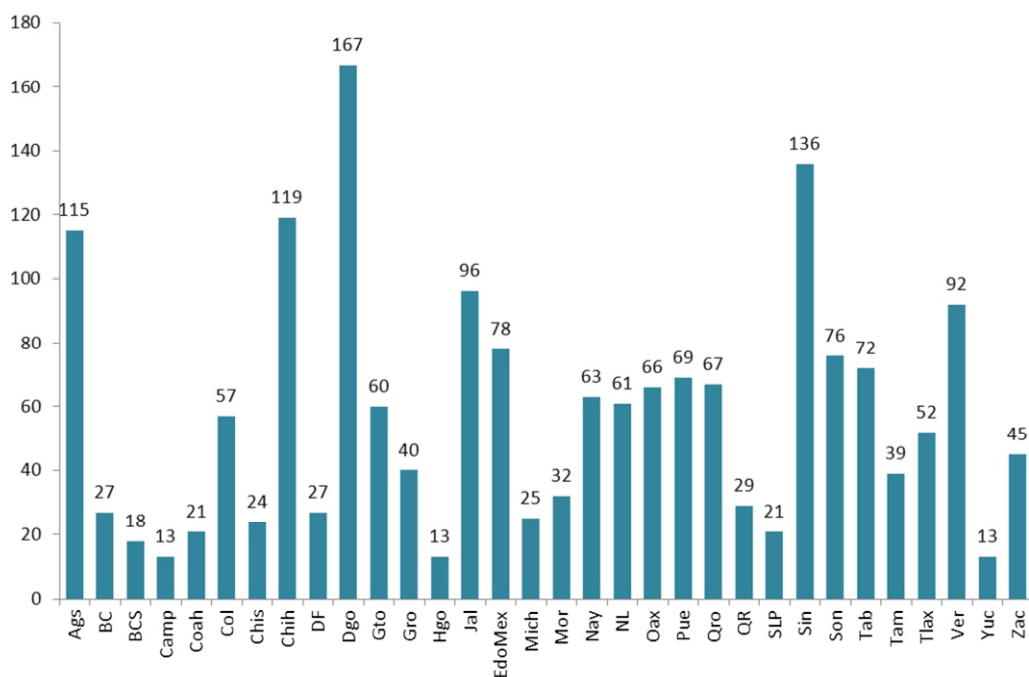


Figura 4. Comparativa de plantas de tratamiento por Entidad Federativa en México

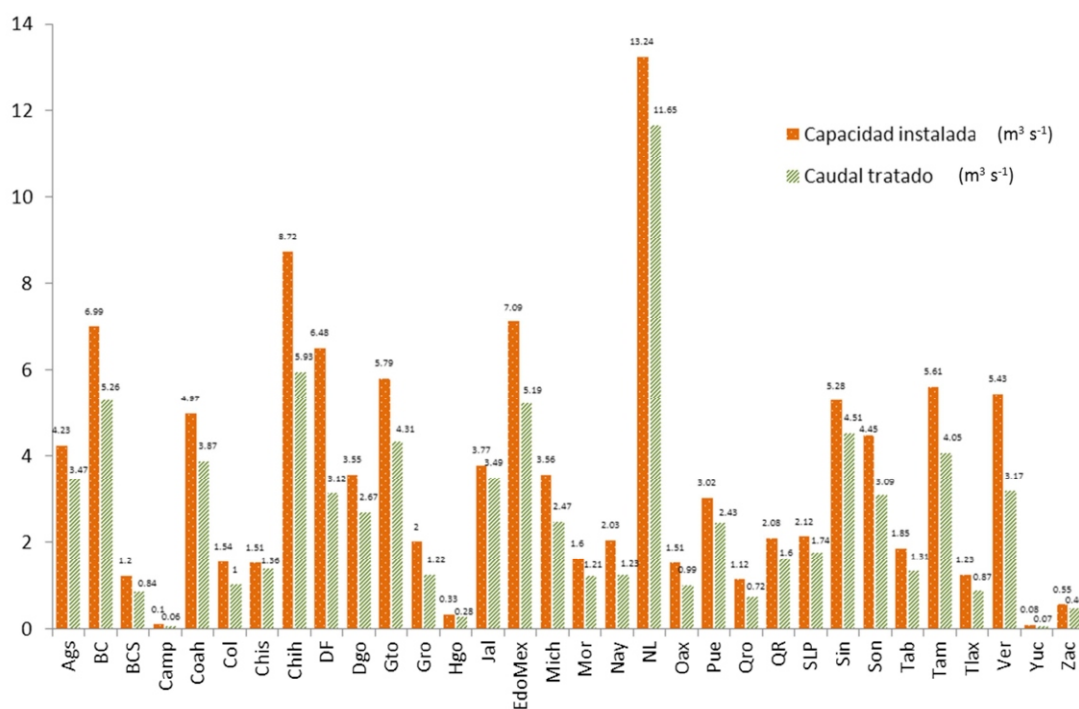


Figura 5. Capacidad instalada de plantas de tratamiento y caudal tratado por Entidad Federativa

Sin embargo, para poder realizar una comparativa de cobertura de tratamiento de aguas residuales por Entidad Federativa, es necesario tomar en cuenta la población de cada una de ellas. Retomando los valores de caudal tratado de aguas residuales, reportados en la Figura 2, y multiplicando por el número estimado de segundos que tiene un año se obtiene la cantidad de litros anuales que se tratan por Estado. Finalmente, al dividir esta cantidad entre el número de total de habitantes según el Censo de Población y Vivienda 2010 del INEGI se obtiene un valor de cobertura de tratamiento. En la Figura 6 se muestran los valores de cobertura obtenidos por Entidad Federativa.

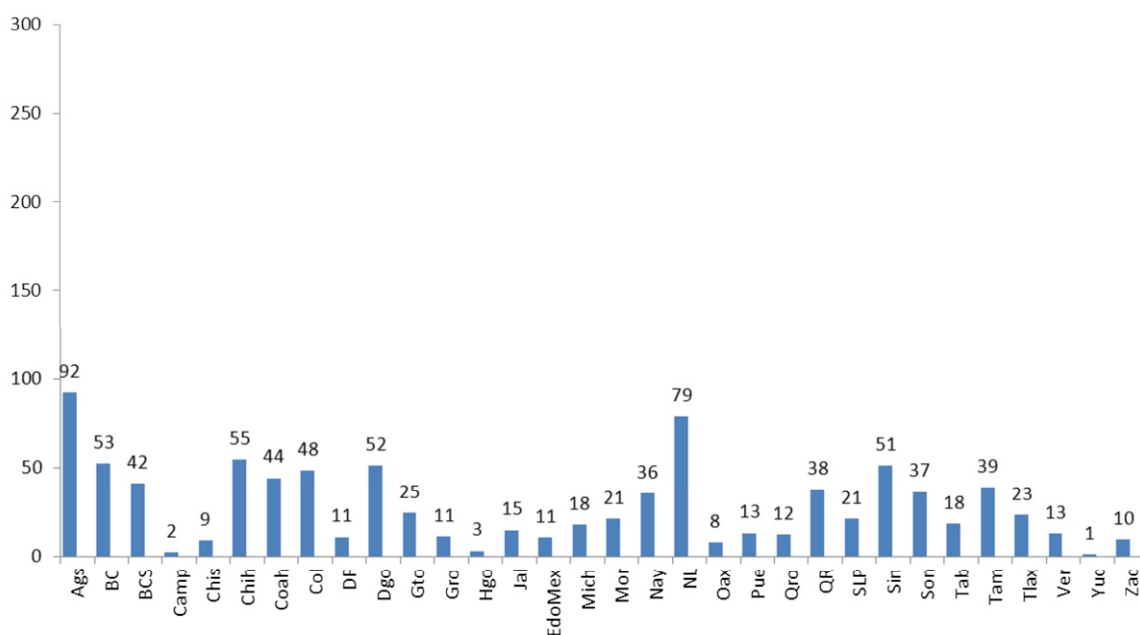


Figura 6. Cobertura de tratamiento de aguas residuales por entidad federativa (m³ anuales por habitante).

Los principales procesos de tratamiento que se realizan en México son las lagunas de estabilización y los lodos activados, representando el 62% del total del volumen anual depurado (Cuadro 8).

Cuadro 8. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales.

Proceso	Número	Caudal tratado	Porcentaje
Biodiscos	6	0.47	0.59
Filtros biológicos	74	3.56	4.49
Lagunas de estabilización	646	14.24	17.96
Lagunas aireadas	26	6.08	7.66
Lodos activados	417	35.14	44.32
Primario	13	2.07	2.61
Primario avanzado	14	8.68	10.95
R.A.F.A.	111	1.04	1.31
Reactor enzimático	59	0.11	0.14
Tanque Imhoff	59	0.39	0.49
Tanque séptico	77	0.13	0.16
Humedal artificial	130	0.48	0.61
Zanjas de oxidación	20	2.18	2.75
Otros	58	4.73	5.97

R.A.F.A: Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente

Fuente: CONAGUA, 2010

5.1.3.1 NORMAS OFICIALES MEXICANAS PARA DESCARGA DE AGUAS RESIDUALES

En 1997 y 1998 se promulgaron las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), actualmente vigentes, sobre descargas de aguas residuales. Son decretos federales de obligado cumplimiento, que establecen los límites de contaminantes en la descarga (vertido) a los diferentes cuerpos de agua y al suelo, así como a las redes de alcantarillado: NOME001ESEMARNATE1996 y NOME002ESEMARNATE1996, respectivamente. Estas normas supusieron un marco regulador unificado para todos los municipios y usuarios de las redes

de alcantarillado. Los límites de contaminantes en la descarga de aguas residuales municipales a cuerpos receptores se establecieron en función de los cuerpos de agua, mientras que la descarga a alcantarillado se unificó y ya no dependió de la actividad de la industria: se derogaron normas anteriores que establecían la normativa de descarga según el ramo industrial. Los límites establecidos por las NOM mencionadas son en general bastante permisivos. Sin embargo, establecieron un marco normativo generalizado y un calendario escalonado de implantación de la norma, que debía favorecer la generalización del saneamiento integral de las aguas residuales en el país. La NOME001ESEMARNATE1996 establece los límites máximos permisibles en la descarga a suelo y agua en función de los tipos de cuerpos receptores establecidos en la Ley Federal de Derechos. En la descarga a río con “protección de la vida acuática” se establecen límites moderadamente altos de demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y sólidos suspendidos totales (SST) de 30 y 40 mg L^{E1}, respectivamente (promedios mensuales). En cambio, en la descarga a ríos calificados para “uso en riego agrícola” se establecen límites de 150 mg L^{E1}, tanto para DBO₅ como para SST; y para la descarga al suelo para riego agrícola, no se establecen límites de DBO₅ ni de SST. Esto implica en la práctica que para algunas aguas residuales diluidas no se requeriría tratamiento alguno, o bastaría con una sedimentación primaria para cumplir con la normativa de descarga. Sin embargo, y en contradicción con lo anterior, el límite de patógenos en todos los tipos de descarga se establece en un promedio mensual de 1000 NMP de CF/100 ml (número más probable de coliformes fecales por 100 ml): este límite sería probablemente excesivamente estricto para determinados cultivos y técnicas de riego. En cambio, resultaría demasiado permisivo para otros cultivos o técnicas de riego. De hecho, estas concentraciones de CF se consiguen normalmente tras un proceso secundario y una desinfección. Estas y otras cuestiones están siendo consideradas, y se preparan revisiones a las NOM en los próximos años (Sánchez, 2004).

El Cuadro 9 muestra el calendario de implantación previsto para la NOME 001ESEMARNATE1996.

Cuadro 9. Calendario establecido en la NOME001ESEMARNATE1996

Descargas municipales	
Fecha de cumplimiento a partir de:	Rango de población
1 de enero de 2000	mayor de 50,000 habitantes
1 de enero de 2005	de 20,001 a 50,000 habitantes
1 de enero de 2010	de 2,501 a 20,000 habitantes

Fuente: CONAGUA, 2010

Este calendario fue incumplido por la mayoría de municipios de más de 20,000 habitantes, sobre todo por falta de recursos financieros. Al incumplir la normativa, los municipios incurren en deudas con la Federación por impago de los derechos de descarga establecidos en la Ley Federal de Derechos.

Para estimular el cumplimiento de la normativa, sucesivos decretos federales ofrecieron a los municipios la condonación de las deudas a cambio de que elaboraran y ejecutaran planes para establecer el saneamiento de sus aguas residuales. La condonación de la deuda quedó condicionada al cumplimiento trimestral de los objetivos de un programa, de lo contrario el municipio debería pagar los derechos, que serían descontados de sus participaciones federales. Este proceso se instrumentó a través del Programa de Acciones para el Saneamiento (PAS).

El PAS se ofreció inicialmente a poblaciones de más de 20,000 habitantes (un total de 306 en todo el país). A finales de 2004, 288 poblaciones se habían adherido al programa, de las que 232 estaban desarrollando acciones de saneamiento. En noviembre de 2004 se abrió el programa a las

poblaciones de más de 2,500 habitantes. Aún no se han podido obtener todos los resultados esperados del PAS, puesto que muchas obras están en fase de proyecto o ejecución (Escalas, 2006).

5.2 IMPORTANCIA DE LOS HUMEDALES NATURALES

Los humedales figuran entre los medios más productivos del mundo. Son cunas de diversidad biológica y fuentes de agua y productividad primaria de las que innumerables especies vegetales y animales dependen para subsistir. Dan sustento a altas concentraciones de especies de aves, mamíferos, reptiles, anfibios, peces e invertebrados. Los humedales son también importantes depósitos de material genético vegetal. Las múltiples funciones de los ecosistemas de humedales y su valor para la humanidad se han llegado a comprender y documentar en grado creciente en los últimos años. Esto se ha traducido en gastos inmensos para restablecer las funciones hidrológicas y biológicas de humedales degradadas o interrumpidas. Con todo, esto no basta, los empeños de los dirigentes mundiales para hacer frente a la aceleración de la crisis hídrica y a los efectos del cambio climático ponen de relieve que se ha iniciado la carrera para mejorar las prácticas apreciablemente a escala mundial. Y ello en momentos en que todo indica que la población del mundo aumentará en 70 millones de personas por año en los próximos 20 años. El consumo mundial de agua dulce aumentó seis veces entre 1900 y 1995 E más del doble del índice de aumento de la población. Un tercio de la población del mundo vive hoy en países que están experimentando estrés por déficit hídrico en grado de moderado a alto. Para 2025 dos de cada tres habitantes de la Tierra podrían vivir en condiciones de estrés por déficit hídrico. La capacidad de los humedales de adaptarse a condiciones dinámicas e índices de cambio cada vez más rápidos será crucial para las comunidades humanas y las especies silvestres en todas partes conforme se vaya percibiendo de lleno el impacto del cambio climático en las

bases de sustentación de los ecosistemas. No es de extrañarse que la atención que los humedales y los servicios que prestan a la humanidad, estén en el punto de mira de todo el mundo. Los encargados de la formulación de políticas y la toma de decisiones adoptan con frecuencia decisiones en materia de desarrollo basadas en cálculos sencillos de las ventajas y los inconvenientes monetarios de las propuestas que tienen ante sí la importancia de los humedales para el medio ambiente y las sociedades humanas ha sido infravalorada tradicionalmente en estos cálculos debido a lo difícil que es asignar un valor monetario a los valores y beneficios, así como a los bienes y servicios de los ecosistemas de humedales. Así, un número creciente de economistas y otros científicos están trabajando en el campo cada vez más importante de la valoración de los servicios de los ecosistemas. Se trata de una tarea difícil, pero para que los encargados de la toma de decisiones cuenten con información correcta sobre la relación entre los valores monetarios de un humedal saludable y las pérdidas económicas de un humedal destruido o degradado, no hay más remedio que avanzar en este sentido. Algunos estudios recientes han indicado que los ecosistemas prestan servicios de un valor superior a los 33 billones de dólares estadounidenses por año, de los cuales 4,9 billones se atribuyen a los humedales. Además, los humedales son importantes y esenciales para la salud, el bienestar y la seguridad de quienes viven en ellos o en su entorno. Figuran entre los medios más productivos del mundo y reportan un amplio abanico de beneficios (RAMSAR, 2006).

5.2.1 LOS HUMEDALES COMO SISTEMAS NATURALES DE DEPURACIÓN

Las interacciones de los componentes físicos, biológicos y químicos de un humedal, como los suelos, el agua, las plantas y los animales, hacen posible que desempeñe muchas funciones vitales, como por ejemplo:

Almacenamiento de agua

Protección contra tormentas y mitigación de crecidas

Estabilización de costas y control de la erosión

Recarga de acuíferos (movimiento descendente de agua del humedal al acuífero subterráneo)

Descarga de acuíferos (movimiento ascendente de aguas que se convierten en aguas superficiales en un humedal)

Depuración de aguas

Retención de nutrientes

Retención de sedimentos

Retención de contaminantes

Estabilización de las condiciones climáticas locales, particularmente lluvia y temperatura

Estas funciones se sintetizan de manera gráfica en la Figura 7.

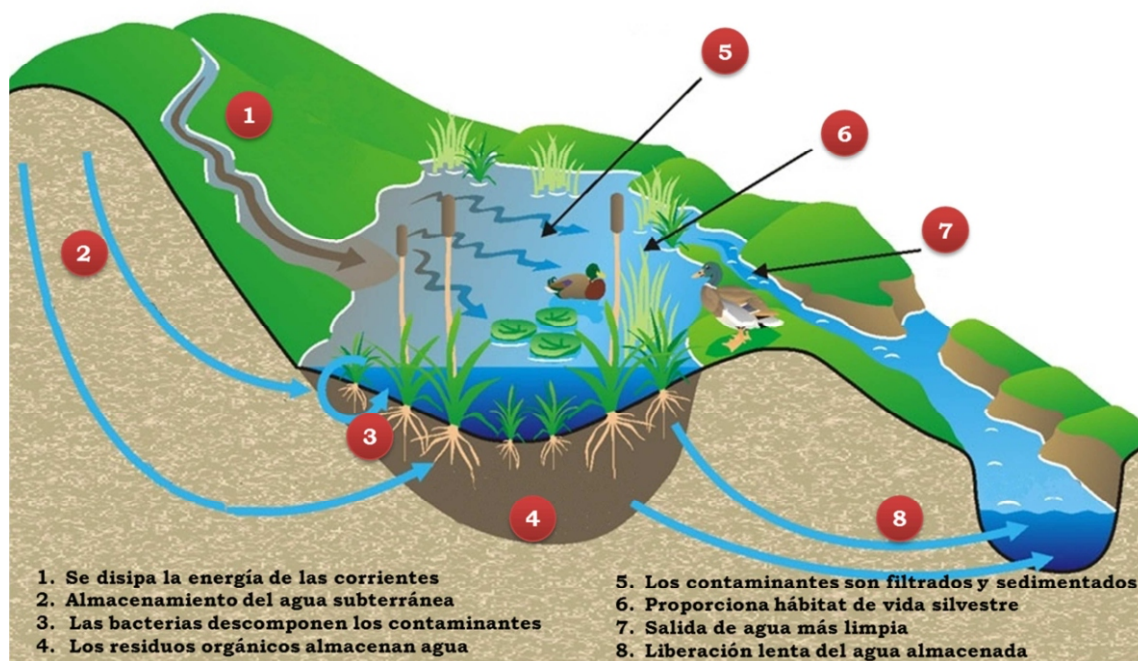


Figura 7. Funciones y beneficios de los humedales naturales. Fuente: WEF, 1992

Asimismo, los humedales reportan beneficios económicos enormes, como:

Abastecimiento de agua (cantidad y calidad)

Pesca (más de dos tercios de las capturas mundiales de peces están vinculadas a la salud de las zonas de humedales)

Agricultura, gracias al mantenimiento de las capas freáticas y a la retención de nutrientes en las llanuras aluviales

Madera y otros materiales de construcción

Recursos energéticos, como turba y materia vegetal

Recursos de vida silvestre

Transporte

Un amplio espectro de otros productos de humedales, incluidas hierbas medicinales

Posibilidades de recreación y turismo

La Convención de Ramsar aplica un criterio amplio para determinar qué humedales quedan sujetos a sus disposiciones. Con arreglo al texto de la Convención (Artículo 1.1), se entiende por humedales:

"Las extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros".

Además, a efectos de proteger sitios coherentes, el Artículo 2.1 estipula que los humedales que se incluirán en la Lista de Ramsar de Humedales de Importancia Internacional:

"Podrán comprender sus zonas ribereñas o costeras adyacentes, así como las islas o extensiones de agua marina de una profundidad superior a los seis metros en marea baja, cuando se encuentren dentro del humedal".

