



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

"MANEJO DE AGUAS RESIDUALES EN LA CIUDAD
DE MEXICO
ALTERNATIVAS DE SOLUCION"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A:

EMMANUEL GOMEZ MORALES



MEXICO, D. F.



2005

m344255

EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL


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

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

Autorizo a la Comisión de Exámenes de la UNAM a dictaminar el contenido de este examen de opción múltiple.

NOMBRE: Emmanuel Gómez Morales

FECHA: 17-05-05

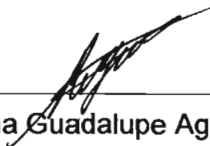
FIRMA:  Jurado asignado

Presidente	Prof.	Víctor Manuel Luna Pabello
Vocal	Prof.	Baldomero Pérez Gabriel
Secretario	Prof.	Rina Guadalupe Aguirre Saldivar
1er. Suplente	Prof.	Rolando Javier Bernal Pérez
2do. Suplente	Prof.	Fulvio Mendoza Rosas

Sitio en donde se realizo el tema:

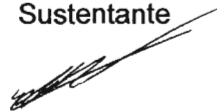
Sección de Ingeniería Ambiental, DEPMI, Facultad de Ingeniería,
UNAM, Ciudad Universitaria, México D.F.

Asesor



Dra. Rina Guadalupe Aguirre
Saldivar

Sustentante



Emmanuel Gómez Morales



Dedicatorias

Me considero alguien afortunado por haber logrado la mayoría de las metas que hasta ahora me he propuesto, y ésta es una las más importantes para mí, la cual no podría haber alcanzado sin el apoyo y el cariño de toda la gente que hasta ahora he conocido y que han sido parte importante de mi vida. Espero no dejar a nadie fuera de mis agradecimientos...

Le agradezco al Creador y a la vida el permitirme llegar a este momento, así mismo le agradezco a San Judas Tadeo su ayuda y protección en todos los momentos difíciles de mi vida.

Les agradezco a mis padres Ana María y Javier por el apoyo, cariño y protección que me han dando, sin los cuales no sería lo que soy hoy, gracias por estar siempre a mi lado y ayudarme a lograr mis objetivos, gracias por creer en mi, los quiero mucho.

Les agradezco a mis hermanos, Javier y Ana Luisa todo el apoyo que me han dado, toda su protección, siempre están en mi corazón.

Les agradezco a mis tías Isabel y Aurora su incondicional apoyo para ayudarme a cumplir esta meta.

Le doy gracias a la vida por haberme puesto en mi camino a la Dra. Rina Aguirre, que durante todo éste proceso de mi vida siempre conté con su incondicional apoyo y orientación.

Te doy gracias Ana María por estar en mi vida, por tu cariño y comprensión, por ayudarme a poner los pies en la tierra y ayudarme a concretar mis metas, siempre estarás presente en mi corazón.



Le agradezco a la *Universidad Nacional Autónoma de México* por permitirme ser uno de sus hijos, así mismo le doy las gracias a todos sus profesores que me formaron y me ofrecieron su amistad, en especial a la maestra Gabriela Martínez, al ingeniero Marcelino Gómez y a las maestras Ann Wellens y Francis Soler, a quienes siempre les agradeceré su amistad y apoyo.

Les agradezco a mis amigos, Paty Villarreal, Toño Barragán, Héctor Basave, Juan Carlos Muñoz y Paola Moreno y a todos los que conocí a lo largo de la carrera por su amistad.

Gracias de todo corazón



Índice

Capítulo I Introducción

1.1. Justificación	2
1.2. Objetivo	3
1.3. Alcances y limitaciones	3
1.4. Metodología	4

Capítulo II Marco teórico

2.1. Contaminación del agua	6
2.1.1. Parámetros físicos de calidad	7
2.1.2. Parámetros químicos de calidad	7
2.1.3. Parámetros biológicos de calidad	11
2.2. Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)	13
2.2.1. Niveles de tratamiento	14
2.2.1.1. Tratamiento primario	14
2.2.1.2. Tratamiento secundario	15
2.2.1.3. Tratamiento terciario	17
2.2.1.4. Desinfección	18