En general, se reconocen cinco tipos de humedales naturales:

Marinos (humedales costeros, inclusive lagunas costeras, costas rocosas y arrecifes de coral)

Estuarinos (incluidos deltas, marismas de marea y manglares);

Lacustres (humedales asociados con lagos)

Ribereños (humedales adyacentes a ríos y arroyos)

Palustres (es decir, "pantanosos" E marismas, pantanos y ciénagas)

Además, hay humedales artificiales, como estanques de cría de peces y camarones, estanques de granjas, tierras agrícolas de regadío, depresiones inundadas salinas, embalses, estanques de grava, piletas de aguas residuales y canales. La Convención de Ramsar ha adoptado un Sistema Ramsar de Clasificación de Tipos de Humedales que incluye 42 tipos, agrupados en tres categorías: humedales marinos y costeros, humedales continentales y humedales artificiales. Cabe señalar también que se entiende que los lagos y ríos en su totalidad quedan comprendidos en la definición de humedales de Ramsar, cualquiera que sea su profundidad. Hay humedales en todas partes, desde la tundra hasta el trópico. No se sabe con exactitud qué porcentaje de la superficie terrestre se compone actualmente de humedales. Según la estimación del Centro Mundial de Monitoreo de la Conservación del PNUMA es de unos 570 millones de hectáreas (5.7 millones de km²) E aproximadamente el 6% de la superficie de la Tierra E de los cuales 2% son lagos, 30% turberas arbustivas o abiertas, 26% turberas de gramíneas o carrizo, 20% pantanos y 15% llanuras aluviales. Mitsch y Gosselink, 2000, opinan que oscila entre 4% y 6% de la superficie de la Tierra. Los manglares cubren unos 240,000 km² de zonas costeras y se

estima que quedan unos 600,000 km² de arrecifes de coral en el mundo. Ahora bien, pese a que en un estudio mundial preparado para la COP7 de Ramsar, celebrada en 1999, se afirmó que "la información disponible actualmente no permite dar una cifra aceptable de la extensión de los humedales a escala mundial", se indicó también que, según la 'mejor' estimación mundial mínima, oscilaría entre 748 y 778 millones de hectáreas. En el mismo informe se indicó que este "mínimo" podría aumentar a un total de entre 999 y 4,462 millones de hectáreas si se tuvieran en cuenta otras fuentes de información (RAMSAR, 2006).

Por la importancia que los humedales representan para la humanidad, y específicamente por su función de depurar las aguas residuales, se han realizado muchos trabajos de investigación que son la base para el diseño y la construcción de los humedales artificiales, los cuales intentan replicar las funciones de los humedales naturales y ajustarlas a situaciones específicas, mediante criterios de ingeniería hidráulica y civil.

5.3 LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

Los humedales artificiales son cada vez más reconocidos por sus funciones ecológicas únicas y los beneficios que aportan al medio ambiente, por lo que fueron incluidos en la clasificación de RAMSAR. Es por ello que investigadores de todo el Mundo han centrado sus investigaciones en el diseño y el fundamento de sistemas de tratamiento de agua mediante humedales artificiales.

Su aceptación se ha expandido principalmente en los países de Europa porque provee una forma natural, efectiva y de bajo costo en la remoción de contaminantes. Sin embargo, aunque se han hecho numerosas investigaciones que se han presentado en seminarios y conferencias, con

reportes técnicos, procedimientos y libros publicados, la mayoría de las publicaciones se enfocan en la biología, ingeniería y los fundamentos químicos de los humedales. No existe información suficiente con respecto a los aspectos técnicos y procedimientos de construcción, de manera particular para las condiciones de México.

5.3.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL USO DE HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

Los primeros estudios e investigación científica en la que se construyó un humedal artificial a escala piloto para el tratamiento de aguas residuales se realizaron en el Instituto Max Planck de Plön, Alemania, donde la Doctora Käthe Seidel realizó pruebas detalladas con algunas plantas acuáticas para determinar su capacidad para absorber y descomponer contaminantes químicos. Su investigación fue presentada en 1953 y demostró que algunas plantas como la *Scirpuslacustris*, nombre común “Junco cebra” tiene la capacidad para remover fenoles, bacterias patógenas y otros contaminantes. Además, las plantas cultivadas expuestas a las aguas residuales presentaron sorprendentes cambios fisiológicos y morfológicos que contribuyeron a tener un mejor desempeño. Aunque los experimentos de Seidel fueron muy criticados, algunos investigadores retomaron sus ideas. La principal razón de las críticas fue el hecho de que las investigaciones y cálculos fueron enfocados al uso de las plantas en la remoción de nutrientes. Esto requeriría un programa de corte de plantas (que no es fácil en la mayoría de los casos) y áreas extensas para el crecimiento de las plantas acuáticas.

Wissing (1995) mencionó que con el tratamiento de aguas residuales mediante lodos activados, realizados a gran escala en algunas ciudades de Alemania de 1950E1960, surgió el problema de la acumulación de lodos residuales en las plantas de tratamiento. Seidel intensificó sus pruebas en el

crecimiento de helófitas e hidrófitas en aguas residuales y lodos de diferente origen, e intentó mejorar el desarrollo de estructuras de tratamiento con pobre efecto de depuración, por ejemplo tanques sépticos o sistemas de lagunaje. Seidel plantó macrofitas en zanjas poco profundas, a lo que llamó “método hidrobotánico”.

Sin embargo, en ese tiempo la visión entre los expertos de tratamiento de agua estaba limitada a los procesos físicos, químicos y biológicos (mediante bacterias), y no se tomaba en consideración el uso de las macrofitas en la purificación del agua. Además, se creía que la mayoría de las macrofitas no podían crecer en agua contaminada, y no se había reconocido su capacidad para eliminar sustancias tóxicas.

El concepto de Seidel de establecer macrofitas para tratar agua residual era difícil de entender para los ingenieros de tratamiento de agua, puesto que durante más de 50 años se había erradicado cualquier vegetación visible en las plantas de tratamiento. Es por eso que no fue ninguna sorpresa que el primer humedal artificial fuera construido lejos de Alemania.

A pesar de los prejuicios de algunos ingenieros civiles acerca de los humedales artificiales en el tratamiento de agua por los malos olores generados, la presencia de mosquitos y el pobre desempeño del sistema en el periodo de invierno, las autoridades de Flevoland, Países Bajos, autorizaron la construcción del primer humedal de flujo libre en el lago Ijssel, en el año de 1967. En 1968, este tipo de humedal fue construido también en Hungría, muy cerca de Keszthely, con el objetivo de preservar la calidad del lago Balaton y tratar el agua residual de las comunidades cercanas al área. Sin embargo, la construcción de humedales de flujo libre no fue difundida en Europa, tanto como se difundió en Norteamérica. En lugar de ello, creció más el interés en los humedales de flujo subsuperficial horizontal y vertical.

En Norteamérica, la tecnología de los humedales de flujo libre comenzó con la ingeniería ecológica de los humedales naturales para tratamiento del agua residual, entre 1967 y 1972, cuando Howard T. Odum de la Universidad del Norte de Carolina, comenzó un estudio utilizando lagunas costeras para el reciclaje de las aguas municipales residuales. En 1972, Odum, quien se había trasladado a la Universidad de Florida en Gainesville, se unió a Katherine Ewel para estudiar la efectividad de los humedales naturales con árboles de ciprés para el reciclaje de las aguas residuales municipales. Al mismo tiempo, investigadores de la Universidad de Michigan en Ann Arbor comenzaron el proyecto del Lago Houghton, el primer estudio a profundidad utilizando la ingeniería de los humedales para tratar aguas residuales en climas fríos. Desde entonces, los humedales construidos de flujo libre han sido utilizados en Norteamérica para varios tipos de aguas residuales, incluyendo las municipales, industriales y agrícolas.

La tecnología de flujo subsuperficial fue iniciada en Norteamérica a principios de la década de 1970. En años recientes, el uso de estos sistemas ha acaparado la atención, y se estima que existen alrededor de 8,000 humedales artificiales de flujo subsuperficial. Sin embargo, la información sobre estos sistemas es bastante escasa, comparada con los humedales de flujo superficial.

El potencial de las macrofitas acuáticas para tratar el agua residual fue evaluado en Australia por Mitchell a mediados de la década de los 70s. En 1980, se evaluó la capacidad de asimilación de los humedales, en donde Finlayson y sus colaboradores desarrollaron experimentos sobre el uso de humedales construidos para tratar aguas residuales provenientes de las porquerizas y rastros, a escala experimental (Finlayson and Chick, 1983). Estos estudios y experimentos fueron trasladados y ampliados en la Universidad del Oeste, en Sydney. A la fecha, los humedales artificiales son utilizados en Australia predominantemente para tratar los desagües

pluviales con humedales de flujo libre, aunque se ha encontrado otras aplicaciones de los humedales construidos y se han aplicado en menor medida.

Tanner et al. (2000) reportó que los humedales construidos han sido adoptados con entusiasmo por algunas comunidades de Nueva Zelanda como un medio efectivo para tratamiento secundario y terciario del agua residual. El estudio de Tanner reveló que había más de 80 humedales construidos para tratar agua residual, sin incluir los tratamientos de los desagües pluviales y de los desechos de las granjas lecheras. Los de flujo libre fueron los más comunes. Actualmente, los humedales artificiales en Nueva Zelanda son muy utilizados para tratar los escurrimientos superficiales de la agricultura.

Desde mediados de la década de 1980, el concepto de utilización de humedales artificiales se ha incrementado en Sudáfrica. En 1990 había alrededor de 30 sistemas en operación o en construcción. Ellos han sido diseñados para tratar aguas residuales crudas y efluentes domésticos, para mejorar el tratamiento de los tanques sépticos y lagunas de oxidación, etc. Sin embargo, después de mediados de la década de 1990, la información sobre los humedales construidos en Sudáfrica disminuyó, por lo que es difícil saber si se expandió la construcción de estos sistemas. Por otro lado, a finales del siglo XX, los humedales artificiales llegaron a ser más populares en las zonas tropicales del continente africano y existen muy buenos ejemplos de todos los tipos de humedales artificiales para tratar aguas residuales municipales, así como las aguas residuales industriales y de desagüe de las minas.

Los conocimientos tradicionales de granjeros asiáticos en el reciclaje de desechos humanos y animales mediante la acuicultura y otras prácticas desarrolladas intuitivamente por ellos para la recuperación de nutrientes de

los desechos mediante macrofitas acuáticas propagadas sobre camas de desechos, proporcionaron una buena base para el desarrollo de sistemas de ingeniería del tratamiento de desechos con plantas acuáticas. A principios de 1969 Sinha y Sinha informaron sobre el uso de lirios acuáticos para tratar los desechos de las fábricas de azúcar. Durante la década de 1970 y 1980, se expandieron los experimentos con lirios acuáticos en Asia, para tratar diferentes tipos de agua residual, por ejemplo las procedentes de industrias lácteas, de producción de aceite de palma, producción de caucho, textiles, papeleras, etc. Sin embargo, la primera información acerca del uso de humedales artificiales con plantas emergentes apareció a principios de los años 90s. Durante la conferencia de la Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas en Inglés), celebrado en China, en el año de 1994, se presentaron algunos documentos sobre humedales artificiales de flujo horizontal y vertical, especialmente procedentes del país anfitrión, y sin embargo, la falta de publicación de dichos documentos ha provocado que los sistemas construidos en Asia no sean reconocidos, aun cuando actualmente, se tienen humedales construidos en India, China, Korea, Taiwan, Japón, Nepal, Malaysia y Tailandia.

En Brasil, desde 1980 las investigaciones han sido enfocadas a la posibilidad de utilizar los estanques con lirios acuáticos en combinación con humedales artificiales sembrados con arroz, los cuales fueron llamados “suelos filtrantes”. En la clasificación actual, estos sistemas se llamarían humedales artificiales de flujo ascendente vertical. Sin embargo, recientemente se han adoptado otros tipos de humedales construidos con plantas acuáticas emergentes. La información sobre el uso de estos sistemas que operan con vegetación emergente está limitada en Sudamérica a los países de Brasil, Colombia, Ecuador, Uruguay, Argentina, y se ha ido expandiendo también a Centroamérica.

Los intentos iniciales para usar macrofitas en el tratamiento del agua fueron encaminados a la remoción de varios componentes químicos. Sin embargo, a lo largo de los años, los humedales artificiales han sido utilizados principalmente para tratar aguas residuales domésticas. Actualmente, estos sistemas han venido ganando terreno y ya se utilizan para tratar aguas residuales procedentes de la industria y la agricultura. La primera Guía Europea Nacional fue publicada en Alemania por la Asociación Técnica de Aguas Residuales (ATV, por sus siglas en Alemán), en 1989. Actualmente en Europa existen algunas guías para el diseño y operación de los humedales artificiales, en algunos países como Dinamarca existen guías para humedales construidos de flujo horizontal y vertical. En los Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus Siglas en Inglés) publicó en 1988 un manual de diseño de humedales artificiales y sistemas de plantas acuáticas para tratamiento de aguas residuales municipales, el cual fue reemplazado por una actualización en el año 2000 del mismo manual. En Australia, la Guía para tratar aguas residuales municipales utilizando humedales de flujo libre superficial, fue publicada en el año 2000 (Vymazal, 2005).

En México las primeras investigaciones a nivel laboratorio fueron realizadas por la Universidad Nacional Autónoma de México. Posteriormente el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua se sumó a dichas investigaciones y actualmente varias universidades importantes del país realizan investigaciones relacionadas con el uso de humedales artificiales para tratar aguas negras y grises.

Según datos de la Comisión Nacional del Agua, en el año 2008 se tenían registradas 130 plantas de tratamiento que tenían en sus procesos la utilización de humedales artificiales. Sin embargo, la mayoría de los humedales construidos en México con el fin de tratar las aguas residuales son del tipo superficial, lo cual tiene prácticamente los mismos

inconvenientes que las lagunas de estabilización o las instalaciones con lodos activados. En estos casos, un mal diseño conduce a derrames de las aguas en proceso de tratamiento y hay que invertir en un sistema mecánico para extraer el exceso de plantas acuáticas (lirio acuático o tule) que por lo general hay que buscar qué hacer con estos residuos, entre otros problemas. Esto ha tenido como consecuencia que este tipo de sistemas no sea la primera opción entre las comunidades que requieren de un sistema de tratamiento más seguro. No se tiene un dato exacto del número de humedales artificiales de flujo subsuperficial que existen en México pero son pocos y sin embargo, aunque resultan un poco más complicados de diseñar y construir, además de que son más costosos que los humedales de flujo superficial, son más seguros, no presentan malos olores y su eficiencia es mayor.

5.3.2 PRINCIPALES MECANISMOS DE DEPURACIÓN EN LOS HUMEDALES

Aunque usualmente se dice de forma sencilla que los humedales se componen de vegetación, sustrato, agua y microorganismos, los humedales son una interacción compleja de agua, sustrato, plantas, algas, residuos principalmente vegetales, invertebrados como larvas de insectos y lombrices, y una gran cantidad de microorganismos, principalmente bacterias.

La interrelación de todos estos componentes da origen a una gran cantidad de mecanismos que mejoran la calidad del agua. Los procesos que facilitan esta depuración del agua, se muestran en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Principales procesos que realizan el tratamiento del agua en un humedal artificial

Contaminante	Proceso de eliminación
Materia orgánica (DBO ₅)	Sedimentación Asimilación Mineralización
Sólidos en suspensión	Floculación Sedimentación Filtración Degradación
Nitrógeno	Amonificación Volatilización del Amonio Nitrificación Desnitrificación
Fósforo	Adsorción Sedimentación Precipitación química Asimilación vegetal
Patógenos (coliformes)	Sedimentación y muerte gradual Radiación UV Antibióticos naturales Predación
Compuestos inorgánicos	Asimilación Inmovilización
Metales pesados	Fijación al sedimento Adsorción por las plantas

5.3.2.1 ELIMINACIÓN DE LA DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO

Los microorganismos tales como las bacterias, son responsables de descomponer los desechos orgánicos. Cuando la materia orgánica como planta muertas, hojas, aguas negras o incluso desechos de comida están presentes en el suministro de agua, las bacterias iniciarán el proceso de descomposición de estos desechos. Cuando esto sucede, mucho del oxígeno disuelto disponible lo consumen las bacterias aeróbicas, robándoles el oxígeno a otros organismos acuáticos que lo necesitan para vivir.

La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios

biológicos que contiene una muestra líquida, disuelta o en suspensión. Si hay una gran cantidad de desechos orgánicos en el suministro de agua, también habrá muchas bacterias presentes trabajando para descomponer este desecho. En este caso, la demanda de oxígeno será alta (por la gran cantidad de bacterias presentes) así que el nivel de la DBO_5 será alto. Conforme el desecho es consumido o dispersado en el agua, los niveles de la DBO_5 empezarán a bajar. Sin embargo, en los afluentes provenientes de las descargas de aguas residuales, difícilmente bajarán estos niveles por el suministro constante de materia orgánica en el agua. Generalmente la DBO_5 se mide durante 5 días de reacción o crecimiento de las bacterias, por lo que la DBO_5 se denomina como DBO_5 . Los nitratos y fosfatos en una masa de agua pueden contribuir a los niveles altos de DBO_5 . Los nitratos y fosfatos son nutrientes para las plantas y pueden hacer que la vida vegetal y las algas crezcan rápidamente. Cuando las plantas crecen rápidamente, también mueren rápidamente. Esto contribuye al desecho orgánico en el agua, el que luego es descompuesto por las bacterias. Esto ocasiona altos niveles de DBO_5 . La temperatura del agua también puede contribuir a los altos niveles de DBO_5 . Por ejemplo, el agua más tibia generalmente tendrá un nivel DBO_5 más alto que el agua más fría. Conforme la temperatura del agua aumenta, la velocidad de la fotosíntesis que realizan las algas y otras plantas en el agua también aumenta. Cuando esto sucede, las plantas crecen más rápido y también mueren más rápido. Cuando las plantas mueren, caen al fondo donde las descomponen las bacterias. Las bacterias requieren oxígeno para este proceso de modo que la DBO_5 es alta en este lugar. Por lo tanto, las aguas con temperaturas más altas acelerarán la descomposición bacterial y ocasionarán niveles de DBO_5 más altos. Cuando los niveles de la DBO_5 son altos, los niveles de oxígeno disuelto (OD) disminuyen porque el oxígeno que está disponible en el agua es consumido por las bacterias. Puesto que hay menos oxígeno disuelto disponible en el agua, los peces y otros organismos acuáticos tienen la posibilidad de no sobrevivir.

La eliminación de DBO_5 ocurre rápidamente por sedimentación y filtración de partículas en los espacios entre la grava y las raíces. La DBO soluble es eliminada por los microorganismos que crecen en la superficie de la grava, raíces y rizomas de las plantas. La degradación de la materia orgánica es aerobia en micrositos de la superficie de las raíces, pero en el resto del lecho sumergido ocurre por vías anaerobias: fermentación metánica y sulfato reducción. Estos procesos son muy dependientes de la temperatura, por lo que se observan variaciones estacionales en la DBO del efluente. Se puede obtener una DBO_5 por debajo de 25 mg L^{-1} , aunque no es posible bajar de una DBO_5 de $7 - 10 \text{ mg L}^{-1}$, que puede proceder de residuos orgánicos del propio sistema y no del agua residual original. Estudios realizados en Estados Unidos indican que la DBO_5 , es eliminada rápidamente a la entrada del humedal, siendo suficiente un tiempo de retención de aproximadamente 2 días. Este aspecto es decisivo para el diseño del humedal, particularmente para determinar la relación largo: ancho (Lahora, 2000).

5.3.2.2 ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES

Los sólidos en suspensión son eliminados de una forma muy efectiva en los humedales, ocurriendo en los 5 primeros metros de distancia desde la entrada y consiguiendo siempre valores de salida en el efluente inferiores a 20 mg L^{-1} .

Una parte de los sólidos en suspensión están formados por materia orgánica, algas o microorganismos, que son degradados hasta productos gaseosos, por lo que los tiempos de colmatación o saturación de los humedales suelen ser largos. Como en el caso de la DBO_5 , el rendimiento es independiente del tiempo de retención, por lo que es suficiente un día para alcanzar el máximo rendimiento, que también es independiente de la relación largo : ancho del humedal.

5.3.2.3 ELIMINACIÓN DE NITRÓGENO

El nitrógeno está presente en las aguas residuales en forma de nitrato (NO_3^-), nitrito (NO_2^-), amonio (NH_4^+) y nitrógeno orgánico E de mayor a menor nivel de oxidación. Todas estas formas, incluido el nitrógeno gaseoso (N_2), forman parte del ciclo del nitrógeno porque están interrelacionadas bioquímicamente. La concentración de nitrógeno total en el influente del humedal, procedente de un tratamiento primario, suele estar en el rango de 8 a 85 mg L^{-1} , correspondiendo en general los valores más bajos a los efluentes de un pretratamiento de lagunaje, y los valores más altos a los de un pretratamiento convencional. El nitrógeno amoniacal ($1\text{E}40 \text{ mg L}^{-1}$) y el nitrógeno orgánico son las dos formas predominantes en el influente. En cambio, el nitrógeno nítrico suele ser muy bajo ($0\text{E}1 \text{ mg L}^{-1}$), correspondiendo los valores más altos a los efluentes del pretratamiento por lagunaje. Los procesos de remoción del nitrógeno en los humedales artificiales son de tipo físico-químico y biológico. El nitrógeno de los humedales se encuentra básicamente como nitrógeno orgánico o amoniacal, con escasas cantidades de nitratos. Los procesos de descomposición y mineralización convierten este nitrógeno en amonio. La desnitrificación también puede estar limitada por la falta de una fuente de carbono para el proceso, ya que por cada gramo de nitrógeno son necesarios aproximadamente 3 gramos de DBO_5 . Sin embargo, en algunos casos se han obtenido importantes reducciones asociadas a un aporte de oxígeno por las raíces de las plantas, en sistemas de poca profundidad, alrededor de 0.3 m (Beascochea, 2006).

El cosechado frecuente de la vegetación incrementa el rendimiento en eliminación de nitrógeno, aunque esta operación aumenta los costos de mantenimiento.

5.3.2.4 ELIMINACIÓN DE FÓSFORO

La cantidad de fósforo en el efluente es prácticamente igual que en el afluente, en la mayoría de los casos. La cantidad de fósforo asimilado por la vegetación o fijada al sedimento es pequeña en relación a la aportada por el agua residual. Por lo tanto, los humedales en sí, no son un método muy efectivo en la remoción de fósforo, excepto si se utilizan métodos o tratamientos alternativos diseñados específicamente para este fin (Lahora, 2000).

5.3.2.5 ELIMINACIÓN DE PATÓGENOS

En infectología, un agente biológico patógeno (del griego *pathos*, enfermedad y *gainein*, engendrar) es toda aquella entidad biológica capaz de producir enfermedades o daño en la biología de un huésped (planta, animal o humano) sensiblemente predispuesto.

Las aguas residuales domésticas son las que presentan mayor cantidad de patógenos, que aunque no afectan la composición química del agua, los organismos presentes que van desde un rango submicroscópico como los virus hasta lombrices parasitarias visibles sin ninguna ayuda ocular, modifican de manera importante la calidad del agua. La eficiencia de las tecnologías convencionales de tratamiento para reducir los patógenos a un nivel que no causen riesgo de infecciones, se ha estudiado muy fuertemente, y las plantas de tratamiento de aguas residuales adicionan procesos con cierta regularidad para alcanzar la remoción total de patógenos (WEF, 1992). Los procesos de tratamiento más comunes que se adicionan son cloración, ozonación y desinfección con rayos ultravioleta.

Debido a su bajo costo y alta efectividad, la cloración ha sido el método de desinfección más común durante muchos años. Sin embargo, se han ido detectando efectos negativos en los últimos 20 años. Los cloruros residuales provocan daños permanentes en una gran cantidad de organismos vivos. Además, cuando estos residuos entran en contacto con componentes orgánicos, se forman compuestos más complejos como los trihalometanos y otros compuestos organoclorados que pueden ser cancerígenos. Estos descubrimientos han resultado en adoptar en mayor escala las otras técnicas de desinfección, que son la ozonación y el uso de rayos ultravioleta (Kadlec and Knight, 1996).

Los costos, la operación y el mantenimiento limitan el uso de la ozonación y la luz ultravioleta como técnicas de desinfección, de manera extensiva. Consecuentemente, se han buscado nuevos métodos naturales que sean de bajo costo, y se ha encontrado que los humedales tienen la capacidad de reducir la cantidad de patógenos en diferentes grados de efectividad, aunque la depuración del agua no deberá ser para uso doméstico, si no para otros usos como el riego y la piscicultura.

En diferentes experimentos y proyectos de depuración de agua con humedales artificiales se ha evaluado la calidad de los afluentes y los efluentes en cuanto a concentración de patógenos, y la información obtenida se puede generalizar como indicadores, o parámetros de referencia.

Para caracterizar rutinariamente el grado de contaminación del agua únicamente se realiza la determinación de un grupo de microorganismos que sirva como índice de contaminación fecal, ya que la caracterización completa sería inabordable económicamente. El indicador más comúnmente utilizado es el recuento de coliformes fecales, que en los influentes de los humedales oscila entre 0.8 y 7.0 colonias/100 ml. Los patógenos pueden encontrarse en la fracción de sólidos del influente, o en suspensión en el agua. En el primer

caso, los patógenos pueden separarse del agua por los procedimientos asociados con la remoción de sólidos, es decir, por sedimentación, intercepción y adsorción/absorción. Una vez separados pueden quedar retenidos en las biopelículas o en el sedimento, o bien volver a incorporarse al flujo. En cualquier caso, para sobrevivir tienen que entrar en competencia con los otros organismos no patógenos, y soportar las condiciones ambientales del humedal. Estas condiciones no suelen ser apropiadas para su supervivencia, ya que como organismos intestinales requieren sustratos ricos y altas temperaturas. En consecuencia, la mayor parte de los patógenos no sobrevive por falta de adaptación al medio; otros desaparecen por organismos depredadores, o si están próximos a la superficie del agua, por efecto de la radiación ultravioleta. En cambio, otros patógenos como virus y protozoos que se dispersan por esporas, son más resistentes. Por ello, en función del destino del efluente del humedal puede ser necesario hacer un tratamiento de desinfección antes de su descarga, según el uso que se le vaya dar (Beascochea, 2006).

5.3.2.6 ELIMINACIÓN DE METALES PESADOS

El influente de los humedales artificiales puede contener metales traza que haya que eliminar en el sistema. Algunos metales son necesarios en una cierta cantidad (que depende del metal para el crecimiento de plantas y animales), pero en cantidades altas pueden resultar tóxicos, como por ejemplo, el cromo, cobalto o cobre. Otros, en cambio, no tienen papel biológico y son tóxicos en cantidades muy pequeñas, como el arsénico, mercurio o cadmio. Cuando se sabe fehacientemente que el agua residual tiene contaminación significativa por metales, es necesario llevar a cabo tratamientos específicos de descontaminación, que exceden a los objetivos de los humedales artificiales de tratamiento de aguas residuales de población.

Algunos de esos tratamientos involucran métodos biológicos, y se denominan genéricamente 'biorremediación'.

Precisamente uno de los mecanismos que se utiliza en biorremediación es la extracción por las plantas, aprovechando la capacidad de acumulación que algunas especies vegetales tienen con respecto a algún metal. Los metales que lleva el influente de los humedales artificiales se pueden encontrar en formas solubles o insolubles en los sólidos suspendidos.

En este último caso su separación sucede por procesos parecidos a los que intervienen en la remoción de la contaminación por sólidos. También puede ocurrir su solubilización, dependiendo del pH y del potencial redox.

Los procesos de remoción de metales de tipo físico-químico son: el intercambio catiónico y formación de quelatos con el sustrato o con los sedimentos, la unión con materiales húmicos y la precipitación de sales insolubles como sulfatos o carbonatos. Estos procesos conducen a una acumulación en el fondo del humedal, y por tanto, a la separación de los metales del flujo de agua. Si los sedimentos o el sustrato del humedal se remueven puede ocurrir la resuspensión de los metales y ocasionalmente su solubilización.

Los procesos biológicos de remoción de metales se basan en la extracción por plantas, algas y bacterias. En el caso de las macrofitas, la extracción se realiza a través del sistema radicular, y la capacidad de extracción depende del tipo de metal y de la especie vegetal que se trate. Para similar capacidad de extracción, cuanta más biomasa pueda formar la planta mayor será la cantidad absoluta que se habrá eliminado del sistema.

5.4 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

Aunque se cuenta con información suficiente sobre el funcionamiento de los humedales artificiales, en lo que respecta al diseño de un sistema general de depuración utilizando humedales artificiales, no existe información detallada para las condiciones dominantes en México. Existen muchas variaciones entre un sistema y otro que afecta el desempeño de los humedales artificiales, desde su localización, el origen de las aguas residuales, el clima, la turbulencia del caudal de entrada y la variabilidad estacional. La metodología utilizada en esta investigación fue la propuesta originalmente por Kadlec and Knight, 1996.

En general, el objetivo es imitar y mejorar las funciones que desempeña un humedal natural, confinando los elementos de depuración en una superficie más pequeña y evitando los problemas de mosquitos y malos olores que podrían generarse, y para ello Mitsch (1992) sugiere tomar en cuenta los siguientes aspectos antes de iniciar el diseño de humedales artificiales:

1. Realizar el diseño lo más sencillo posible. Hacer un diseño complejo representa mayor riesgo de fallos en su funcionamiento.
2. El diseño debe presentar la característica de requerir el mínimo mantenimiento de las estructuras. Esto está relacionado con el primer punto, ya que un diseño complejo también requiere personal especializado para operar el tren de tratamiento.
3. El sistema debe estar diseñado para utilizar la mínima cantidad de energía eléctrica. La mayoría de los procesos deben utilizar la fuerza de gravedad.
4. El diseño debe estar preparado para soportar condiciones extremas de clima, tales como tormentas e inundaciones. Esto debe preverse con

anticipación mediante estructuras adicionales como bordos o muros de protección, vegetación biológicamente resistente, etc.

5. El sistema de depuración con todas sus estructuras debe ajustarse a las condiciones del paisaje y no al contrario. Las estructuras deben adaptarse a la topografía del sitio para alterar el medio lo menos posible.
6. Dar el tiempo necesario para la maduración del humedal. Estos no comienzan inmediatamente a presentar sus niveles óptimos de tratamiento, requieren al menos de seis meses para desempeñar sus funciones. Algunas estrategias utilizadas para acelerar el proceso han fallado, por lo que es preferible dar el tiempo necesario para que de manera natural se inicien los procesos de depuración.
7. Tener flexibilidad a la hora de establecer el sistema de tratamiento. Por ejemplo, si la plantación inicialmente establecida llegara a fallar, no significa que el sistema completo ha fallado, simplemente deben implementarse otras alternativas de vegetación para continuar con el proceso.

5.4.1 PLANEACIÓN

La planeación es una fase esencial antes del diseño y la construcción del sistema de depuración. Los humedales pueden diseñarse en distintas formas y con tratamientos preliminares diversos según la meta de depuración. Puede haber muchos sitios disponibles para la construcción de las estructuras y se debe elegir el que mejor se adapte a los objetivos planteados. Existe también una gran diversidad de plantas nativas que pueden elegirse. Cada sitio es único y el diseño de los humedales artificiales debe ser específico para cada sitio.

Con respecto a los objetivos planteados, es determinante definir el uso que se le va dar al efluente de agua tratada, porque en base a ello se plantean las metas de depuración, que son indispensables para realizar los cálculos de diseño. Debe utilizarse las características de un humedal natural como un modelo para el humedal artificial, modificado para cubrir las necesidades de depuración.

En la fase de planeación se incluye la caracterización cuantitativa y cualitativa del agua residual que será tratada. Deberán de conocerse las normas que existan en cuanto a los límites máximos permisibles de contaminantes en el agua para los diferentes usos y para las descargas en cauces. En la planeación se debe considerar el tipo y la configuración de las estructuras, así como los criterios de diseño que se deben cumplir para el detalle ingenieril. El factor económico influye en la superficie que se va utilizar, ya que entre mayor sea el área, se va requerir de más recursos económicos para su construcción. También debe definirse el tipo de material impermeabilizante y los medios de conducción del agua a través del sistema, así como la vegetación.

Un humedal artificial debe estar diseñado para aprovechar las características naturales del sitio y para minimizar su alteración. La forma de los humedales está determinada por la topografía existente, la geología y la disponibilidad de terreno. El número de celdas depende de la topografía, hidrología y de los requerimientos de calidad del agua. También debe preverse la posible ampliación de las estructuras en el futuro.

Un buen diseño se adecúa a las características del sitio y reduce el movimiento de tierra, aumentando el atractivo visual del ambiente. Las celdas y los canales pueden seguir los contornos naturales de la topografía del terreno. Se puede establecer distintos tipos de vegetación en los

alrededores de un humedal artificial para reducir la erosión por movimientos de tierra y para mejorar el aspecto ambiental.

5.4.2 SELECCIÓN DEL SITIO

Una buena ubicación puede ahorrar costos importantes. La selección del sitio debe considerar el uso actual del suelo y la accesibilidad, la disponibilidad de terreno, la topografía del lugar, el tipo de suelo, la presencia de viviendas, los recursos ambientales del sitio y sus alrededores, y los posibles efectos en parcelas o viviendas vecinas. El sitio debe estar situado lo más cerca de la fuente de las aguas residuales en la medida de lo posible, y aguas abajo para que el agua puede moverse a través del sistema por gravedad.

Un sitio ideal para la construcción de humedales artificiales es aquel que:

1. Está convenientemente ubicado muy cerca de la fuente de aguas residuales que serán tratadas
2. Provee un espacio adecuado para la construcción de todos los componentes
3. El terreno tiene una pendiente suave donde el agua puede fluir por gravedad
4. Presenta un tipo de suelo arcilloso lo suficientemente compacto para minimizar las filtraciones
5. No se encuentra en un área inundable
6. La superficie de terreno no contiene especies amenazadas o en peligro de extinción
7. La superficie del terreno no contiene monumentos históricos, o viviendas habitadas muy cercanas.

5.4.2.1 USO DEL SUELO Y ACCESIBILIDAD

A pesar de que el diseño sea el adecuado, siempre se corre el riesgo de los malos olores y los insectos, es por eso que los humedales deben colocarse lo más lejos de las viviendas como sea posible. El sitio debe ser accesible para el personal, a los vehículos de reparto y al equipo para construcción y mantenimiento.

Para determinar si un lugar es apropiado para construir un humedal artificial, se debe consultar primero con los residentes de la zona para evaluar el cambio de uso de suelo y llegar a un consenso general, en el caso de que esté siendo utilizado para algún fin.

También debe considerarse si existe la necesidad de ampliar en un futuro las instalaciones de los humedales artificiales, para satisfacer las demandas de tratamiento, por posibles aperturas de nuevos núcleos urbanos o industrias que se conectarán a la red de drenaje. En ese caso, se debe elegir un área donde se tenga las posibilidades de ampliación (DuPoldt, *et al.*, 2000).

5.4.2.2 TOPOGRAFÍA

En la topografía se debe considerar la forma del terreno y su tamaño. A pesar de que un humedal artificial puede ajustarse a casi cualquier condición topográfica, si se tiene la posibilidad de elegir un terreno con pendiente uniforme, el diseño se simplifica y se minimizan los costos (DuPoldt, *et al.*, 2000).

Debido a que la mejor ubicación para un humedal artificial son las zonas bajas y con pendiente uniforme donde el agua puede fluir por gravedad, se

deberá realizar las investigaciones pertinentes para determinar si es un área inundable, o si el terreno forma parte de un humedal natural.

5.4.3 ASPECTOS HIDROLÓGICOS DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES

En una zona provista de vegetación, existe un balance de humedad que responde a la parte del ciclo hidrológico que se desenvuelve en la fase de intercepción de la precipitación por la vegetación presente.

El balance hídrico está muy ligado al balance energético, pues participan en él, procesos que consumen energía como la evaporación. El contenido de agua en el suelo o sustrato, afecta a la forma en que se reparte y se utiliza el flujo de energía que alcanza la superficie, influyendo ese flujo tanto sobre el estado del agua como sobre sus movimientos. Por ello, para analizar el balance hídrico dentro del humedal, se deben tener en cuenta los principios de conservación de la materia y la energía (Seoanez, 1999).

Desde el punto de vista de la ecología vegetal, el balance hídrico sirve para analizar los intercambios atmósfera-suelo y vegetación, y poder evaluar así las fluctuaciones de la reserva de agua en el sistema. El balance hídrico debe considerar en este caso, que el inventario de los aportes y de las pérdidas en un periodo determinado debe ser igual a la variación del volumen de agua retenido en el sustrato durante ese mismo periodo (Seoanez, 1999). Y debe ser la misma cantidad de agua que debe salir del sistema, para conservar un nivel de flujo subsuperficial.

Los intercambios de agua ocurren de dos formas: entre el sistema suelo y vegetación y entre el sistema en general con el exterior. Los intercambios de agua hacia el exterior y hacia el interior del humedal siguen los mismos principios, sean de flujo superficial o de flujo subsuperficial. El flujo

dominante de entrada al humedal el agua residual. Sin embargo, bajo algunas condiciones, otras fuentes de agua resultan importantes. La dinámica global del agua dentro del humedal está dada por la Ecuación 1:

$$Q_a + Q_c + P.A - ET \times A - Q_i - Q_e = \frac{dV}{dt} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:

Q_a = Gasto del afluente de agua residual ($m^3 d^{-1}$)

Q_c = Captación de escurrimientos ($m^3 d^{-1}$)

P = Cantidad de precipitación (mm)

A = Área del humedal artificial (m^2)

ET = Evapotranspiración ($m^3 d^{-1}$)

Q_i = Infiltración ($m^3 d^{-1}$)

Q_e = Gasto del efluente ($m^3 d^{-1}$)

V = Agua almacenada en el humedal (m^3)

t = Tiempo (d)

5.4.3.1 COMPONENTES DEL BALANCE DE MASAS EN EL HUMEDAL

El balance de masas ocurre cuando se lleva a cabo una dinámica de entradas y salidas de agua al sistema de humedales artificiales. Los componentes que influyen en el balance de masas se señalan en la Figura 8.

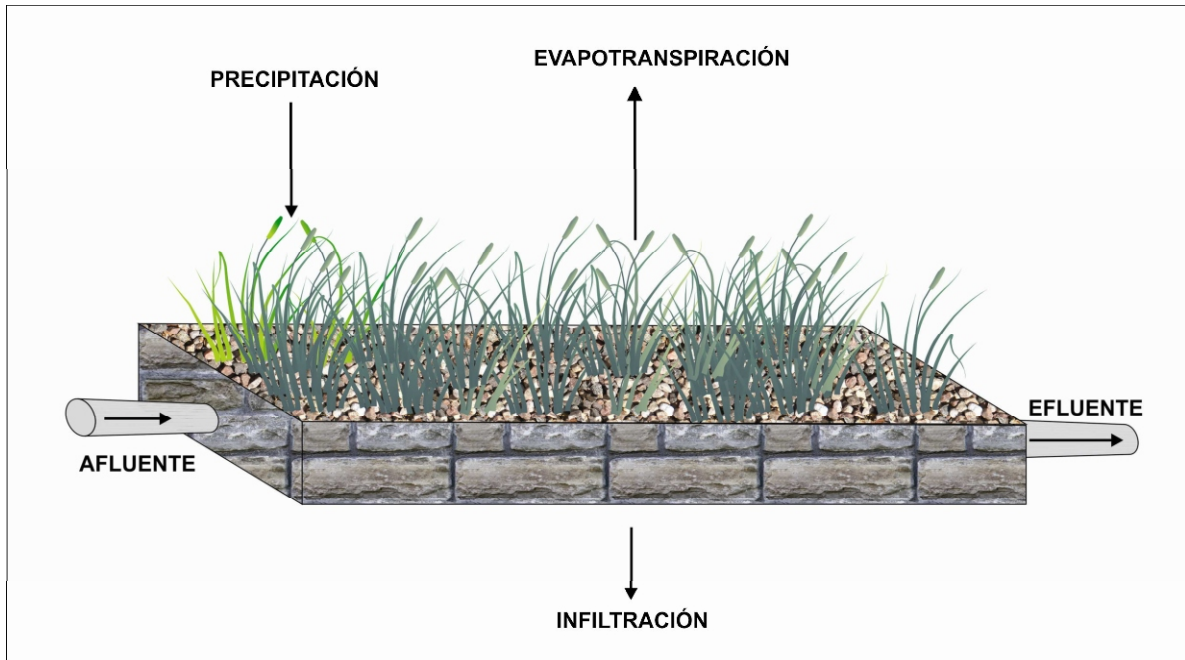


Figura 8. Componentes básicos del balance de masas en el humedal

ESCURRIMIENTOS SUPERFICIALES

La entrada de agua por escurrimientos superficiales se puede analizar desde dos puntos de vista: el primero tiene que ver con los escurrimientos que son producto de las precipitaciones pluviales y que se incorporan directamente a las redes de drenaje.