2.2.2. Tipo de plantas de tratamiento	19
2.2.2.1. Plantas aerobias de medio en suspensión	20
2.2.2.2. Plantas aerobias de medio fijo	23
2.2.2.3. Plantas anaerobias	25
2.2.3. Costos de instalación y mantenimiento	27
2.2.4. Consideraciones ambientales	28
2.3. Fosas sépticas	28
2.3.1. Costos de instalación y mantenimiento	30
2.3.2. Consideraciones ambientales	31
2.4. Humedales	31
2.4.1. Humedales de flujo libre superficial (FLS).	32
2.4.1.1. Costos de instalación y operación	36
2.4.1.2. Consideraciones ambientales	37
2.4.2. Humedales artificiales de flujo subsuperficial (FS)	38
2.4.2.1. Costos de instalación y operación	43
2.4.2.2. Consideraciones ambientales	44
2.5. Baños secos	45
2.5.1. Costos de instalación y operación	46



2.5.2. Consideraciones ambientales	47
2.6. Sistemas de recolección de agua pluvial	48
2.6.1. Costos de instalación y mantenimiento	49
2.6.2. Consideraciones ambientales	50
2.7. Marco legal	50

Capítulo III Situación actual en la ciudad de México

3.1. Descripción del sistema	52
3.2. Consumo de agua potable	58
3.3. Composición de las aguas residuales	60
3.4. Alcantarillado	66
3.5. Plantas de tratamiento de agua residual	73
3.5.1. Plantas de tratamiento operadas por la iniciativa privada	75
3.6. Fosas sépticas	77
3.7. Humedales	77
3.8. Otras infraestructuras	78
3.8.1. Reuso de las aguas residuales tratadas	78
3.8.2. Recolección y aprovechamiento de agua pluvial	79



Capítulo IV Criterios de selección de alternativas

4.1. Análisis de las alternativas de solución	82
4.1.1 Identificación de los problemas ambientales	83
4.2. Criterios de selección	84
4.2.1. Criterios técnicos	85
4.2.2. Criterios ambientales	86
4.2.3. Criterios sociales	88
4.3. PTAR	88
4.3.1. Lodos activados con aireación extendida	89
4.3.2. Lodos activados con zanjas de oxidación	90
4.3.3. Reactor tipo SBR	91
4.3.4. Filtros percoladores	92
4.3.5. Reactor tipo USB	93
4.4. Fosas sépticas	94
4.5. Humedales de flujo subsuperficial	95
4.6. Baños secos	96
4.7. Sistemas de recolección de agua pluvial	97



Capítulo V. Selección de alternativas

5.1	Discusión de alternativas	99
5.2	Selección de alternativas	99
5.3	Participación de la iniciativa privada	103
5.4	Acciones previas a la aplicación	104

Capítulo VI. Conclusiones y recomendaciones

	Conclusiones y recomendaciones	106
6.1	Recomendaciones	108
	Referencias	109
	Anexo	114



Índice de tablas

2.1	Contaminantes prioritarios	8
2.2	Tipos y número de microorganismos	11
2.3	Enfermedades producidas por organismos en aguas residuales	13
2.4	Criterios de dosificación de cloro	19
2.5	Costos de instalación de fosas sépticas prefabricadas en material rocoso	30
2.6	Concentraciones Naturales en Humedales de FLS	35
2.7	Costos de inversión, operación y mantenimiento de humedales FLS	36
2.8	Tasas típicas de carga superficial para humedales FS	40
2.9	Concentraciones naturales en humedales FLS	41
2.10	Costos de inversión y de operación y mantenimiento para un humedal de flujo subsuperficial	43
2.11	Costo de un sistema de aprovechamiento de agua pluvial	49
3.1	Tarifas para el agua potable en el Distrito Federal	60
3.2	Distribución de usos de agua potable	60
3.3	Composición del agua residual en la ZMCM	61



3.4	Descargas industriales a los colectores urbanos	64
3.5	Sistema de colectores en el Distrito Federal	67
3.6	Características de los interceptores de la ZMCM	69
3.7	Cuotas por conexión a los sistemas de drenaje de la Ciudad de México	72
3.8	Operación y distribución de las PTAR	73
3.9	Resumen de las PTAR concesionadas en el DF	76
3.10	Resumen de plantas operadas por los propios usuarios, por delegación	76
3.11	Operación de los humedales e instituciones de investigación	78
3.12	Reuso del agua residual tratada	79
5.1	Comparación del panorama 1995 – 2003	98
5.2	Zona y tipo de tecnología aplicable	100



Índice de figuras

2.1	Diagrama de flujo para un reactor de lodos activados	21
2.2	Diagrama de flujo para las zanjas de oxidación	22
2.3	Disco rotatorio	24
2.4	Esquema de un reactor UASB	27
2.5	Esquema de una fosa séptica	29
2.6	Vegetación típica de los humedales	32
2.7	Esquema de un Humedal de Flujo Libre Superficial (FLS)	34
2.8	Esquema de un humedal de flujo subsuperficial	39
2.9	Diseño de la taza separadora del sanitario seco	47
2.10	Esquema de la cámara de descomposición de un baño seco	48
2.11	Filtro de arena para el tratamiento de agua de lluvia	49
3.1	Distribución de la densidad poblacional del D.F	53



3.2	Zonas con influencia industrial	54
3.3	Vegetación del D.F.	55
3.4	Cobertura del servicio de drenaje del D.F.	55
3.5	Distribución del ingreso per capita en el D.F.	56
3.6	Características del D.F.	58
3.7	Distribución de las fuentes de suministro de agua en la ZMCM	59
3.8	Esquema del sistema de drenaje de la ZMCM	71
3.9	Precipitación Anual Media en el Distrito Federal	81



Capítulo I

Introducción

El Distrito Federal, dada su ubicación geográfica, su alto grado de desarrollo industrial (21,699 industrias) y su población (aproximadamente 18 millones de habitantes), enfrenta uno de los problemas más serios a nivel mundial para el abastecimiento de agua potable, así como en la captación, conducción y tratamiento de sus aguas residuales.

La vigilancia del cumplimiento de la norma de descarga al alcantarillado de la Ciudad de México se dificulta debido a que las industrias y los usuarios domésticos se encuentran dispersos en toda la mancha urbana, además de no contarse con recursos materiales suficientes para establecer un adecuado programa de control. En consecuencia, el vertido de compuestos tóxicos al drenaje exige mayores niveles de tratamiento para que el agua residual pueda ser reutilizada, además de que afecta el funcionamiento de las actuales plantas de tratamiento biológico, construidas y operadas para reuso del agua dentro del Distrito Federal.

Además, la población que no dispone de sistema de alcantarillado, ubicada principalmente en las delegaciones periféricas y municipios conurbados, descarga el agua residual en fosas sépticas, grietas y barrancas, terrenos baldíos e incluso directamente en la calle, originando problemas de contaminación del acuífero.

El principal factor que impide la prestación del servicio de drenaje y tratamiento de aguas residuales a la totalidad de la población, es la falta de recursos financieros para ampliar la infraestructura existente. Por lo tanto, el gobierno del Distrito Federal requiere de elementos de juicio que le permitan optimizar sus limitados



recursos hacia la implantación de las acciones más efectivas para mitigar o resolver el problema lo antes posible.

1.1 Justificación

En 1997 se publicó el *Plan Maestro de Agua Potable* que constituyó un conjunto de estudios de apoyo, ampliación y mejoramiento, así como de estrategias de operación, construcción y mantenimiento integrados por la DGCOH (Dirección General Construcción y Operación Hidráulicas) este Plan contempla 3 dimensiones:

Ambiental. A través de la cual se busca contener y revertir la sobreexplotación del acuífero y en consecuencia reducir la problemática del hundimiento de la ciudad.

Social. En la cual se plantean acciones que permitan que toda la población, principalmente la ubicada en la zona oriente de la ciudad, disponga del agua suficiente, en cantidad y calidad, para satisfacer sus necesidades.

Económica. Comprende el fomento a la eficiencia del servicio de operación de agua, mediante la reducción del porcentaje actual de pérdidas a valores aceptables internacionalmente, y el aprovechamiento racional del recurso, dando énfasis en el reuso de las aguas tratadas.

La descarga de aguas residuales en el Distrito Federal asciende a 29.76 m³/s, de los cuales solo se tratan 5.95 m³/s (Castelán, 2000). Además, de las 21 plantas de tratamiento de aguas residuales operadas por la DGCOH, la mayoría trabaja por debajo del 50% de la capacidad de diseño (DGCOH, 1999).