El segundo punto de vista solamente aplica para los humedales artificiales de flujo libre, o también llamados pantanos artificiales. En ellos existe un área de captación de escurrimientos, la cual es la superficie que se encuentra delimitada por el borde construido para establecer el humedal (Figura 9).

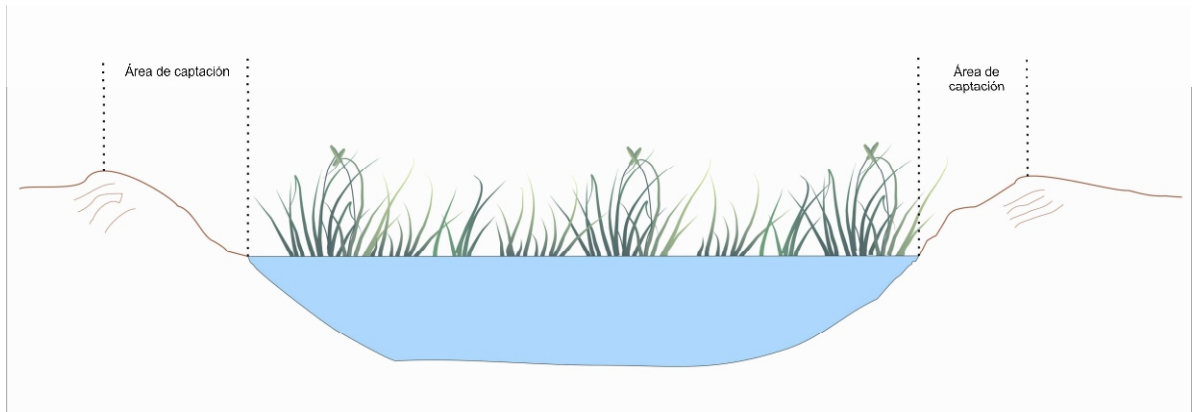


Figura 9. Área de captación de escurrimientos en un sistema de pantanos artificiales

En los humedales de flujo subsuperficial, las celdas se construyen de concreto o geomembrana de polietileno y generalmente se deja un bordo que sobresale de la superficie del terreno en unos 15 a 20 cm. Esto se realiza con el objetivo de evitar el paso de los escurrimientos superficiales hacia el interior del sistema. En los humedales de flujo libre que no se construye un bordo para evitar el paso de los escurrimientos, la fórmula para calcular la cantidad de escurrimientos que entran al sistema es la que se muestra en la Ecuación 2:

$$Q_c = \psi \times P \times A_c \quad \text{Ecuación 2}$$

Dónde:

- Q_c = Cantidad de escurrimiento ($m^3 d^E$)
- A_c = Área de captación del humedal (m^2)
- Ψ = Coeficiente de escurrimiento
- P = Precipitación pluvial (m)

PRECIPITACIÓN

La cantidad de precipitación que interesa en el diseño de un humedal artificial es aquella que cae directamente dentro del área de las celdas o

humedales artificiales, ya que el agua que proviene de los escurrimientos superficiales es aislada por los bordos o muros que delimitan las celdas. La precipitación es importante en el diseño, especialmente para aquellas áreas donde llueve mucho o caen nevadas. El agua pluvial en grandes cantidades puede diluir los contaminantes y disminuir su concentración. Además, existe el riesgo de que las celdas lleguen a colmatarse cuando ocurren eventos extremos de lluvia. Por estas razones, es muy importante incluir la precipitación dentro del balance de masas.

EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración en un humedal artificial es la combinación de las pérdidas de agua por la evaporación y la transpiración de las plantas. En los humedales de flujo libre superficial, la evapotranspiración puede alcanzar hasta un 50 por ciento en horas pico, lo cual ocurre durante el día. Para el caso de los humedales de flujo subsuperficial, es más importante la transpiración de las plantas que la evaporación, lo cual depende del tipo de vegetación implantada.

INFILTRACIÓN

En un humedal de flujo libre superficial, las pérdidas por infiltración son muy altas, y depende del tipo de suelo en el que se encuentre implantada la vegetación. Las pérdidas de agua por infiltración en los humedales de flujo subsuperficial son mínimas porque se utiliza un medio impermeable como la geomembrana de polietileno o celdas de concreto.

5.4.4 COMPONENTES BÁSICOS EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO CON HUMEDALES ARTIFICIALES

Un sistema de tratamiento de aguas residuales que utiliza humedales artificiales como componente principal para la depuración, requiere

componentes adicionales para lograr la eficiencia requerida. Cuanto mayor sea la calidad del agua exigida en el efluente por la reutilización que se le vaya a dar al agua tratada, mayor es la necesidad de implementar tratamientos adicionales al sistema. Sin embargo, los dispositivos mínimos requeridos por un sistema de humedales artificiales son un desarenador y un sedimentador para dar mayor vida útil a las celdas de tratamiento. Al dispositivo desarenador se le conoce como pretratamiento y el sedimentador está dentro de los procesos de tratamiento primario. Para este trabajo en particular, se realizó el diseño del pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario dividido en dos fases para una mejor calidad del efluente.

Los elementos que se tomaron en cuenta en el diseño y construcción de los humedales son principalmente: la impermeabilización de la capa superficial del terreno, la selección del sustrato, el establecimiento de la vegetación, así como las estructuras de distribución y recolección.

5.4.4.1 ESTRUCTURAS DE DISTRIBUCIÓN Y RECOLECCIÓN

El objetivo de estos sistemas es fundamentalmente garantizar una buena distribución y recolección del agua. Si el caudal no se reparte equitativamente en todo el ancho del sistema se generarán zonas muertas, o cortocircuitos hidráulicos, y además, se generará mayor riesgo de saturación en la zona donde se vierta mayoritariamente el agua.

El caudal de agua procedente del tratamiento previo deberá dividirse equitativamente entre el número de celdas que tenga el sistema. Esto se realiza mediante dispositivos de distribución, también conocidos como arquetas de distribución. Estas arquetas pueden ser construidas mediante elementos prefabricados o pueden ser construidas en sitio.

Como norma general las arquetas deben ser suficientemente grandes para permitir de forma cómoda su limpieza. La tapa deberá ser metálica o de polietileno, y perforada para permitir la expulsión de gases y una rápida inspección visual, además debe ser resistente al ataque de ácidos.

Las tuberías de un sistema de humedales lógicamente deben tener un diámetro que permita transportar el caudal necesario. Como norma general las tuberías deben funcionar como máximo con una altura de lámina de agua igual a un 70E75% del diámetro de la tubería, para lograr que el flujo sea en lámina libre. Los diámetros utilizados por tanto varían en función del caudal, siendo recomendable que la velocidad de circulación no sea mucho menor de 1 m/s. Aunque depende del tamaño de cada instalación, en general se intentará utilizar diámetros de como mínimo 100 mm (para evitar obstrucciones). Sólo en instalaciones muy pequeñas (saneamiento domiciliario) es aconsejable usar diámetros menores.

5.4.4.2 IMPERMEABILIZACIÓN

La impermeabilización de la celda tiene como objetivo asegurar la contención de las aguas en el interior, evitando infiltraciones que puedan contaminar las aguas subterráneas. La impermeabilización se realiza en los taludes de la zona de entrada, de salida, de los lados laterales y en el fondo de la celda.

En suelos que tienen altos contenidos de arcilla, es posible realizar únicamente una compactación. En otros casos, se pueden realizar aplicaciones de arcilla o colocar geomembranas. Otra opción es impermeabilizar con concreto. Cada una de estas alternativas deberá elegirse según las condiciones y la ubicación del terreno, buscando siempre la mejor alternativa económica, pero sobre todo que funcione correctamente.

Antes de realizar cualquier tipo de impermeabilización se debe realizar una limpieza general del terreno. Es indispensable efectuar una nivelación cuidadosa y el compactado de la superficie del terreno. Los humedales artificiales de flujo subsuperficial, así como los de flujo libre necesitan una ligera pendiente para asegurar el drenaje correcto, por lo que se debe realizar la nivelación en una sola dirección para evitar encharcamientos.

5.4.4.3 SUSTRATO O MEDIO DE SOPORTE

El medio granular o sustrato del humedal está delimitado por las zonas de entrada y salida. Éste debe estar limpio (exento de partículas finas) ser homogéneo, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo. Además, debe permitir un buen desarrollo de las plantas y de la biopelícula. La grava con diámetros promedio de alrededor de 5E6 mm ofrece muy buenos resultados.

Se recomienda que el espesor de la capa de grava sea de 60 cm, ya que la mayoría de la vegetación utilizada en los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal, no supera esa profundidad de raíces. Además, se el diseño hidráulico debe permitir que el flujo del agua quede aproximadamente 5 cm por debajo de la superficie del humedal, para garantizar el flujo subsuperficial.

5.4.4.4 VEGETACIÓN

En general se obtienen buenos resultados con plantaciones de carrizo (*Phragmites australis*), tule (*Typha latifolia* o *T. angustifolia*) o juncos (*Scirpus lacustris*). No es necesario utilizar especies diferentes en una misma instalación ya que la eficiencia del sistema no se aumenta significativamente.

En Europa la planta más utilizada es el carrizo, con densidades de plantación de 3 ejemplares por metro cuadrado.

En México se han probado plantaciones de Alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*), la cual reporta beneficios adicionales por su valor económico; sin embargo, presenta la desventaja de ser muy susceptible a las heladas y algunas plagas y enfermedades, por lo que si se elige esta especie, se deberá tomar en cuenta que los cuidados serán mayores. Otra especie que ha resultado exitosa es el papiro (*Cyperus papyrus*), que es ornamental y muy eficiente para su utilización en humedales artificiales.

5.4.5 DISEÑO DEL PRETRATAMIENTO

De manera general, para que un sistema de tratamiento mediante humedales artificiales funcione adecuadamente, debe contar con 3 fases de tratamiento: un tratamiento preliminar, tratamiento primario y el tratamiento secundario que son los humedales artificiales propiamente. Dependiendo del uso de la descarga de agua tratada, en algunas ocasiones se realiza un tratamiento terciario que puede realizarse con otras celdas de humedales artificiales o con otros mecanismos de depuración

Al pretratamiento y al tratamiento primario se les conoce conjuntamente como tratamientos previos porque se realizan antes de la llegada a las celdas de los humedales artificiales de flujo subsuperficial. Estos tienen el objetivo principal de reducir al mínimo los materiales o partículas que ocasionan la colmatación de los humedales, así como el desgaste y obturación de los dispositivos de distribución del agua.

Con la construcción de humedales se busca reducir costos y utilizar la menor cantidad de energía, por lo que en los tratamientos previos se debe

buscar reducir la utilización de equipos electromecánicos. Los procesos utilizados varían de acuerdo a la calidad del agua que se va a tratar, los costos de construcción, la topografía y el área disponible.

El pretratamiento está conformado por todos aquellos procesos que se sitúan al inicio del sistema de depuración, y cuya función esencial consiste en eliminar sólidos gruesos (piedras, ramas, plásticos, etc.), grasas y arenas que pueden dañar o interferir en los procesos posteriores (García, 2006).

En depuradoras de comunidades pequeñas (menos de 2,000 habitantes) la forma más habitual de realizar el pretratamiento es mediante un canal, donde se encuentran sucesivamente, una zona donde se ubica un aliviadero de exceso de caudal, otra zona en la que se sitúa una reja de gruesos y/o una reja de finos, y una zona de desarenado. Opcionalmente, se puede tener un desengrasador al final del pretratamiento, en caso de que el agua tenga un alto contenido de aceites y grasas. De lo contrario, esta última operación se realiza en el propio tratamiento primario, mediante una fosa séptica o tanque Imhoff (García, 2006).

Los procedimientos de separación de material muy grueso (rejillas gruesas y finas) se realizan o están relacionados a las captaciones. Se considera como pretratamientos y acondicionamientos previos en la planta de tratamiento, a unidades como desarenadores. En estas unidades se considera que las partículas, aun siendo de diferentes tamaños, se comportan como partículas discretas y aisladas.

El desarenador tiene por objeto separar del agua cruda la arena y partículas en suspensión gruesa, con el fin de evitar se produzcan depósitos en las obras de conducción, proteger las bombas de la abrasión y evitar sobrecargas en los procesos posteriores de tratamiento. El desarenado se

refiere normalmente a la remoción de las partículas superiores a 0,2 mm (UNATSABAR, 2005).

Existen diferentes tipos de desarenadores, los cuales se construyen de acuerdo al criterio del diseñador. Los criterios que se utilizan para elegir un tipo de desarenador adecuado para un sitio determinado son:

La disponibilidad de recursos económicos. Es sin duda la mayor limitante a la hora de elegir los componentes del tratamiento.

El espacio disponible. Da la pauta para elegir la forma del componente. La capacidad y disponibilidad de la comunidad para operar el sistema. Generalmente en comunidades rurales se utilizan los dispositivos más sencillos que existen, requiriendo la mínima operación. Solo en los casos en que el agua tratada se utiliza para una actividad económica redituable, se puede asignar a una persona capacitada para operar un dispositivo más complejo, que por consecuencia, tiene mayor efectividad.

A pesar de que hay una cierta tendencia a diseñar los sistemas de humedales contruidos de pequeños municipios sin equipos para la medición de caudal, es más recomendable contar con uno. La falta de estos equipos produce una gran incertidumbre sobre las cargas hidráulicas y contaminantes reales, lo que no permite diagnosticar el estado de la instalación ni su funcionamiento. La medición de caudal se puede realizar entre el pretratamiento y el tratamiento primario. Como sistema de medición se suelen usar canales Venturi o Parshall, con algún dispositivo para registrar la altura de agua en el canal.

5.4.6 DISEÑO DEL TRATAMIENTO PRIMARIO

El tratamiento primario tiene como objetivo reducir la materia en suspensión mediante procesos de sedimentación. La sedimentación es un proceso muy importante. Las partículas que se encuentran en el agua pueden ser perjudiciales en los sistemas o procesos de tratamiento ya que elevadas turbiedades inhiben los procesos biológicos y se depositan en el medio filtrante causando elevadas pérdidas de carga y deterioro de la calidad del agua efluente de los humedales. Es un proceso clave para reducir o mitigar el proceso paulatino de colmatación de los sistemas de humedales.

Normalmente se utilizan fosas sépticas o tanques Imhoff. En algunos lugares también se utilizan técnicas más avanzadas, como los reactores anaeróbicos de flujo ascendente. También se pueden instalar lagunas anaeróbicas en el caso de que el núcleo de población se encuentre suficientemente lejos del sistema de tratamiento (dos kilómetros o más), y dependiendo de los vientos predominantes, de forma que se mitigue la llegada de olores a la población.

Las fosas sépticas se suelen emplear en sistemas de saneamiento autónomo o en núcleos muy pequeños (<200 habitantes). Los tanques Imhoff se recomiendan para núcleos con 200E500 habitantes. Para poblaciones mayores se utilizan tanques Imhoff en paralelo o de mayor tamaño. También se pueden utilizar fosas en paralelo (García, 2006).

Las fosas permiten la sedimentación de la materia en suspensión y su acumulación en el fondo en forma de lodos que se van descomponiendo por vía anaeróbica. A este proceso de descomposición se le suele denominar digestión y permite reducir el volumen de lodos gracias a la producción de gases, principalmente dióxido de carbono y metano. Las burbujas de gas pueden atrapar sólidos haciéndolos flotar y dando lugar con el tiempo a una

capa de espuma bastante espesa. La falta de esta capa indica un mal funcionamiento de la fosa.

Aunque hay muchas variantes, las fosas más habituales suelen tener dos o más cámaras cuyo fin es la laminación de los caudales entrantes, de modo que se evite la resuspensión de los sólidos sedimentados. La mayor parte de los sólidos sedimentan en la primera cámara y por tanto es donde hay más lodos.

En las siguientes cámaras se produce sedimentación y almacenamiento de los lodos que rebosan de la primera cámara. Los gases producidos en la fosa se emiten a través de chimeneas. De esta manera se evitan malos olores, que pueden ser especialmente molestos en el caso de saneamiento autónomo. Adicionalmente, las fosas están dotadas de aberturas que permiten su inspección y vaciado.

Para el correcto funcionamiento de una fosa séptica se deben tener en cuenta los siguientes condicionantes:

Un contenido de nitrógeno amoniacal menor de 200 mgL^{E1}, de forma que no se inhiba el metabolismo bacteriano.

Un volumen de agua de dilución superior a 40 L hab día.

El uso de un desengrasador cuando la concentración de grasas sea mayor a 150 mgL^{E1}, evitando que pasen a los humedales y obturen así el medio granular.

Debe haber un resguardo libre sobre el nivel de agua, generalmente de 0,3 m.

En las fosas enterradas, la capa de tierra no debe ser superior a 0,4 m para permitir un acceso fácil (Hernández, A., Hernández, A., y Galán, P., 1996 citado por García, 2006).

En el Cuadro 11 se muestran los valores recomendados de los parámetros de diseño de fosas sépticas:

Cuadro 11. Valores recomendados de los parámetros de diseño de fosas sépticas:

Parámetro	Valor recomendado
Volumen mínimo del agua + fangos	Q diario < 6m ³ /d.....V= 1,5 T Q diario 6 < Q diario < 40m ³ /d.....V= 4,5m ³ +0,75 Q diario Q diario > 40 m ³ /dTanque Imhoff
Altura útil del agua	Superior a 1 m
Resguardo (material flotante)	Superior a 0,25 m
Velocidad de acumulación de lodos	0,5 L/hab/d
Periodicidad de vaciado de lodos	2E3 años
Compartimientos	2 (2/3 del volumen el primero y 1/3 el segundo) ó 3 (1/2, 1/4 y 1/4 ó, 1/3, 1/3, 1/3)
Tiempo de retención	< 10 m ³3 días > 10 m ³2 días mínimo: 1 día
Dispositivo de entrada	Tubería sumergida 0,30 m
Dispositivo de salida	Tubería sumergida mínimo 0,30 m y/o 40% de la altura del agua
Dimensiones (A=ancho, L=largo)	4TA > L > 2TA

Fuente: Imhoff, 2007

5.4.7 DISEÑO DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO

Como ya se ha indicado, el tratamiento secundario es el que se realiza dentro de las celdas de humedales construidos. Su construcción requiere de un diseño especial. Los humedales que se describen en este estudio comprenden únicamente los humedales de flujo subsuperficial horizontal. Es importante mencionar que cuando se construye una sola celda se elimina la materia en suspensión y la Demanda Bioquímica de Oxígeno de forma muy eficaz y por debajo de los límites permitidos en la Norma Oficial Mexicana para descargas

de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Si se requiere reducir el nitrógeno de forma significativa y reducir el fósforo y una buena cantidad de microorganismos fecales, se requieren de dos o más celdas. Si se necesita eliminar el fosforo y la contaminación fecal, entonces se necesitan de procesos adicionales.

Dentro del diseño de los HFSS, se debe considerar varios parámetros que incluyen: tiempo de retención hidráulica, profundidad y geometría del humedal (ancho y longitud), así también la concentración de DBO₅, Sólidos Suspendedos, Nitrógeno y Fósforo, considerando que el tamaño de los HFSS es determinado por el contaminante que requiere la mayor área para su remoción. En el Cuadro 12 se presentan algunos parámetros de diseño para HFSS.

Cuadro 12. Parámetros indicativos para el diseño de HFSS

Parámetro de Diseño	Unidad	HFSS
Tiempo de retención hidráulica	d	3 – 15
Profundidad del humedal	m	0.30 – 0.90
Carga hidráulica	m ³ /m ² .d	0.014 – 0.046
Superficie específica	ha/(10 ³ m ³ /d)	7.1 – 2.15
Pendiente	%	< 5

Fuente: Folleto informativo de Tecnologías de aguas residuales EPA, 1996

Así también, se debe considerar el material filtrante dentro del lecho, dadas las características de este de acuerdo con su granulometría, como se señala en el Cuadro 13.

Cuadro 13. Características de sustratos para la construcción de humedales artificiales

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Porosidad (n)	Conductividad Hidráulica (k) m³/m².d
Arena gruesa	2	28E32	100 – 1000
Arena gravosa	8	30E35	500 – 5000
Grava fina	16	35E38	1000 – 10000
Grava media	32	36E40	10000 E 50000
Roca gruesa	128	38E45	50000 E 250000

Fuente: Depuración de Aguas Residuales con Humedales Artificiales (Lara J., 1999)

Algunas especies probadas para el tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales se señalan en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Características típicas de especies vegetales para HFSS

Especie vegetal	Profundidad de la raíz (cm)
Scirpus	30
Typha	60
Phragmites	>75

Fuente: Manual de Fitodepuración, Beascochea et al., 2009

5.4.7.1 DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DEL HUMEDAL

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 (Lara, 1999).