El sistema de suministro y tratamiento de agua, casi en su totalidad, esta subsidiado por el gobierno local y, como consecuencia, se tiene una baja



recuperación del costo de inversión y son limitados los recursos disponibles para manejar y optimizar este sistema.

Teniendo en cuenta este panorama, se deben buscar alternativas de tratamiento y disposición de aguas residuales que den solución a corto plazo a la problemática existente y sean de bajo costo de instalación y mantenimiento o que sean atractivas para la inversión privada.

1.2 Objetivo

Identificar los problemas que tiene la Ciudad de México en el manejo de sus aguas residuales, y proponer sistemas de tratamiento, factibles de ser aplicados y sus posibles fuentes de financiamiento, de acuerdo con las características económicas, sociales y ambientales de las diferentes áreas de la ciudad.

1.3 Alcances y limitaciones

El presente trabajo se desarrolla enmarcado por los siguientes alcances y limitaciones:

- El diagnóstico de los sistemas actuales de tratamiento, redes de alcantarillado, datos de descarga, alternativas de solución y costos, corresponden a aquellos reportados en fuentes oficiales.
- No se realizarán análisis de laboratorio, dado que se cuenta con estudios de la calidad del agua residual proveniente del Distrito Federal, realizados por la Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal.



- Los sistemas alternativos que se consideran en este estudio son: PTARs, fosas sépticas, humedales, baños secos y aprovechamiento de agua de lluvia.
- Respecto a las PTAR los datos y consideraciones de diseño se basarán en las publicaciones realizadas por la EPA (Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos), debido a su importancia y aceptación internacional.
- Respecto a humedales, se evaluarán los costos de instalación y mantenimiento en base a los diseños existentes, dado que el fin de esta tesis no es el de diseño de sistemas de tratamiento, sino la identificación de sectores en la ciudad donde son aplicables estas tecnologías.
- Para baños secos, se emplearán datos de las compañías nacionales que se dedican a la instalación, mantenimiento y venta de los mismos, ya que su adquisición en el extranjero implicaría un mayor costo.
- El análisis de la posible participación de la Iniciativa Privada dentro del sistema de dotación de servicios para el tratamiento de agua residual se realizará con base en las experiencias conocidas y las restricciones legales existentes.
- Las propuestas finales para el uso de las diferentes alternativas quedarán indicadas a nivel de las características generales de las zonas donde podrían ser aplicadas.

1.4 Metodología

El primer paso para la realización de este trabajo, será la revisión bibliográfica de aquellos trabajos, publicaciones, tesis y proyectos, realizados tanto por



instituciones gubernamentales como por la iniciativa privada, referentes al manejo y sistemas de administración de las aguas residuales, en México u otros países.

Posteriormente se establecerán las bases teóricas sobre los sistemas de administración ambiental y recabará la información necesaria para definir el sistema actual de la situación técnica, económica y social, respecto a las aguas residuales de la Ciudad de México y crear un perfil de la comunidad.

El siguiente paso, establecido el perfil de la comunidad, será identificar las alternativas viables de aplicar en la Ciudad de México, plantear parámetros de selección, evaluar cada alternativa y seleccionar las mejores.

El último paso será proponer alternativas de participación de la iniciativa privada, basadas en experiencias previas y las necesidades de servicio y situación económica de cada zona.



Capítulo II

Marco teórico

En este capítulo se presentarán las generalidades sobre la contaminación del agua así como los parámetros para determinar la calidad del agua residual y una referencia a los problemas de salud originados por la descarga de aguas residuales sin tratamiento.

Se dará una breve explicación de los sistemas para el tratamiento de las aguas residuales tanto tradicionales (plantas de tratamiento de aguas residuales), como alternativos (humedales), así como de dos sistemas para reducir el aprovechamiento de agua potable (aprovechamiento del agua pluvial y empleo de sanitarios secos).

Al final de este capítulo se hace referencia a la normatividad vigente en materia de agua residual y las bases legales relacionadas con la participación de la Iniciativa Privada (IP) en el manejo de las aguas residuales.