La siguiente es la ecuación básica de los reactores de flujo a pistón (Ecuación 3):

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t} \quad \text{Ecuación 3)}$$

Dónde:

C_e = Concentración del contaminante en el efluente (mg L^{-1})

C_o = Concentración del contaminante en el afluente (mg L^{-1})

K_T = Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura (d^{-1})

t = Tiempo de retención hidráulica (d)

El tiempo de retención hidráulica puede ser calculado con la Ecuación 4:

$$t = \frac{LWyn}{Q} \quad \text{Ecuación 4)}$$

Dónde:

L = Largo de la celda del humedal (m)

W = Ancho de la celda del humedal (m)

y = Profundidad de la celda del 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 de flujo libre, y el medio, raíces y otros sólidos hacen lo mismo en los de flujo subsuperficial. La porosidad es un porcentaje expresado como decimal.

Q = Caudal medio a través del humedal (m^3/d)

El caudal medio en el humedal se puede calcular con la ecuación 5:

$$Q = \frac{Q_e + Q_o}{2} \quad \text{Ecuación 5)}$$

Dónde:

Q_e = Caudal de salida (m^3/d)

Q_o = Caudal de entrada (m^3/d)

Puede ser necesario calcular el caudal medio mediante la anterior expresión, para compensar las pérdidas o ganancias causadas por filtración o precipitaciones a lo largo del flujo del agua residual a través del humedal. Un diseño conservador debe asumir que no existen pérdidas por filtración y adoptar una estimación razonable de las pérdidas por evapotranspiración y las ganancias por lluvias de los registros históricos del lugar, por cada mes de 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 preliminar suponer que los caudales de entrada y salida son iguales (Lara, 2009).

De esta manera, es posible determinar el área superficial del humedal combinando las ecuaciones 4 y 5.

$$A_s = LW = \frac{Q \times \ln \frac{C_o}{C_e}}{K_T \times \eta} \quad \text{Ecuación 6)}$$

Dónde:

A_s = Área superficial del humedal (m^2)

El valor de K_T para las ecuaciones 3 y 6 depende del contaminante que se quiere eliminar y de la temperatura. Como las reacciones biológicas del tratamiento dependen de la temperatura, es necesario para un buen diseño, estimar la temperatura del agua en el humedal.

El diseño hidráulico de un humedal es tan importante como el de los modelos que calculan la remoción de contaminantes, ya que estos modelos están basados en que se asume un flujo a pistón con un flujo uniforme a través de la sección del humedal y con mínimos flujos preferenciales. Muchos sistemas existentes que se diseñan sin tener la suficiente consideración a los requerimientos hidráulicos, llevan a obtener condiciones no esperadas de flujo y en consecuencia condiciones adversas sobre el rendimiento esperado (Craig, 1999).

Un diseño válido requiere tomar en cuenta consideraciones hidráulicas y térmicas, así como la cinética de remoción. El procedimiento es usualmente iterativo y requiere asumir la profundidad del agua y la temperatura para resolver las ecuaciones cinéticas. De esta manera, se puede predecir el área de humedal requerida para la remoción de un contaminante. El contaminante que requiera mayor área para su remoción será el factor limitante en el diseño y controlará el tamaño del humedal. Una vez que se conoce el área, se pueden usar las ecuaciones térmicas para estimar la temperatura teórica del agua en el humedal. Si este cálculo no coincide con el dato asumido inicialmente, se requerirán posteriores iteraciones hasta que estas dos temperaturas converjan. El último paso es usar los cálculos hidráulicos apropiados para determinar la forma final (relación largo: ancho) y la velocidad de flujo.

Una vez determinadas las dimensiones del sistema se divide la superficie en un número adecuado de celdas en serie. Aunque las dimensiones del sistema no hagan que sea preciso dividirlo en celdas, se recomienda tener como

mínimo 2 celdas para asegurar una mejor distribución uniforme del agua residual en todo el lecho, así como para dar flexibilidad al sistema durante su explotación. Esta configuración durante operaciones de mantenimiento o reparación de averías permite que el sistema siga operando. Sólo en sistemas muy pequeños como saneamientos autónomos (donde se puede controlar bien la producción de agua residual) es admisible construir sistemas con una única celda (García, 2006).

5.4.7.2 DISEÑO 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. En un HFSS este concepto es necesario para asegurar que las condiciones de flujo subsuperficial se mantengan en circunstancias normales durante el periodo de funcionamiento del sistema. Esto solo es posible a través de un cuidadoso diseño hidráulico y unos métodos apropiados de construcción.

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 HFSS esta resistencia es impuesta por las raíces de las plantas y los sólidos acumulados. 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 construcción, es proveer al humedal de un fondo con inclinación que sea suficiente para permitir un drenaje completo cuando sea necesario y una salida de altura variable con el nivel de 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 o mayores, asegurarían un flujo a pistón, pero tienen el inconveniente de que en la parte alta se desbordan debido al incremento en la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de la vegetación, principalmente en sistemas de flujo libre; por lo tanto, relaciones de 1:1 hasta aproximadamente 3:1 o 4:1 son aceptables. Los cortocircuitos hidráulicos 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 sin vegetación para la redistribución del flujo.

La ley de Darcy describe el régimen de flujo en un medio poroso que es lo generalmente aceptado para el diseño de humedales de FSS usando suelo y arena como medio del lecho. El mayor nivel de turbulencia en el flujo ocurre en lechos que usan piedra muy gruesa; entonces la ecuación de Ergun es la más apropiada (Lara, 2009).

La ley de Darcy no es estrictamente aplicable a los humedales de flujo subsuperficial dadas las limitaciones físicas en el actual sistema. Este 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 la realidad puede variar por la precipitación, evaporación y filtración; así como por los cortocircuitos hidráulicos en el flujo, que pueden llegar a presentarse por una desigual porosidad o mala construcción. Si se utiliza una grava de tamaño pequeño o medio, si el sistema está apropiadamente construido para minimizar los cortocircuitos hidráulicos y si las pérdidas y ganancias del sistema están adecuadamente calculadas, la ley de Darcy puede dar una aproximación razonable a las condiciones hidráulicas en el humedal de flujo subsuperficial (Lara, 2009).

Y dado que:

$$v = k_s \cdot s \quad \text{Ecuación 7}$$

$$v = \frac{Q}{W \cdot y} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$Q = k_s \cdot A_c \cdot s \quad \text{Ecuación 9}$$

Dónde:

Q = Caudal promedio a través del humedal [m^3 / día, $(Q_o + Q_e) / 2$]

K_s = Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo ($m^3/m^2/d$)

A_c = Área de la sección transversal perpendicular al flujo (m^2)

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 el ancho mínimo de una celda de humedal de flujo subsuperficial que sea compatible con el gradiente hidráulico seleccionado para el diseño, partiendo de:

$$s = \frac{Q}{L \cdot W \cdot y} = \frac{k_s \cdot A_s}{L \cdot W \cdot y} \quad \text{Ecuación 10}$$

Dónde:

W = Ancho de una celda del humedal (m)

A_s = Área superficial del humedal (m^2)

L = Longitud de la celda del humedal (m)

m = Pendiente del fondo del lecho (% , expresado como decimal)

y = Profundidad del agua en el humedal (m)

$$W = \frac{1}{y} \frac{Q A_s^{0.5}}{m k_s} \quad \text{Ecuación 11}$$

El área superficial del humedal (A_s) se determina en primer lugar, usando el modelo de diseño limitante para remoción de contaminantes. La Ecuación 11 permite calcular directamente el ancho mínimo absoluto aceptable de una celda de humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado.

Otras combinaciones de ancho y gradiente hidráulico pueden ser posibles a fin de ajustar el diseño a las condiciones topográficas existentes en el sitio propuesto. El valor de m en la Ecuación 11 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 realmente recomendable tomar un valor de la conductividad hidráulica efectiva (k_s) 1/3 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 del 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 menor a 10. El número de Reynolds es función de la velocidad de flujo, del tamaño de los espacios vacíos y de la viscosidad cinemática del agua, como se muestra en la Ecuación 12.

En muchos casos N_R será mucho menor de 1, en cuyo caso el flujo laminar impera y la ley de Darcy es válida. Si el flujo es turbulento, entonces la conductividad hidráulica será significativamente menor que la predicha por la ley de Darcy.

$$N_R = \frac{v D}{\tau} \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

- N_R = Número de Reynolds (adimensional)
- v = Velocidad de Darcy (de la ecuación 8) (m/s)
- D = Diámetro de los vacíos del medio, se toma igual al tamaño promedio del medio (m)
- τ = Viscosidad cinemática del agua (m²/s)(Ver Cuadro16)

La conductividad hidráulica (k_s) en las ecuaciones 9 y 11 varía directamente con la viscosidad del agua, que a su vez es función de la temperatura del agua.

$$\frac{k_{sT}}{k_{s20}} = \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \quad \text{Ecuación 12}$$

Dónde:

- k_s = Conductividad hidráulica a una temperatura T y 20°C
- j = Viscosidad del agua a una temperatura T y 20°C(Ver cuadro 15)

Cuadro 15. Propiedades físicas del agua

Temperatura (°C)	Densidad (kg/m³)	Viscosidad dinámica x10³ (N.s/m²)	Viscosidad cinemática x 10⁶ (m²/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

Fuente: Hernández, 1996

Los efectos de la viscosidad pueden ser significativos en climas fríos, con humedales de flujo subsuperficial operando durante los meses de invierno. Por ejemplo, la conductividad hidráulica de un agua a temperatura de 5°C podría ser el 66% de la de a 20°C. Este efecto ya está considerado en la recomendación previa del factor de seguridad (se debe diseñar con k_s 1/3 del k_s efectivo. La conductividad hidráulica (k_s) en las ecuaciones 9 y 11 también varía con el número y tamaño de vacíos en el medio usado para el humedal. El Cuadro 16 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.

Cuadro 16. Características típicas de los medios para humedales de flujo subsuperficial

Tipo de material	Tamaño efectivo D₁₀ (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, k_s
Arena gruesa	2	28E32	100E1,000
Arena gravosa	8	30E35	500E5,000
Grava fina	16	35E38	1,000E10,000
Grava media	32	36E40	10,000E50,000
Roca gruesa	128	38E45	50,000E250,000

Fuente: Lahora, 2000

Es aconsejable que la porosidad (n) del medio también se mida en el laboratorio antes de hacer el diseño final. Esta puede ser medida usando el procedimiento estándar de la ASTM (American Society for Testing and Materials). Los valores de porosidad para estos tipos de suelo y grava están publicados en muchas referencias, pero pueden ser mucho menores que los del cuadro anterior, ya que pueden estar dados para depósitos naturales de suelo y grava que han pasado por un proceso de consolidación natural y, por tanto, esos valores no son los apropiados para el diseño de un humedal de flujo subsuperficial. Es posible usar una relación basada en la ecuación de Ergun, para estimar la conductividad hidráulica cuando se usan gravas gruesas o rocas.

$$k_s \approx n^{3.7}$$

Ecuación 13

Esta ecuación, así como los valores del Cuadro 17 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 (3:1 para lechos de 0.6 m de profundidad, 075:1 para lechos de 0.3 m de profundidad). En Europa se han construido sistemas de flujo subsuperficial usando suelo en lugar de grava, con pendientes del 8% para asegurar un adecuado gradiente hidráulico y continúan experimentando flujo superficial causado por un inadecuado factor de seguridad en el diseño.

6 MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio del proyecto está ubicado en la comunidad de Tlapanaloya, municipio de Tequisquiatic, Estado de México, en los límites con el municipio de Hueyepoxtla. Las aguas residuales provienen de la Cabecera Municipal de Hueyepoxtla, Estado de México y las coordenadas geográficas en el punto de descarga son $19^{\circ}54'35.73''$ de latitud Norte y $99^{\circ}04'56.52''$ de longitud Oeste (Figura 10).



Figura 10. Ubicación del sitio de construcción del humedal

6.1 ANÁLISIS CLIMÁTICO

Debido a que las variables climatológicas afectan directamente el desempeño de los humedales artificiales y son tomados en cuenta para el diseño, es muy importante realizar un análisis del clima de la zona.

Para realizar este análisis, se utilizaron los datos de la estación climatológica de Tlapanaloya, con clave 0015281, ubicado en las coordenadas de latitud norte 19.33901 y E99.10032 de longitud oeste. Esta es la estación más cercana al proyecto y tiene condiciones similares en cuanto a clima y vegetación.

La fuente de obtención de los datos fue el Extractor Rápido de Información Climática (ERIC III) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). En primer lugar, con los datos de precipitación y temperatura, se elaboró un climograma para sintetizar y analizar las características principales del clima, que son la temperatura y la precipitación, según la Figura 11.

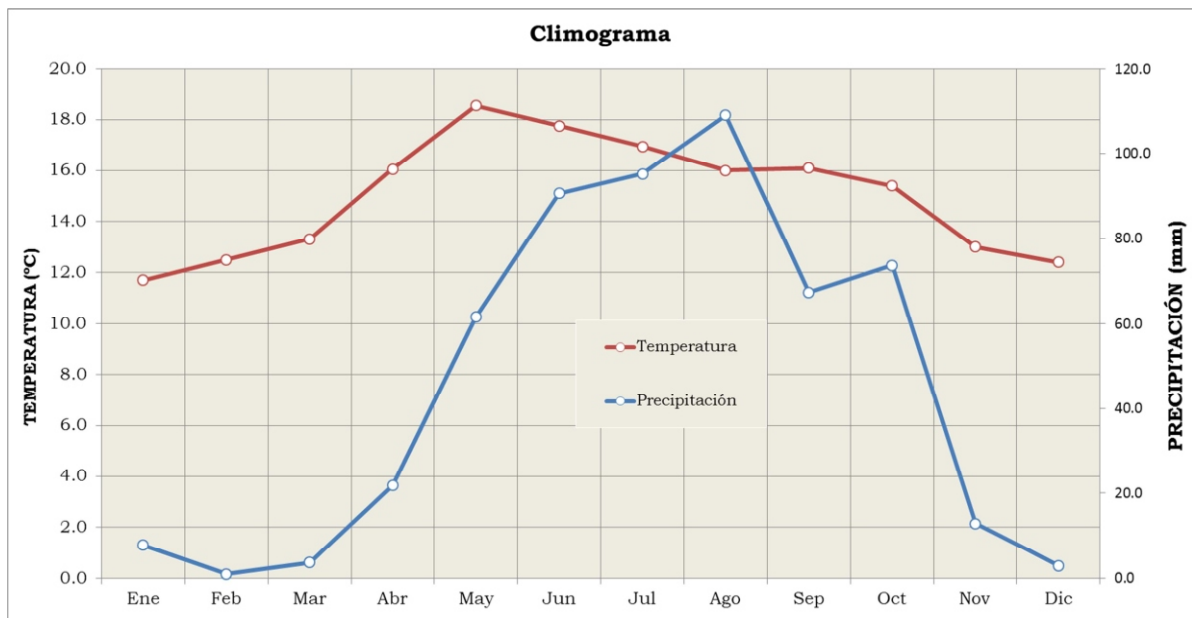


Figura 11. Climograma de la estación Tlapanaloya

Del climograma se deduce que las precipitaciones son muy escasas a lo largo de todo el año, ya que solamente en el mes de agosto se superan los 100 mm de precipitación, este es el mes más lluvioso con un promedio mensual de 109 mm. Otra variable importante para el análisis climático es el “déficit climático”, que es la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial (Figura 12).

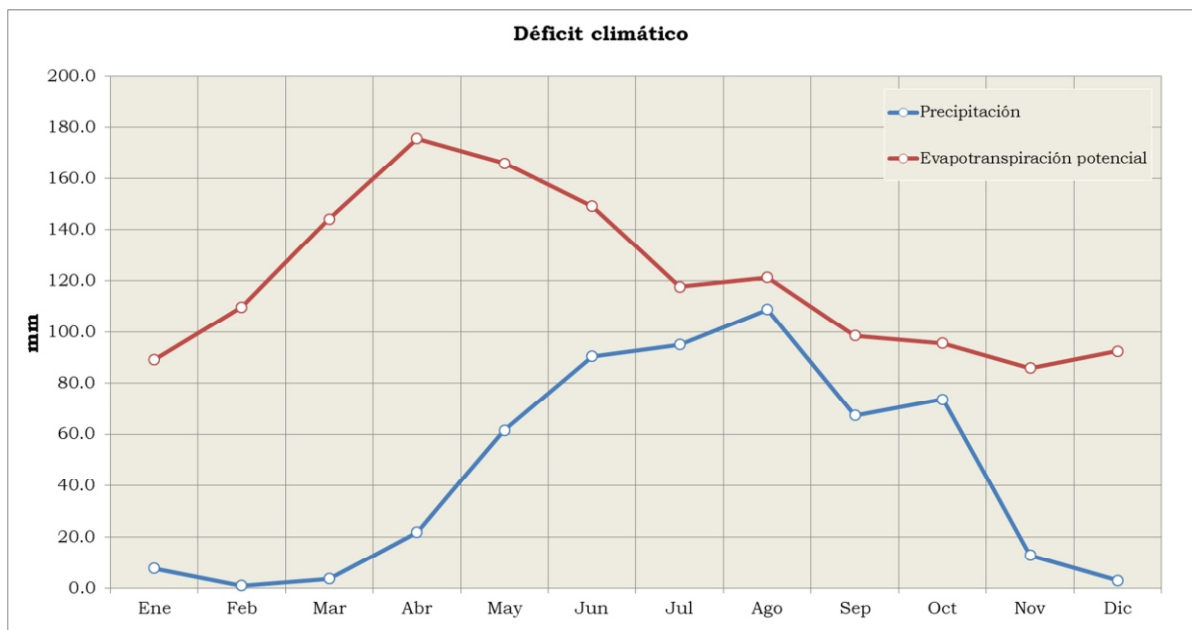


Figura 12. Déficit climático en Tlapanaloya, municipio de Tequisquiác

En la gráfica de déficit climático se observa que existen deficiencias de agua durante todo el año. En términos de producción agrícola, esto significa que es poco viable establecer cultivos de temporal. Sin embargo, esto no representa ningún problema para los humedales artificiales, porque tienen flujo constante de agua en el sistema.

Con esta información, es posible obtener de mejor manera la caracterización climática del área del proyecto, utilizando los criterios del sistema de clasificación climática de Köpen, modificado por Enriqueta García.

En primer lugar, la temperatura media anual (15°C) está entre 12 y 18°C, la temperatura media del mes más frío (11.7 °C) está entre 3 y 18 °C, y la temperatura media del mes más caliente (18.6 °C) está entre 6.5 y 22°C), por lo que de acuerdo a las condiciones de temperatura, corresponde a un clima Cb, templado con verano fresco largo.

En segundo lugar, la precipitación del mes más seco es de 1 mm en el mes de febrero, por lo que entra en la clasificación de grupos climáticos con precipitación del mes más seco menor a 40 mm, esto corresponde al subgrupo w.

Para una clasificación más precisa, García establece subtipos con base en el cociente P/T (precipitación entre temperatura anual). En el caso de la estación de Tlapanaloya, este cociente es de 36.6, correspondiendo al subtipo climático w_0 (cociente P/T menor a 43.2), que es el más seco de los subhúmedos.

De acuerdo a la oscilación anual de las temperaturas medias mensuales, la estación Tlapanaloya corresponde al subtipo isotermal (i'), ya que la diferencia entre la temperatura media más baja y la más alta está entre 5 y 7°C (6.85°C).

Por lo tanto, la clasificación climática en la zona del proyecto es **Cb (w)(w1)(i')**, que corresponde a un clima *templado subhúmedo con lluvias en verano y verano fresco largo, el más seco de los subhúmedos y con poca oscilación en las temperaturas.*

6.2 ANÁLISIS DEMOGRÁFICO

El análisis demográfico tiene especial importancia por la cantidad de gasto que va entrar al sistema o tren de tratamiento. El diseño del sistema debe considerar la tasa de crecimiento poblacional para prever posible aumento en la necesidad de tratamiento del agua, por el incremento en el caudal de entrada.

En la cabecera municipal de Hueypoxtla, para el año 2005 (según el Censo General de Población y Vivienda del INEGI), la población era de 3,544 habitantes. Según las proyecciones realizadas por el Consejo Nacional de Población (CONAPO), la población se incrementará hasta 5,000 habitantes en el año 2030 (Figura 13).