2.1 Contaminación del agua

El agua, después de haber sido utilizada en algún proceso, ya sea municipal, doméstico, comercial, industrial, o agrícola, *uso primario*, llevará consigo componentes que en determinadas concentraciones, pueden producir efectos negativos a la salud humana o al ambiente, dañar la infraestructura hidráulica o inhibir los procesos de tratamiento de las aguas residuales. Estos componentes son llamados *parámetros de calidad del agua* y se dividen en: físicos, químicos y biológicos.



2.1.1 Parámetros de físicos calidad

La principal característica física es el contenido total de sólidos (materia en suspensión, sedimentable, coloidal y disuelta). Otros parámetros físicos son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad.

Sólidos totales. Es la cantidad de materia que se obtiene como residuo después de llevar el agua a evaporación en un rango de temperatura entre 103 y 105 °C.

Olores. Los olores en las aguas residuales son debidos generalmente a los gases liberados durante la descomposición de la materia orgánica presentes.

Temperatura. El agua residual por lo general tiene una temperatura mayor a la del agua de suministro debido a las descargas de agua caliente de las casas y las industrias.

Color. Este parámetro se utiliza para determinar cualitativamente la edad del agua residual. El agua residual reciente tiene usualmente un color grisáceo, al aumentar el tiempo de transporte en las redes de alcantarillado se desarrollan condiciones anaerobias que cambian el color del agua residual de gris a gris oscuro, hasta un color negro.

2.1.2 Parámetros químicos de calidad

El estudio de las características químicas del agua residual se divide en cuatro grupos, materia orgánica, medición de la materia orgánica, materia inorgánica y gases presentes en el agua residual

Materia orgánica. Los compuestos orgánicos están formados por combinaciones de carbono, hidrógeno y oxígeno, con la presencia en determinados casos de nitrógeno. Los principales compuestos orgánicos presentes en las aguas



residuales son las proteínas (40%-60%), carbohidratos (25%-50%) y grasas y aceites (10%). Además, existen otros compuestos orgánicos en menor cantidad, como los agentes tensoactivos, contaminantes orgánicos prioritarios (sustancias que de acuerdo a al EPA puedan ser cancerígenos, mutagénicos, o altamente tóxicos, tabla 2.1), compuestos orgánicos volátiles y pesticidas de uso agrícola.

Tabla 2.1 Contaminantes prioritarios

Contaminante	Efecto en la salud
Arsénico	Cancerígeno, mutágeno. A largo caso puede causar fatiga y pérdida de la energía. Dermatitis
Selenio	A largo plazo, pigmentación roja de los dientes, los dedos, y el cabello, debilidad general, depresión, irritación de la nariz y de la boca
Bario	Inflamable en forma de polvo a temperatura ambiente, largo plazo, incrementa la presión sanguínea y produce bloqueo del sistema nervioso
Cadmio	Inflamable en forma de polvo, tóxico por la inhalación del polvo o del vapor. Cancerígeno, los compuestos solubles del cadmio son altamente tóxicos. A largo plazo, se concentra en el hígado, riñones, páncreas.
Cromo	Los compuestos de cromo hexavalente son cancerígenos y corrosivos para los tejidos, a largo plazo provoca sensibilización de la piel y daño al riñón
Plomo	Tóxico por inhalación, ingestión del polvo o del vapor, a largo plazo, daño al cerebro., riñones, y durante el embarazo
Mercurio	Altamente tóxico por la absorción de la piel o inhalación del vapor, a largo plazo, tóxico para el sistema nervioso central, puede causar efectos durante el embarazo
Plata	Metal tóxico, a largo plazo produce una decoloración grisácea de la piel.
Benceno	Cancerígeno, altamente tóxico, inflamable
Etilbenceno	Toxico por ingestión, inhalación y absorción por la piel, irrita la piel
Clorobenceno	Riesgo de incendio moderado
Tetracloroetano	Irritante para la piel y los ojos

Fuente: Metcalf & Eddy, Ingeniería de Aguas Residuales, 1996



Medida del contenido orgánico. Los métodos de determinación se clasifican en dos grupos: los empleados para determinar altas concentraciones de contenido orgánico, mayores a 1 mg/l y los empleados para determinar las concentraciones a nivel traza, concentraciones de 0.001 mg/l a 1 mg/l. En el primer grupo, se encuentran las pruebas de **DBO** (demanda bioquímica de oxígeno), **DQO** (demanda química de oxígeno) y **COT** (carbono orgánico total). Para determinar concentraciones a nivel traza se emplean métodos instrumentales como la cromatografía de gases y la espectroscopia de masas.