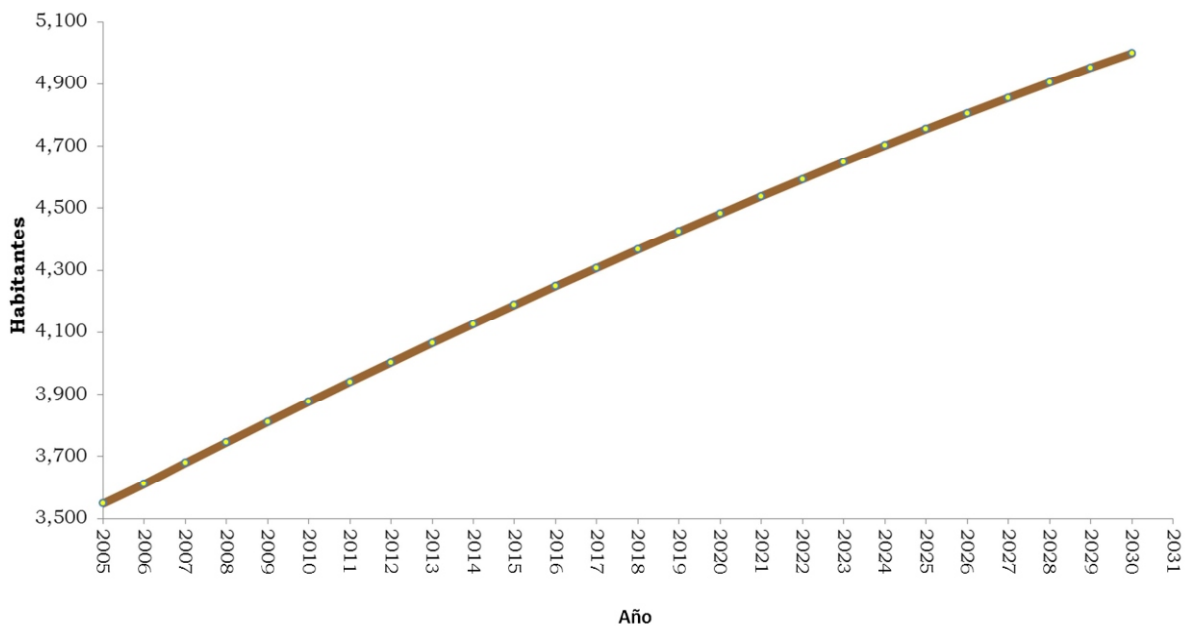


Figura 13. Crecimiento poblacional del año 2005E2010, y su proyección al 2030.

La tasa promedio de crecimiento poblacional según los datos proyectados, obtenidos del Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2010), es de 1.36%. En la Figura 14 se observa que la tasa de crecimiento poblacional ha ido decreciendo del año 2006 al año 2010, y se espera esa tendencia hasta el año 2030, bajando hasta 0.9%. Siguiendo esta tendencia, se espera que en el año 2030 existan 5,000 habitantes en la cabecera municipal de Hueypoxtla.

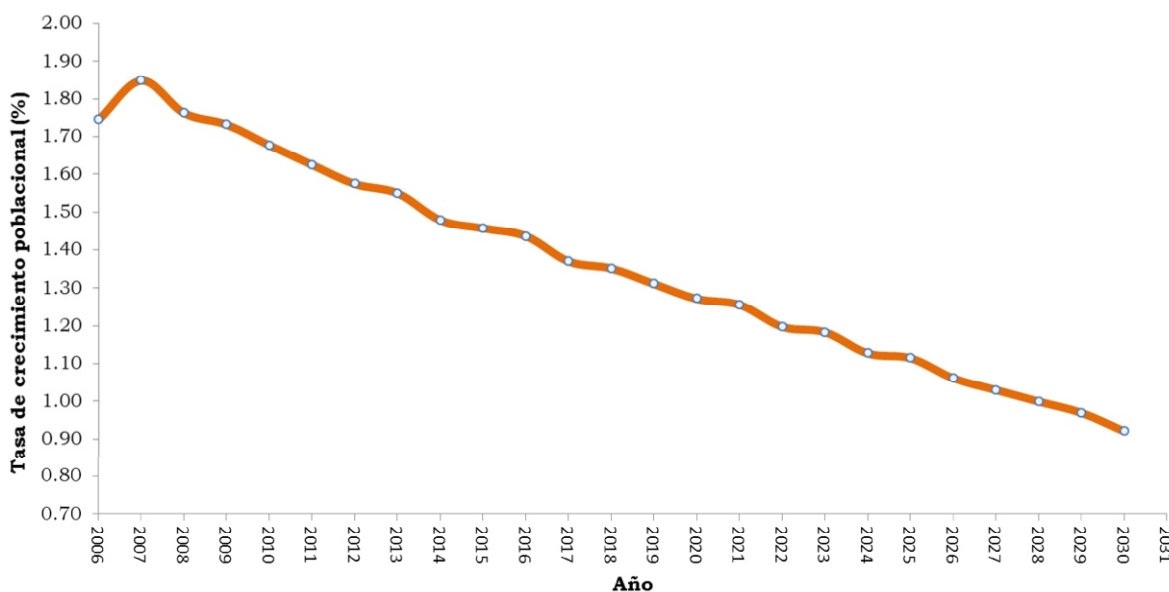


Figura 14. Proyección de la tasa de crecimiento poblacional del año 2006 al 2030.

6.3 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA

La caracterización del agua residual que sirvió de base para el diseño es la que se desglosa en el Cuadro 17:

Cuadro 17. Parámetros de calidad del agua, utilizados para el diseño

Parámetro	Valor	Unidad
Temperatura	21.48	(°C)
Ph	7.32	E
Oxígeno disuelto	0.75	mg L ^{E1}
Coliformes fecales	4.60 x 10 ⁶	NMP/100 mL
Coliformes totales	4.60 x 10 ⁶	NMP/100 mL
NENH ₃	49.40	mg L ^{E1}
NENQ	0.556	mg L ^{E1}
SDT	873.00	mg L ^{E1}
SST	163.00	mg L ^{E1}
DBO ₅	263.00	mg L ^{E1}
DQO	560.00	mg L ^{E1}
Fosfatos	23.07	mg L ^{E1}

Fuente: Muestreo realizado en la descarga de agua residual

6.4 GASTO DE DISEÑO

Existen dos formas de calcular el gasto de descarga de aguas residuales urbanas. La primera está relacionada con el análisis demográfico realizado en el apartado anterior.

Actualmente existen 3,544 habitantes en la cabecera municipal de Hueypoxtla, con una cobertura media del 70 % de la red de drenaje, lo que indica que 2,481 personas están aportando a la red de drenaje. Si se considera que en zonas rurales el uso promedio de agua por persona por día es de 120 litros, entonces la descarga promedio actual es de 3.44 litros por segundo.

La segunda forma de obtener el valor del gasto es mediante un aforo directo en la descarga; esto resulta poco práctico y arriesgado, sin embargo, para

esta investigación se realizó un aforo directo en la descarga, en el mes de agosto de 2010, se eligió esta fecha porque es temporada de lluvias y era importante considerar las entradas de agua pluvial.

Para realizar el aforo, se utilizaron recipientes de volumen conocido y se tomó el tiempo de llenado cada 60 minutos, con tres repeticiones. La primera medición se realizó a las 6 de la mañana y la última a las 7 de la tarde, por lo que se realizaron 14 mediciones. Mediante tendencias estadísticas se calcularon los valores de descarga para las horas siguientes (8 de la noche a 5 de la mañana). Los valores obtenidos de este aforo se graficaron y se muestran en la Figura 15.

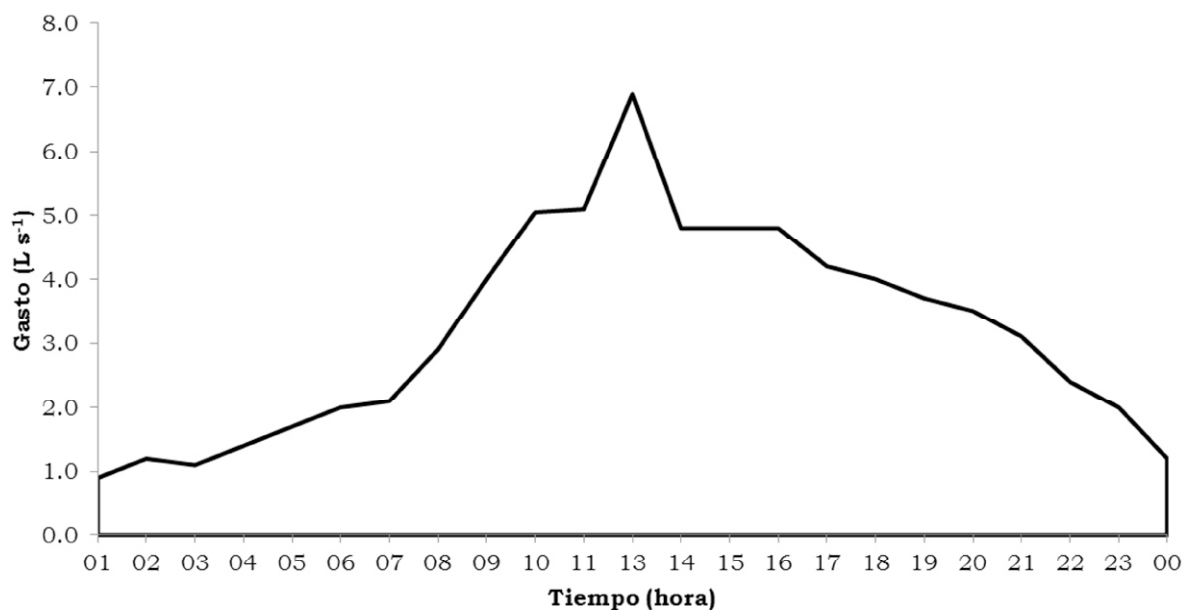


Figura 15. Distribución del volumen de descarga de agua residual obtenido mediante aforo directo en el afluente del proyecto

La primer medición realizada a las 6 de la mañana arrojó un valor de 2 litros por segundo y la última a las 7 de la noche un valor de 3.7 litros por segundo. También se puede observar que el gasto pico ocurre a la una de la tarde con valor promedio de 6.9 litros por segundo. A las 7 de la mañana

comienza un ascenso rápido de uso de agua, que continúa hasta la una de la tarde y va disminuyendo poco a poco hasta alcanzar el valor mínimo de 0.9 litros por segundo a la 1 de la mañana. Todas estas tendencias son lógicas al compararlas con las actividades domésticas que se realizan cotidianamente.

Contando con estos datos se pueden hacer algunas consideraciones para el diseño de las estructuras del tren de tratamiento. No es conveniente tomar como gasto de diseño el gasto pico de 6.9 litros por segundo porque las estructuras estarían sobradas y una de las funciones principales de las cámaras de sedimentación como tratamiento primario es abatir y equilibrar estos gastos pico en determinadas horas del día. Si se considera la tendencia de la Figura 9, el acumulado de agua durante el día es de 262 m³. El volumen calculado de las cámaras de sedimentación es de 300 m³, por lo que existe un margen para la descarga de gastos pico.

Teniendo como fundamento los criterios mencionados, todas las estructuras fueron diseñadas para gastos promedio de 4.5 litros por segundo. Es importante mencionar que lo más adecuado es considerar la tendencia poblacional para por lo menos 20 años de funcionamiento y un margen adicional de seguridad, sin embargo, la limitante de este proyecto fue la disponibilidad de terreno, por lo que en etapas posteriores será necesario realizar una ampliación de las estructuras, ya que si se considera la tendencia de crecimiento poblacional, en el año 2023, esta planta de tratamiento será insuficiente.

7 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1 RESULTADOS

A partir de la caracterización del agua residual y de las metas de tratamiento, se realizó el diseño siguiendo la metodología de Kadlec, desglosada en la revisión de literatura de este documento, y modificada con base en las características particulares de topografía, clima, tipo de suelo y características de los materiales de la zona. Los parámetros de diseño obtenidos son los que se señalan en el Cuadro 20.

Cuadro 18. Parámetros de diseño del humedal y sus componentes

Parámetro	Valor
Gasto	4.5 L s ^{E1}
Tiempo de retención hidráulica	12 horas
Profundidad de grava	0.6 m
Profundidad media del agua en el humedal	0.55 m
Pendiente de las celdas de humedales	0.5 %
Pendiente de la superficie de grava	0 %
Diámetro de grava en tratamiento primario	2 pulgadas
Diámetro de grava en tratamiento secundario	1 pulgada
Porosidad media de la grava	0.2
Meta de depuración DBO ₅	30 mg L ^{E1}
Meta de depuración nitrógeno total	15 mg L ^{E1}
Meta de depuración fósforo total	5 mg L ^{E1}

Los resultados del diseño de las estructuras se dividen de acuerdo al diseño de las fases del tratamiento en: pretratamiento, tratamiento primario y

tratamiento secundario. El plano del tren de tratamiento se encuentra en el Anexo.

7.1.1 ESTRUCTURAS DE PRETRATAMIENTO

Las aguas residuales generalmente arrastran arenas y otros residuos sólidos que se transportan mediante el sistema de drenaje, y que llegan a causar graves daños al sistema si se dejan pasar al resto de las estructuras.

El pretratamiento en este sistema consiste en un dispositivo que realiza dos funciones importantes, eliminar los sólidos más gruesos y realizar una reducción de la velocidad de llegada de la descarga. Su funcionamiento se basa en la reducción de la velocidad del agua y de las turbulencias mediante rejillas y cambios de dirección del flujo para permitir que los residuos sólidos más gruesos queden atrapados y se coloquen temporalmente en el área denominada “celda para lodos”.

Sobre el canal desarenador y justamente a la mitad se encuentra una rejilla de 0.6 m de ancho por 10 m de largo como andador, que servirá para el mantenimiento periódico de la estructura. En la Figura 16 se muestra un esquema del tratamiento primario y sus componentes.

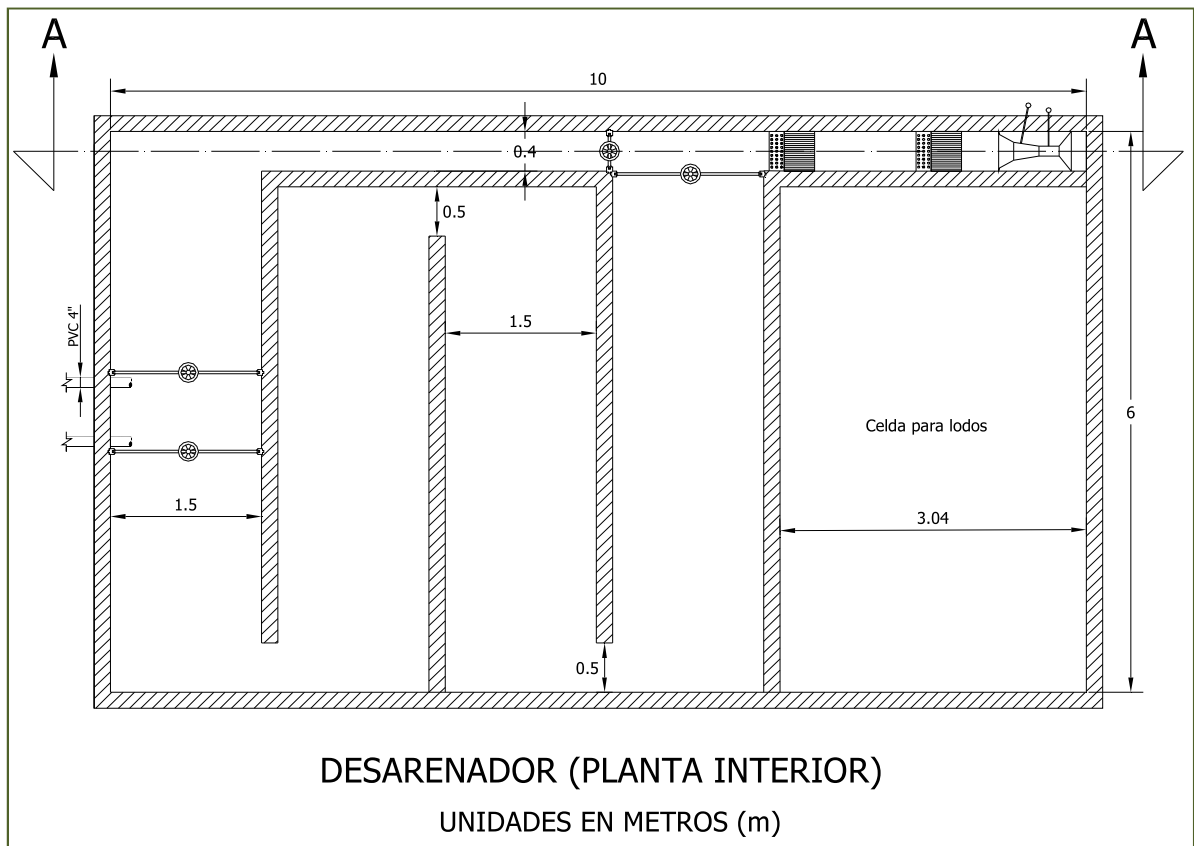


Figura 16. Vista en planta de la estructura de tratamiento primario

Las medidas de la estructura de tratamiento primario se detallan en el Cuadro 19.

Cuadro 19. Medidas de la estructura de tratamiento primario

Parámetro	Cantidad	Unidad
Longitud	25.8	m
Profundidad	0.3	m
Anchura	1.5	m
Pendiente	0.5	%
Diámetro de tubos de salida	4	pulgadas

Las rejillas que deben ir colocadas a la entrada del tratamiento primario tienen las medidas de la Figura 17.

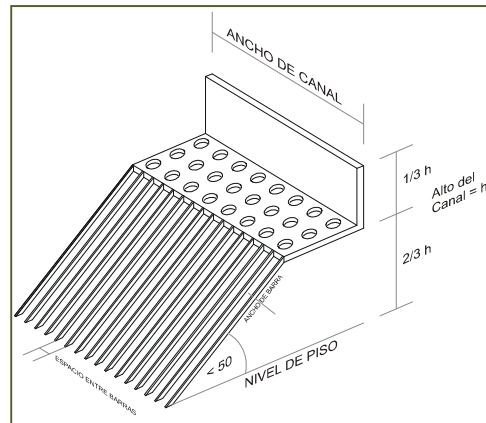


Figura 17. Rejilla de acero colocada a la entrada del pretratamiento

En la Figura 18 se muestra una fotografía de la estructura de pretratamiento construida, donde se observa al fondo el depósito para los lodos, las válvulas de paso, el andador para mantenimiento y el canal de flujo del agua.



Figura 18. Estructura construida para el pretratamiento

Este mismo dispositivo servirá como área para secado de lodos y acumulación de sólidos. Los lodos inertes provenientes de las cámaras de sedimentación (tratamiento primario) serán colocados en la zona de acumulación de lodos del pretratamiento para su posterior utilización o desecho.

7.1.2 ESTRUCTURAS DE TRATAMIENTO PRIMARIO

El tratamiento primario consiste en dos cámaras o tanques de sedimentación cuyo objetivo es remover las partículas en suspensión que no pudieron ser eliminadas en el pretratamiento. Al retirar la mayor parte de los sólidos en suspensión, se previene la saturación de los humedales artificiales que necesitan de un tratamiento previo para garantizar el funcionamiento adecuado y una larga vida útil.

El tanque de sedimentación se compone de dos secciones, en la primera, que es donde entra el caudal de agua residual se provoca el arrastre de las partículas de sedimentos hasta la segunda sección y para ello tendrá una pendiente del 10%; en la segunda sección se retienen los sedimentos, las grasas y espumas. Los sedimentos se retienen mediante una caja de concreto que colocada en la parte más profunda de la fosa, las grasas y espumas se retienen mediante una cámara divisoria entre la primera y la segunda sección. En la Figura 19 se muestra una de las secciones del tratamiento primario; y en la Figura 20 se muestra en planta los componentes de la estructura.

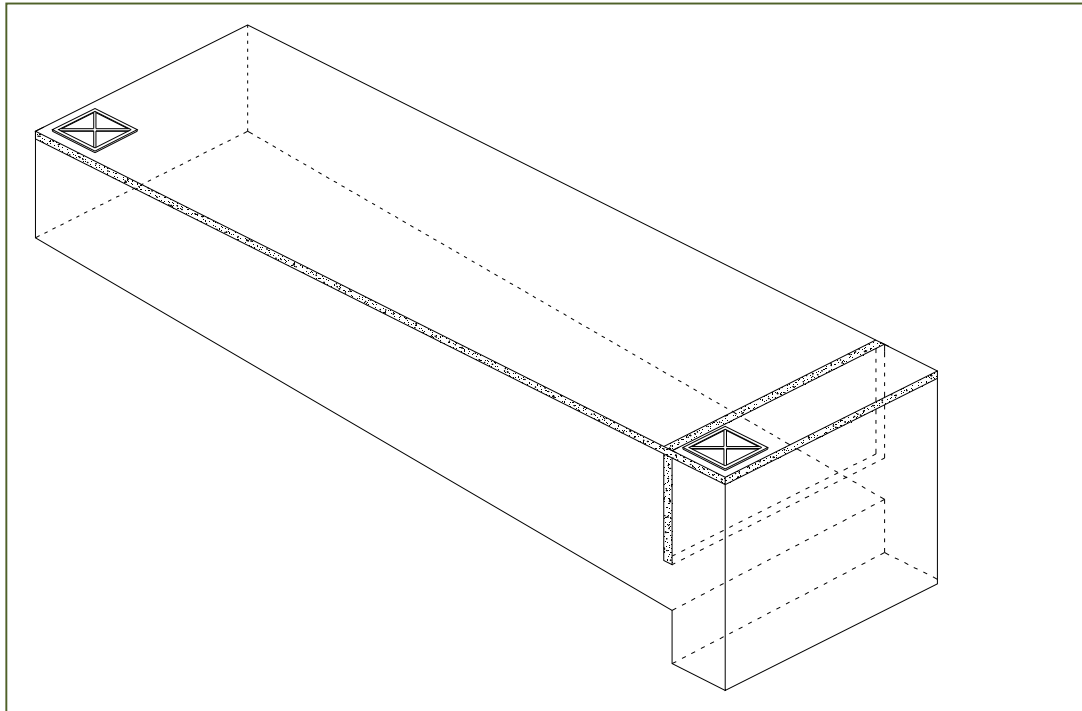


Figura 19. Vista tridimensional de la cámara de sedimentación

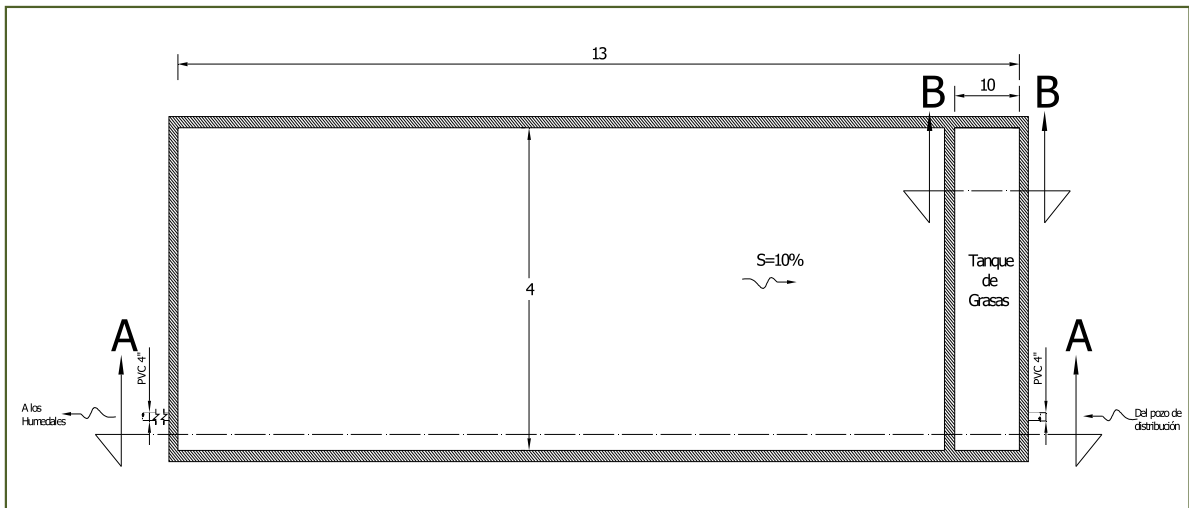


Figura 20. Vista en planta de una de las cámaras de sedimentación (unidades en metros)

En la Figura 21 se puede observar el perfil de una de las secciones del tratamiento primario.

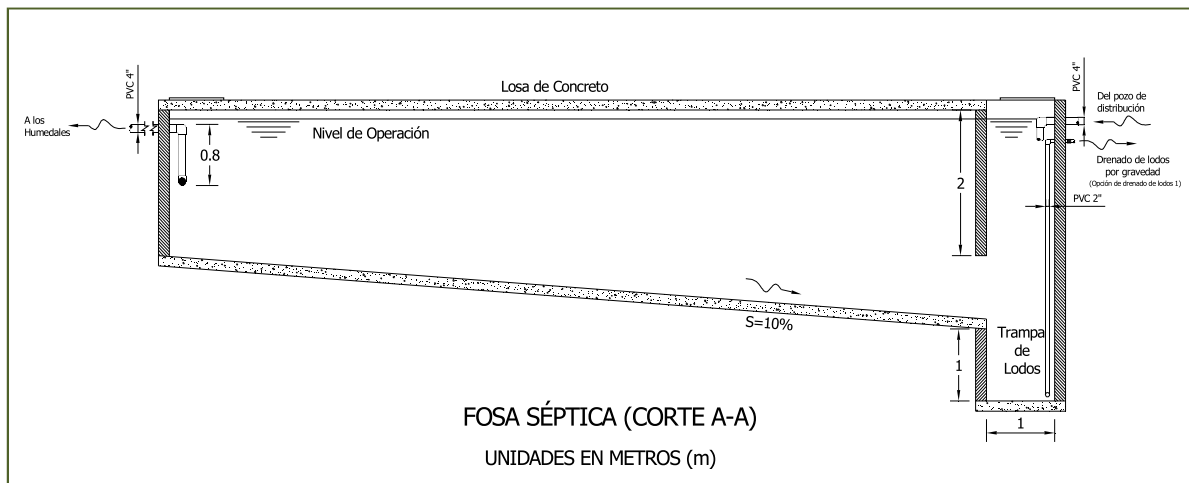


Figura 21. Perfil de la cámara de sedimentación o fosa séptica

Las medidas para la construcción de las cámaras de sedimentación son las que se señalan en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Medidas para la construcción de las cámaras de sedimentación

Parámetro	Cantidad	Unidad
Primera sección		
Longitud	13	m
Anchura	4	m
Profundidad 1	2	m
Profundidad 2	2.86	m
Pendiente	10	%
Segunda sección		
Longitud	1	m
Anchura	1	m
Profundidad	4	m
Cortina divisoria		
Largo	4	m
Ancho	2	m
Espesor	0.16	m
Tapa de mantenimiento		
Largo	0.8	m
Ancho	0.8	m
Tapa auxiliar de mantenimiento		
Largo	0.8	m
Ancho	0.8	m
Material de tapas de mantenimiento: lámina galvanizada		

En la Figura 22 se puede observar una fotografía de la parte superficial de las cámaras de sedimentación como tratamiento primario.



Figura 22. Vista superficial de la estructura de tratamiento primario

7.1.3 ESTRUCTURAS DE TRATAMIENTO SECUNDARIO

El tratamiento secundario se realiza básicamente en las siete celdas construidas y distribuidas para que dicho tratamiento se efectúe en dos etapas: la primera etapa utiliza 3 celdas y la segunda etapa de refinamiento utiliza otras 3 celdas, y una al inicio para realizar el mantenimiento.

Para el tratamiento secundario se construyeron las estructuras para cumplir tres funciones principales: una celda pequeña de mantenimiento, dispositivos de distribución del agua en los humedales y las seis celdas de tratamiento secundario.

7.1.3.1 CELDA DE MANTENIMIENTO

Generalmente los humedales artificiales se comienzan a saturar en los primeros 5 metros a la entrada de la descarga, porque es esta área la que recibe el agua con una mayor cantidad de sólidos disueltos.

La celda de mantenimiento (también denominada “coladera”) tiene la función de minimizar la saturación a la entrada del humedal mediante la filtración de cualquier material sólido grueso que haya sido acarreado durante el proceso de tratamiento en las estructuras anteriores. Tiene dimensiones pequeñas para poder efectuar mantenimiento constante. Además de ello, es útil para efectuar un monitoreo del pretratamiento del agua mediante el desarenador y el sedimentador. La estructura es una caja de concreto dividida en dos secciones, rellena de grava de 3 pulgadas. En la Figura 23 se muestra el diseño de la estructura de mantenimiento con dimensiones de 3 metros de ancho por 4 metros de largo.

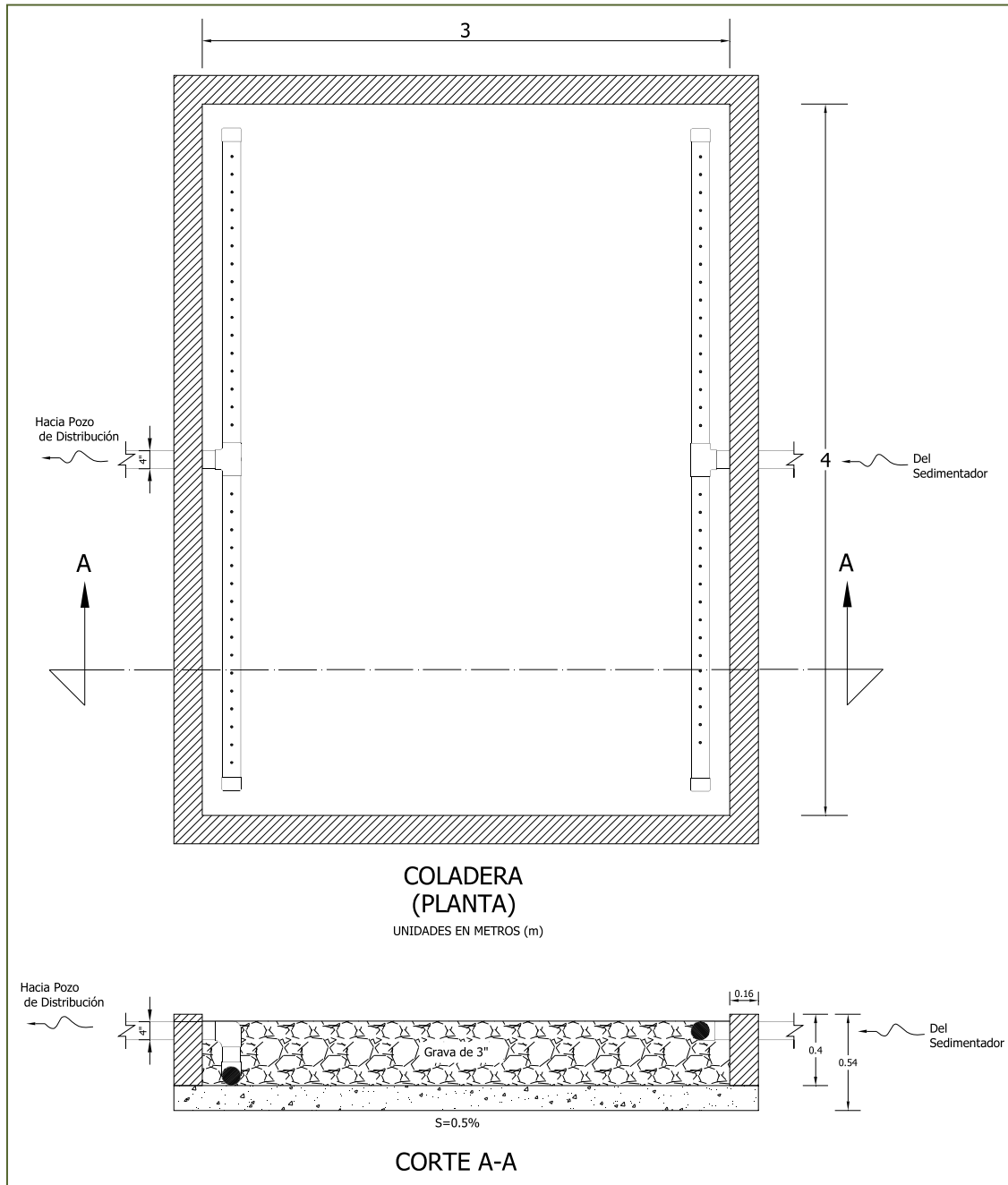


Figura 23. Diseño de la celda de mantenimiento del tratamiento secundario

Las dimensiones para la construcción de las celdas de mantenimiento se detallan en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Medidas de las celdas de mantenimiento del tratamiento secundario

Parámetro	Cantidad	Unidad
Largo	4	m
Ancho	3	m
Profundidad	0.4	m
Calibre de grava	3	pulgadas

La Figura 24 es una fotografía de las celdas de mantenimiento construidas, en las que se puede ver la división en dos secciones y el tamaño adecuado de la grava.



Figura 24. Celdas de mantenimiento

7.1.3.2 ESTRUCTURA DE DISTRIBUCIÓN DEL AGUA

La función del dispositivo de distribución (también llamado arqueta de distribución) es repartir equitativamente el caudal de agua en los primeros

tres humedales de tratamiento. Para ello se colocaron tres tubos verticalmente, a la misma distancia y con los extremos superiores a la misma altura; de esta forma, cuando el agua alcanza el nivel de los extremos de los tubos, el agua entra a los tubos en la misma proporción para cada humedal. El dispositivo de distribución tiene una tapa de acero inoxidable para evitar la entrada de basura y cualquier material que pueda obstruir el paso del agua hacia los humedales. En la Figura 25 se muestra el diseño del dispositivo de distribución.

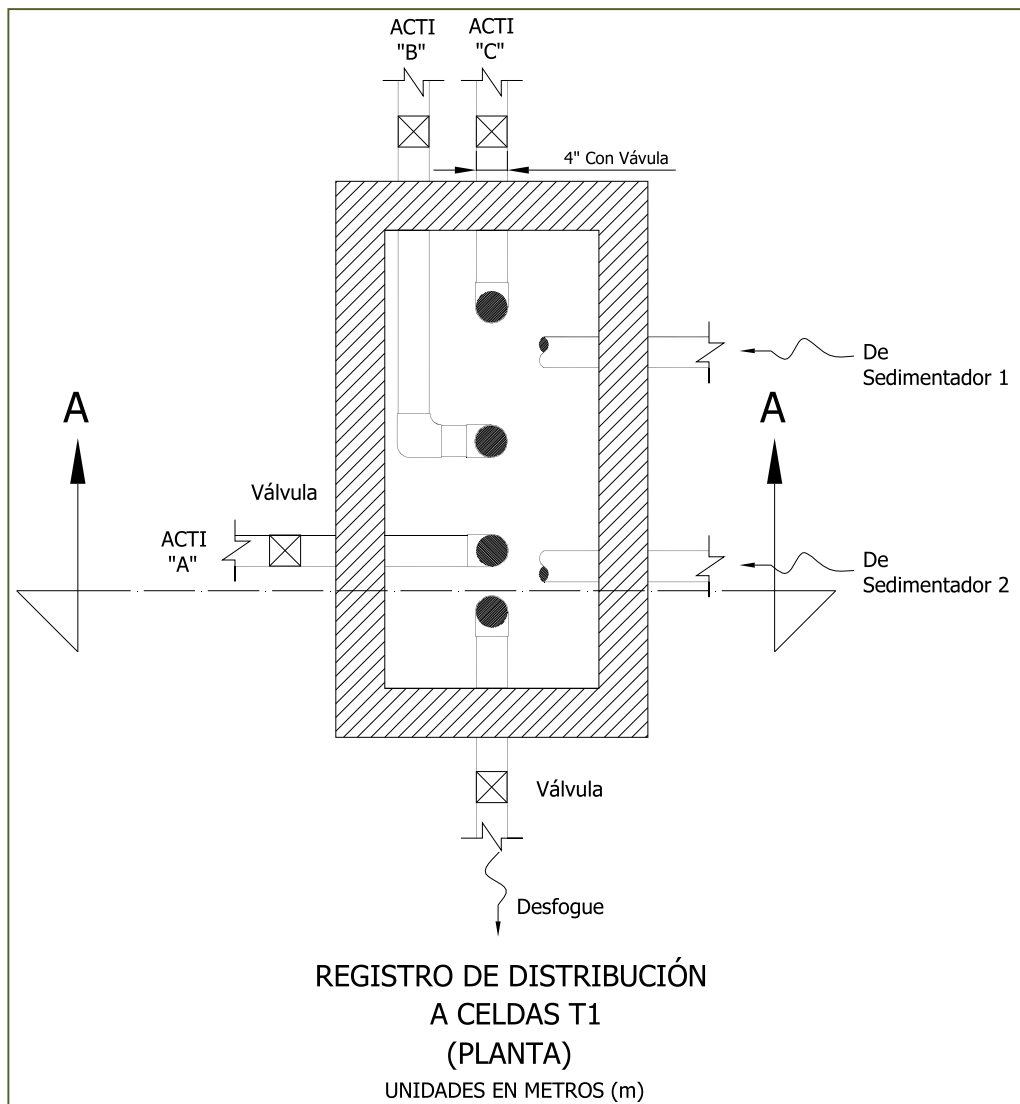


Figura 25. Dispositivo de distribución del agua

En el Cuadro 22 se detallan las medidas del dispositivo de distribución del agua a los humedales.

Cuadro 22. Medidas del dispositivo de distribución del agua

Parámetro	Cantidad	Unidad
Largo	4.0	m
Ancho	3.0	m
Profundidad	0.4	m
Calibre de grava	3.0	pulgadas

La Figura 26 es una fotografía de la parte superficial del dispositivo de distribución, con su tapa metálica.



Figura 26. Dispositivo de distribución del agua a los humedales

7.1.3.3 HUMEDALES DE TRATAMIENTO

Los humedales de tratamiento son celdas cuyo funcionamiento se basa en la interacción de tres componentes principales: grava como sustrato, vegetación y microorganismos que interaccionan formando una biopelícula y efectuando el tratamiento cuando el flujo de agua atraviesa el sistema. Debe procurarse que el agua fluya en líneas paralelas desde la entrada hasta la salida de la celda y por este motivo se colocan tubos horizontales perforados, perpendiculares a la pendiente de los humedales. Estos fueron colocados a la entrada de cada celda. En este sistema construido, el tratamiento se efectuará mediante dos fases utilizando tres celdas para cada una de ellas; las dos fases se consideran parte del tratamiento secundario, como se muestra en la Figura 27, pero la segunda es un refinamiento para aumentar la calidad del agua depurada.

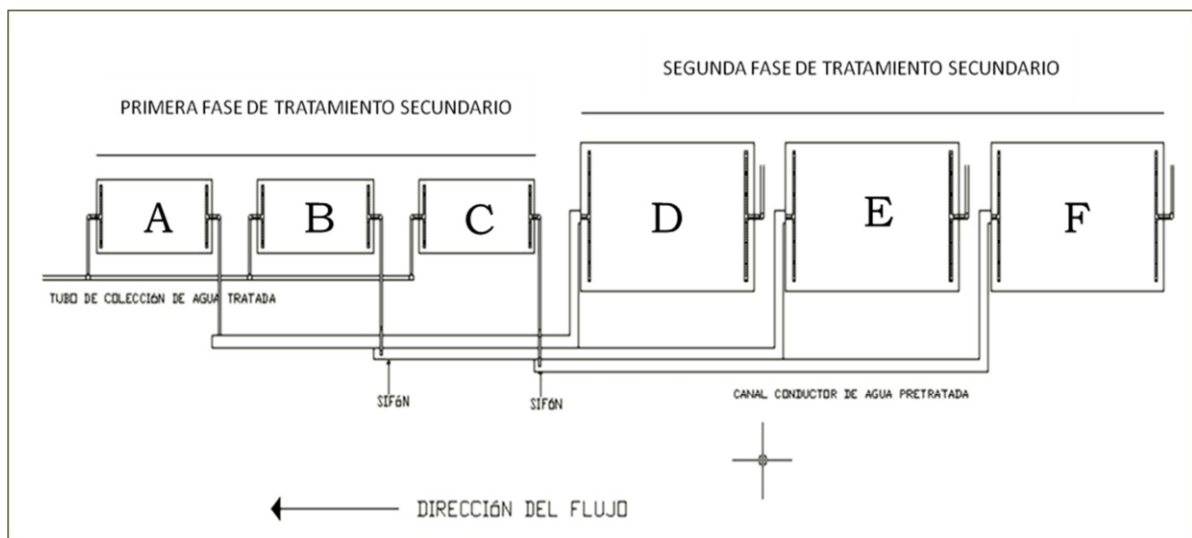


Figura 27. Distribución esquemática de las seis celdas de tratamiento secundario

Como se muestra en la Figura 27, el agua tratada en la primera fase en la celda A, pasa a la celda D, el agua tratada de la celda B pasa a la celda E y el agua de la celda C pasa a la celda F.