- **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).** Es el parámetro de contaminación orgánica más empleado. La determinación de su valor está relacionado con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica, se emplea para dimensionar las instalaciones de tratamiento, medir la eficiencia de algunos procesos de tratamiento y verificar el cumplimiento de las normas.
- **Demanda química de oxígeno (DQO).** Se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente en oxígeno de la materia orgánica que puede oxidarse. La DQO de un agua residual suele ser mayor que la DBO, debido al mayor número de compuestos cuya oxidación tiene lugar por vía química frente a los que se oxidan por vía biológica. El tiempo aproximado de esta prueba es de 3 horas.
- **Carbono orgánico total (COT).** Especialmente indicado para pequeñas concentraciones de materia orgánica.

Materia inorgánica. Los parámetros que se emplean para medir los contaminantes de origen inorgánico en las aguas residuales son: el pH, la concentración de cloruros, la alcalinidad, la concentración total de nitrógeno, la



concentración de fósforo, azufre, compuestos tóxicos inorgánicos y metales pesados.

- **pH.** Es un parámetro crítico de la calidad del agua natural y residual, ya que determina el desarrollo de cualquier tipo de vida.
- **Alcalinidad.** Originada por la presencia de hidróxidos y bicarbonatos de calcio y magnesio, protege de cambios en el pH al agua ya sea residual o no. Generalmente el agua residual es alcalina.
- **Nitrógeno.** Tanto el nitrógeno como el fósforo son esenciales en el crecimiento de las plantas. La concentración del nitrógeno en el agua residual se debe a la presencia de cuatro especies químicas que lo contienen, materia proteínica (nitrógeno orgánico), amoníaco (NH_3), nitritos (NO_2^-) y nitratos (NO_3^-). El nitrógeno en forma de nitrito es una medida de la contaminación anterior al proceso de estabilización, ya que a pesar de encontrarse en bajas concentraciones es de suma importancia debido a su alta toxicidad para la mayoría de la fauna acuática. Cuando el agua residual tratada se reutilice para la recarga de cuerpos de agua subterránea, la concentración de nitrógeno en forma de nitratos no debe de exceder los 45 mg/l (EPA 1982)
- **Compuestos tóxicos inorgánicos y metales pesados.** Desde el punto de vista del desempeño de una planta de tratamiento de aguas residuales, los compuestos que llegan a afectar el metabolismo de los microorganismos presentes, están los cationes de cobre, plomo, plata, cromo, arsénico y boro. Por su toxicidad, otro constituyente importante de las aguas residuales, aunque su concentración sólo sea nivel traza, es el contenido de metales pesados, tales como el níquel, el manganeso, el plomo, el cromo, el cadmio, el cinc, el cobre, el hierro y el mercurio.



Gases. Los gases que se encuentran con mayor frecuencia en las aguas residuales brutas (sin tratar), son: nitrógeno, oxígeno, bióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amoníaco y metano. Los tres últimos provenientes de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales.

2.1.3 Parámetros biológicos de calidad

Estos parámetros incluyen todos los organismos vivos que se encuentren en el agua: bacterias, hongos, algas, protozoos, plantas, animales (desde gusanos microscópicos hasta crustáceos macroscópicos), virus y organismos patógenos medidos como indicadores. En la tabla 2.2 se muestran los tipos y concentración de microorganismos típicamente presentes en las aguas residuales domésticas expresada como el *Número Más Probable (NPM)*, estimación estadística de la concentración absoluta.