En las primeras tres celdas se pretende retener los sólidos de tamaño muy pequeño, que la fosa de sedimentación no logró eliminar. Aquí los microorganismos comienzan a formar colonias e invadir el medio aprovechando los residuos de vegetación que se van generando. Por ese motivo el tamaño de las gravas es más grueso. El fondo de las celdas fue impermeabilizado con concreto para evitar pérdidas de agua por infiltraciones y contaminación de los mantos acuíferos. En los Cuadros 23 y 24 se indican las dimensiones y características de cada parámetro de diseño de los humedales de tratamiento secundario.

Cuadro 23. Parámetros de diseño de la primera fase de las celdas de tratamiento secundario

Parámetro	Cantidad	Unidad
Área total	750.0	m ²
Profundidad	0.6	m
Pendiente	0.5	%
Calibre de grava	3.0	pulgada
Bordo libre	0.1	m
Número de celdas	3.0	unidad

Cuadro 24. Parámetros de diseño de la segunda fase o fase de refinación de las celdas de tratamiento secundario

Parámetro	Cantidad	Unidad
Área total	450.0	m ²
Profundidad	0.6	m
Pendiente	0.5	%
Calibre de grava	1.0	pulgada
Bordo libre	0.1	m
Número de celdas	3.0	unidad

La Figura 28 es una fotografía de los humedales para el tratamiento secundario. Se puede observar las celdas de humedales en serie, aunque no se puede apreciar a simple vista la diferencia entre las dos fases de tratamiento.



Figura 28. Vista general de las celdas de tratamiento secundario

Cuando el agua residual llega a la segunda fase del tratamiento secundario, en las primeras tres celdas ya se ha eliminado la mayor parte de los sólidos en suspensión, la Demanda Bioquímica de Oxígeno se habrá reducido notablemente, pero aún los coliformes fecales y elementos como Nitrógeno y Fósforo no se logran reducir. Es en la segunda fase donde se logra la reducción de los contaminantes mencionados, ya que las colonias de bacterias sintetizadoras tienen una mayor densidad dentro del medio. Con este objetivo, la grava tiene menor tamaño en los tres últimos humedales.

En la Figura 29 se observa el tren de tratamiento completo con sus estructuras de pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario.



Figura 29. Panorámica general del tren de tratamiento

7.1.3.4 ESTABLECIMIENTO DE LA VEGETACIÓN

La vegetación recomendada en este proyecto es el alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*) por los beneficios económicos que puede reportar a la comunidad. El alcatraz es una de las plantas ornamentales más populares de México, que crece con mayor eficiencia en ambientes húmedos, llega a crecer hasta 1 metro de altura y su tallo es subterráneo, de rizoma grueso y succulento (Figura 30).



Figura 30. Plantación de alcatraz (*Zantedeschia aethiopica*)

Esta especie puede plantarse en las celdas de humedales artificiales con una densidad de 4 plantas o rizomas por metro cuadrado. En periodo de floración puede cosecharse en promedio 8 flores por metro cuadrado. Debido a que en promedio cada rizoma de alcatraz puede costar 20 o 25 pesos, se recomienda que primero se establezca una plantación temporal de tule (*Typha latifolia*) para efectuar la maduración del humedal hasta que se haya formado la biopelícula en la grava. Después de esto, se deberá cortar el tule y plantar el alcatraz para asegurar una mayor supervivencia y crecimiento de las plantas. En la Figura 31 se observa la *Typha latifolia* en un hábitat natural.



Figura 31. Crecimiento natural de tule (*Typha latifolia*)

Además de los componentes mencionados, dentro del catálogo de conceptos general se considera una cerca perimetral y una bodega pequeña para almacenamiento de herramientas de mantenimiento, sin embargo, no se detalla la construcción de las mismas debido a que son estructuras adicionales, que son independientes de los procesos de tratamiento.

7.1.4 CATÁLOGO DE CONCEPTOS GENERAL

Para obtener el costo total del proyecto y las cantidades de material por el tren de tratamiento completo con sus dispositivos auxiliares, se realizó el catálogo de conceptos general del proyecto, que se muestra en el Cuadro 25.

Cuadro 25. Catálogo de conceptos general del tren de tratamiento

Concepto	Cantidad	Unidad	Costo unitario(\$)	Total (\$)
Rejillas de filtrado	2	pieza	300.00	600.00
Rejilla para andador	1	pieza	2,500.00	2,500.00
Compuertas deslizantes	4	pieza	450.00	1,800.00
Ladrillos 29 X 14 X 7	5860	pieza	3.50	20,510.00
Malla electrosoldada 66/66	134	m	85.00	11,390.00
Cemento	317	bulto	110.00	34,870.00
Arena	93.5	m ³	250.00	23,375.00
Grava 1/4	65	m ³	250.00	16,250.00
Tubo de PVC 4"	227	m	17.00	3,859.00
Codo 90° PVC 4"	10	pieza	10.00	100.00
Tubo hidráulico 2 "	8	m	24.00	192.00
Codo 90° 2"	2	pieza	8.00	16.00
Válvulas de mariposa	4	pieza	200.00	800.00
Mano de obra	5	lote	E	158,200.00
Bomba de lodos	1	pieza	6,000.00	6,000.00
Tapas de mantenimiento con candado	4	piezas	300.00	1,200.00
Movimientos de tierra	1119	m ³	45.00	50,355.00
T PVC 4"	14	pieza	12.00	168.00
Geomembrana de polietileno 1.5 mm	1697	m ²	80.00	135,760.00
Grava de 2"	375	m ³	250.00	93,750.00
Instalación de geomembrana	2030	m ²	15.00	30,450.00
Instalación de geomembrana	6.000	lote	600.00	3,600.00
Equipo y personal técnico para geomembrana	6.000	lote	400.00	2,400.00
Vegetación utilizada (<i>Typha sp.</i>)	1320	planta	15.00	19,800.00
Grava de 1"	225	m ³	300.00	67,500.00
Armex	32	m	45.00	1,440.00
Puerta de herrería con cerrojo	1	pieza	2,500.00	2,500.00
Carretilla	1	pieza	900.00	900.00
Pala cuadrada	2	pieza	140.00	280.00
Machete	2	pieza	35.00	70.00
Pico	2	pieza	140.00	280.00
Pala recta	2	pieza	135.00	270.00
Azadón	2	pieza	160.00	320.00
Escalera de aluminio	1	pieza	1,000.00	1,000.00
Subtotal				692,505.00
Supervisión	4	mes	19,500.00	78,000.00
Costo total del proyecto				770,505.00

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Una vez realizada la construcción del sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales en la comunidad de Tlapanaloya, municipio de Tequisquiac, Estado de México, se puede observar claramente que las estructuras construidas no alteran el medio ambiente natural, y más aún después de implantada la vegetación, se realiza la arquitectura del paisaje y se establece de nuevo el equilibrio entre la flora y la fauna de la zona, por lo que la primera hipótesis se cumple.

En la segunda hipótesis se menciona que el costo de tratamiento de un sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales es más económica que un sistema de tratamiento convencional, la cual resulta cierta, ya que según sondeos e investigaciones realizadas, la construcción de plantas de tratamiento convencionales para el gasto de diseño de este proyecto tiene un costo mínimo de alrededor de \$1,500,000.00, a diferencia del sistema de humedales artificiales cuyo costo total fue de \$770,505.00. Estos son solo costos de construcción, sin considerar todos los costos de operación y mantenimiento que requiere una planta de tratamiento convencional, y en comparación con los humedales artificiales que requieren de una mínima operación y mantenimiento.

La elección del método de tratamiento propuesto para este lugar responde a la necesidad de contar con una alternativa ecológica de saneamiento, el número de personas beneficiadas es alto y los beneficios ecológicos y para la protección de la salud pública son múltiples, sin considerar que el agua obtenida del tratamiento puede reportar beneficios económicos si se utiliza con fines de explotación de especies acuáticas o para riego de especies forrajeras. Otra alternativa que se ofrece es el cultivo de ornamentales de clima templado que requieran de cuidados mínimos en el humedal. Se recomiendan las especies como alcatraz, gladiola y otras ornamentales, en

una etapa posterior del proyecto. Actualmente el sistema se encuentra en proceso de adaptación, sin embargo, se espera que pueda ser terminada la implementación de la vegetación en un corto periodo de tiempo para que cumpla con los objetivos establecidos y reporte los beneficios medioambientales y de salud pública que se espera.

Algunas recomendaciones de operación del sistema son las siguientes:

Al término de la construcción, se deberán colocar las señalizaciones necesarias para el acceso al humedal y para la identificación de las instalaciones.

Se deberá dar mantenimiento constante a los caminos de acceso, tanto fuera como dentro del área de tratamiento.

También es importante dar mantenimiento a las rejillas instaladas en el pretratamiento, al canal desarenador y a las cámaras de sedimentación, de manera periódica.

Debe ponerse especial atención al pozo de distribución para evitar taponamientos que provoquen saturación de las estructuras.

Deberá evitarse la invasión de plantas nocivas, para que las especie de interés *Typha sp.* se desarrolle en un ambiente adecuado, posteriormente se irá implementando el alcatraz.

Será necesario que se asigne a una persona para realizar las labores de mantenimiento periódico, quien debe ser debidamente capacitada.

Colocar una cerca perimetral para evitar daños al sistema por el paso de animales o personas no autorizadas.

Las recomendaciones que aquí se enuncian no son limitativas porque en el transcurso de la operación surgirán nuevas necesidades y problemas que habrá que darles atención para obtener los beneficios esperados.

9 LITERATURA CITADA

1. American Public Health Association (APHA), 1981. Standard methods for the examination of water and wastewater. Volume 18.
2. Beascochea, 2006. Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación. Universidad Politécnica de Madrid.
3. Bertoni, J. C.; F. Miatello y N. A. Campana, 2001. “Estimação de áreas impermeáveis em regiões urbanas”. I Seminario de Drenaje Urbano del MERCOSUR. Libro de Resúmenes, pp. 31E34. Porto Alegre, Brasil.
4. Browne, F. X.; D. Baker; R. Borden; R. Field y C. Newell, 1990. Stormwater Management. Capítulo 7 en: Standard Handbook of Environmental Engineering. Corbitt, R. A. McGrawEHill, Inc. Estados Unidos de América.
5. Buitrón, German, et al, 2006. Tratamiento de aguas en zonas industriales, urbanas y rurales. Universidad Nacional Autónoma de México.
6. DuPoldt, Carl, et al., 2000. A Handbook of Constructed Wetlands. United States Department of Agriculture E Natural Resources Conservation Service.
7. Comisión Nacional del Agua. Estadísticas del Agua en México, Edición 2011.
8. Craig S. Campbell and Ogden, Michael, 1999. Constructed wetlands in the sustainable landscape. John Wiley & Sons, Inc. Printed in the United States of America.
9. Escalas Cañellas, 2006. Tecnologías y usos de las aguas residuales en México. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
10. Finlayson, C.M., and Chick, A.J., 1983. Testing the potential of aquatic plants to treat abattoir effluent, Water Res. 17: 415E422.

11. Fresenius, W., ed; Schneider, W., ed., 1991. Manual de disposición de aguas residuales: Origen, descarga, tratamiento y análisis de las aguas residuales Lima, Perú.
12. García Serrano y Corzo Hernández, 2006. Depuración con Humedales Construidos. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya.
13. Hernández, A., Hernández, A., y Galán, P. (1996). Manual de Depuración Uralita. Editorial Paraninfo, Madrid, 429 pp.
14. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010. Censo Nacional de Población y Vivienda.
15. Vymazal, Jan, 2005. Horizontal subEsurface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment. Duke University Wetland Center, Nicholas School of the Environment and Earth Sciences, Durham, NC 27708, USA.
16. Kadlec, Robert and Knight Robert, 1996. Treatment Wetlands. The University of Michigan, Ann Arbor and Wetland Management Services. Lewis Publishers.
17. Imhoff, Karl u. Klaus R., 2007. Taschenbuch der Stadtentwässerung. Oldenbourg Industieverlag GmbH RosenheimerStraße 145, DE81671 München.
18. Lahora, Agustín, 2000. Depuración de aguas residuales mediante humedales artificiales: La EDAR de Los Gallardos (Almería).
19. Lara, Jaime, 1999. Depuración de aguas residuales municipales mediante humedales artificiales. Instituto Catalán de Tecnología. Universidad Politécnica de Cataluña, España.
20. Mitsch, W. J. 1992. Landscape design and the role of created, restored and natural riparian wetlands in controlling nonpoint source pollution. *Ecological Engineering*: 27E47.
21. Otis, R.J. and Anderson, D.L. (1994). "Coming of Age: Onsite Wastewater Treatment System Management," Proceedings of the Wastewater Nutrient Removal Technology and Onsite Management

- Districts Conferences. (pp. 97E109). Waterloo, Ontario: Waterloo Center for Groundwater Research, University of Waterloo.
22. Porto, M., 1995. Aspectos Qualitativos do Escoamento Superficial em Areas Urbnas. Capítulo 9 en: Drenagem Urbana. Organizadores: C. Tucci; R. La Laina Porto y M. T. de Barros. ABRH/Editora da Universidade/UFRGS.
 23. Riccardi, G.,1998. “La Calidad del Esgurrimiento Pluvial Urbano y el Impacto sobre los Cuerpos Receptores”. Cuadernos del CURIHAM. Vol. 4, N° 1, 1er semestre, pp. 31E46. Rosario, Argentina.
 24. Sánchez Luna, E. (2004). Programas de acciones de Saneamiento. En Curso de tratamiento de aguas residuales municipales, curso organizado por el Instituto Mexicano del Agua Potable, San Luis Potosí, SLP.
 25. Secretaría de la Convención de Ramsar, 2006. Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán), 4a. edición. Secretaría de la Convención de Ramsar, Gland (Suiza).
 26. Seoanez C. Mariano, (1999). Aguas residuales: tratamiento por humedales artificiales. Fundamentos científicos. Tecnología. Diseño. Ediciones Mundi E Prensa, S.A. Madrid, España.
 27. Sinha y Sinha, 1969. Recent Advances in Ecobiological Research. S.B. Nangia, A.P.H. Publishing Corporation, New Delhi.
 28. S. Sarafraz, et. al., 2009. Wastewater Treatment Using Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetland. American Journal of Environmental Sciences 5 (1): 99E105.
 29. Tanner, C.C., Sukias, J.P.S., and Dall, C., 2000. Constructed Wetlands in New Zealand EEvaluation of an emerging "natural" wastewater technology. Proceedings of Water 2000, Guarding the Global Resource Conference, March 19E23, Auckland, New Zealand. CD ROM ISBN 1E877134E30E9.

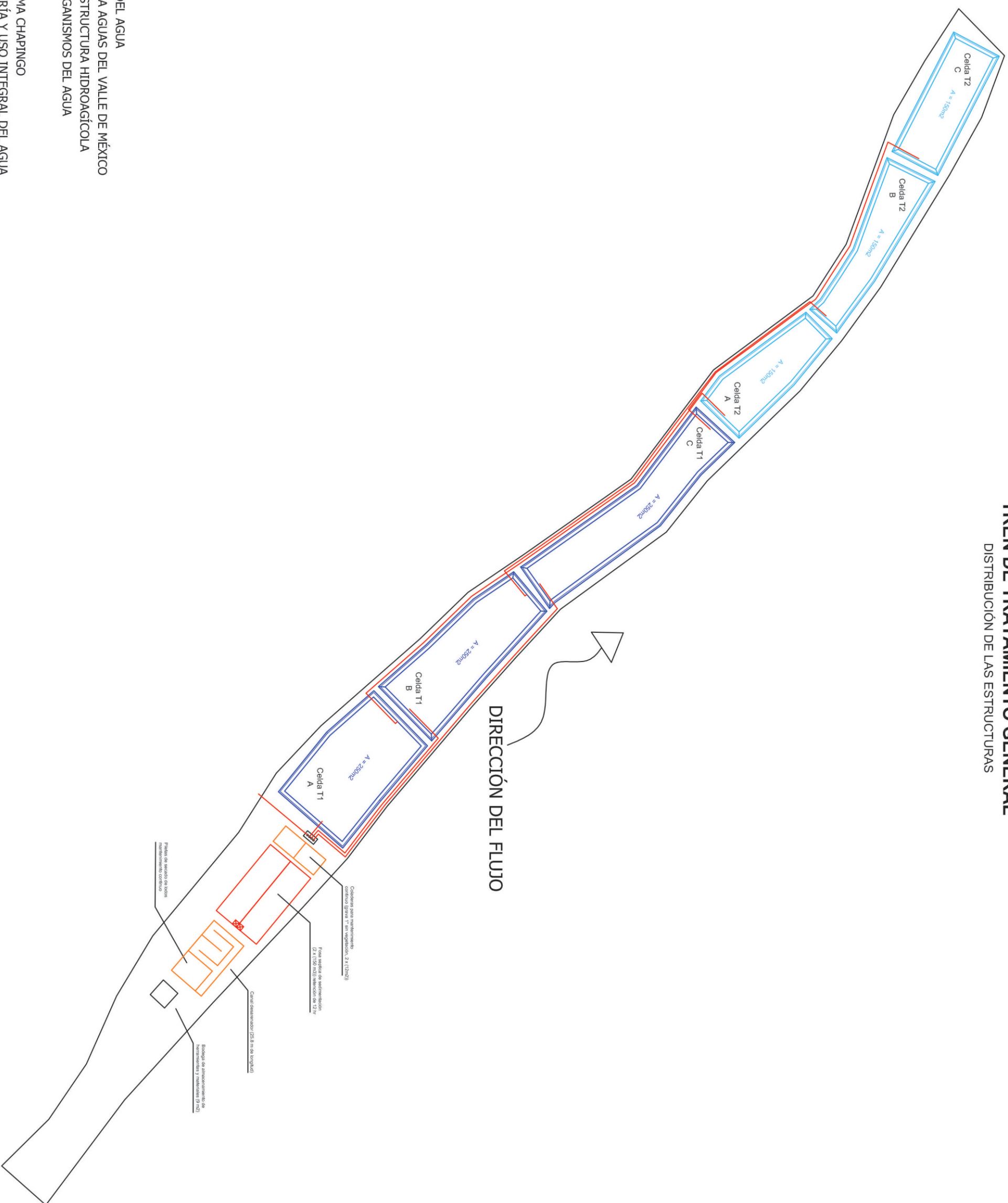
30. Tebbutt T. H., 1994. Fundamentos de control de la calidad del agua. Departamento de ingeniería civil. Universidad de Birmingham. Editorial Limusa, México, D.F.
31. Tucci, C. y F. Genz (1995) Controle do Impacto da Urbanização. Capítulo 7 en: Drenagem Urbana. Organizadores: C. Tucci; R. La Laina Porto y M. T. de Barros. ABRH/Editora da Universidade/UFRGS.
32. Unidad de Apoyo Técnico para el Saneamiento Básico del Área Rural – UNATSABAR. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente E CEPIS Organización Panamericana de la Salud E Organización Mundial de la Salud, 2005. Guía para el Diseño de Desarenadores y Sedimentadores, Lima, Perú.
33. Wanielista, Martín, P., 1978. Stormwater Management, Quantity and Quality. Florida Technological University, Orlando Florida.
34. Wissing, F., 1995. Wasserreinigung mit Pflanzen. Ulmer, DEStuttgart. (in German)
35. WEF (Water Environment Federation) 1992. Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. WEF Manual of Practice No. 76 Volume 1: Chapters 1E12 and Volume II: Chapter 13EQ. WEF, Alexandria, VA and Society of Civil Engineers, New York.
36. Zalewski, Maciej and Wagner E Lotkowska, Iwona, (2004). Integrated Watershed Management. Ecohydrology & Phytotechnology Manual. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International Hydrological Programme, Osaka, Japan.

ANEXO

**PLANO GENERAL DE DISTRIBUCIÓN DE
LAS ESTRUCTURAS DEL TREN DE
TRATAMIENTO**

TREN DE TRATAMIENTO GENERAL

DISTRIBUCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS



CORTESÍA DE:

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA
ORGANISMO DE CUENCA AGUAS DEL VALLE DE MÉXICO
DIRECCIÓN DE INFRAESTRUCTURA HIDROGRÁFICA
COORDINACIÓN DE ORGANISMOS DEL AGUA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO
INSTITUTO DE INGENIERÍA Y USO INTEGRAL DEL AGUA