Tabla 2.2 Tipos y número de microorganismos

Organismo	Concentración (número/ml)
Coliformes totales	$10^5 - 10^6$
Coliformes fecales	$10^4 - 10^5$
Estreptococos fecales	$10^3 - 10^4$
Estreptococos	$10^2 - 10^3$
Shigella	presentes
Salmonella	$10^0 - 10^2$
Pseudomonas aeruginosa	$10^1 - 10^2$
Clostridium perringes	$10^1 - 10^3$
Mycobacterium tuberculosis	presentes



Tabla 2.2 (Continuación)

Organismo	Concentración (número/ml)
Cistos de protozoos	$10^1 - 10^3$
Cistos de giarda	$10^1 - 10^2$
Cistos de cryptosporidium	$10^1 - 10^1$
Huevos de helmintos	$10^2 - 10^1$
Virus entéricos	$10^1 - 10^2$

Fuente: Metcalf & Eddy, Ingeniería de Aguas Residuales, 1996

Algunos de los microorganismos presentes en las aguas residuales pueden producir enfermedades como la disentería, la fiebre tifoidea o el cólera. En la tabla 2.3 se muestran algunas enfermedades producidas por los organismos patógenos presentes en las aguas residuales brutas.

Problemas de salud en el Valle del Mezquital. Uno de los emisores del sistema de drenaje de la Ciudad de México conduce el agua al río Tula. En su paso por el Valle del Mezquital los habitantes de la zona aprovechan el agua para el riego de sus cultivos; las aguas residuales al estar contaminadas con organismos patógenos y sustancias tóxicas constituyen un riesgo para la salud de los agricultores y consumidores de esos productos. En general, la concentración de coliformes fecales en la zona esta entre 20 y $6 \times 10^8/100$ ml de individuos y la concentración de huevos de helminto esta entre 1 a 135 huevos/l (Romero, 1997). En esta zona, existe un alto riesgo de infecciones por *áscaris lumbricoides* en los hijos de los trabajadores que usan agua residual cruda.



Tabla 2.3 Enfermedades producidas por organismos en aguas residuales

Organismo	Enfermedad
Bacterias:	
Salmonella thyphi	Fiebre tifoidea
Salmonella	Salmonelosis
Vibrio cholerea	Cólera
Virus:	
Hepatitis A	Hepatitis infecciosas
Rotavirus	Gastroenteritis
Protozoos:	
Entamoeba histolytica	Amebiasis (disentería amébrica)
Helmintos:	
Áscaris lumbricoides	Áscaris
Enterobius versicularis	Enterobiasis (gusanos)

Fuente: Metcalf & Eddy, Ingeniería de Aguas Residuales, 1996

2.2 Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)

La depuración de las aguas residuales persigue como objetivo reducir la contaminación del agua proveniente de los sistemas de drenaje de una localidad, con el fin de evitar y disminuir los efectos adversos al medio ambiente que se generen por descargar el agua residual sin tratar ya sean ríos, mares, lagos. Para lograr este objetivo es necesario que el agua residual sin tratar (cruda), se someta a una serie de procesos físicos, químicos, fisico-químicos y biológicos, ya sea en condiciones aeróbicas, anaeróbicas, o ambas, que permitan realizar una depuración integral bajo las mejores condiciones técnicas y económicas posibles.



2.2.1 Niveles de tratamiento

Durante la depuración del agua residual en una planta de tratamiento están presentes diferentes procesos de tipo físico, químico, biológico o fisicoquímico; estos procesos pueden aplicarse aisladamente, o emplear más de uno en forma consecutiva. El nivel de tratamiento que reciba el agua residual dependerá tanto de la calidad del influente (agua residual cruda), como del destino final del efluente (agua residual tratada), sin dejar a un lado la normatividad existente. En general, son tres los niveles de tratamiento que puede alcanzar el agua residual en una planta:

- a) Tratamiento primario, o físico
- b) Tratamiento secundario, normalmente de tipo biológico
- c) Tratamiento terciario o avanzado; físico, químico o fisicoquímico

2.2.1.1 Tratamiento primario

En el tratamiento primario se elimina una fracción de los sólidos en suspensión y de la materia orgánica del agua residual mediante procesos físicos cuyo objetivo principal es eliminar del agua aquellas partículas o sólidos gruesos que puedan interferir con tratamientos posteriores. Entre los principales procesos físicos se encuentran:

Cribado. El cribado se realiza por medio de rejillas (rejas, mallas o cribas) que se instalan en las líneas de captación de la planta de tratamiento y tiene como objetivo retener y separar los materiales voluminosos, flotantes y en suspensión, que arrastra consigo el agua residual.



Desengrasado. Su misión es la remoción de grasas y aceites y de elementos flotantes en las aguas.

Flotación. Se emplea para la separación de partículas sólidas o líquidas, mediante el burbujeo fino de aire para la suspensión de estas partículas.

Sedimentación. Las partículas que pueden sedimentar en períodos de tiempo razonables pueden ser removidas en un tanque sedimentador. Los tanques de sedimentación son rectangulares o circulares, ya sea con una alimentación radial o superficial; pueden remover cerca del 70% de los sólidos sedimentables y 30% de la DBO_5

2.2.1.2 Tratamiento secundario

El objetivo principal de un tratamiento secundario es la eliminación de los sólidos en suspensión y de los compuestos orgánicos biodegradables, generalmente mediante procesos biológicos; dependiendo de la naturaleza de los microorganismos que se empleen pueden ser aerobios o anaerobios. Cuando el agua residual presenta contaminantes que no pueden ser atacados por los microorganismos, es necesario auxiliarse de procesos fisicoquímicos para su eliminación. De aquí que los tratamientos secundarios pueden ser mediante procesos biológicos o fisicoquímicos.

Procesos biológicos. Aprovechan la capacidad natural de los microorganismos presentes en el agua residual para convertir la materia orgánica contaminante en bióxido de carbono (CO_2), nuevo tejido celular de las bacterias, y según el metabolismo de las bacterias, metano (CH_4). De acuerdo al metabolismo de los microorganismos los procesos biológicos pueden clasificarse de forma general en:



- **Procesos aerobios.** Emplean bacterias que requieren de una fuente de oxígeno molecular para llevar a cabo sus funciones metabólicas, transformando la materia orgánica en bióxido de carbono y nuevo tejido celular.
- **Procesos anaerobios.** Las bacterias convierten en ausencia de oxígeno molecular la materia orgánica en metano, nuevo tejido celular y bióxido de carbono.
- **Procesos anóxicos.** Existe un estado intermedio entre el aerobio y el anaerobio que se conoce con el nombre de anóxico el cual es caracterizado por la ausencia de oxígeno pero con presencia de aceptores de electrones (NO_3^- , SO_4^- , Fe_2O_3 , MnO_2).

A los microorganismos presentes en el agua residual se les conoce como *biomasa* y a la carga orgánica, mediada en DBO, se le conoce como sustrato.

Fisicoquímicos. En estos procesos se requiere la adición al agua de productos químicos que modificarán las características de los contaminantes presentes, acompañados de algún proceso físico, como el burbujeo o la agitación. Algunos de estos procesos son indispensables antes del tratamiento biológico descrito anteriormente, algunos de estos tratamientos son:

- **Coagulación-Floculación.** Empleado cuando existe dificultad para la sedimentación natural de las partículas en suspensión.
- **Precipitación química.** Se transforman los contaminantes inorgánicos solubles en otras especies menos solubles en agua, que puedan eliminarse por sedimentación.



2.2.1.3 Tratamiento terciario

Cuando se requiere de una calidad superior a la obtenida durante el tratamiento secundario, el agua se somete a otro tratamiento, denominado terciario o avanzado. Dependiendo de los compuestos que se deseen eliminar será la naturaleza del tratamiento, algunos de los procesos involucrados en estos tratamientos son: filtración (lecho de arena, antracita o diatomeas), precipitación, coagulación, adsorción (carbón activado), intercambio iónico, osmosis inversa, electrodiálisis, cloración, ozonización y procesos de reducción de nutrientes.

Procesos físicos. Entre estos destacan:

- **Filtración.** Permite la eliminación del floculo biológico proveniente del efluente decantado del tratamiento secundario, los precipitados obtenidos de la precipitación de fosfatos y de los sólidos que permanecen después de coagulación química.
- **Procesos de membrana.** Empleado para la retención de contaminantes en una fase permeable.

Procesos fisicoquímicos:

- **Adsorción.** Necesaria para la eliminación de microcontaminantes, como el color y los fenoles.
- **Intercambio iónico.** Se utiliza para eliminar especies inorgánicas ionizadas.

Procesos biológicos para la reducción de nutrientes:

- **Nitrificación-desnitrificación.** Es la oxidación biológica del amoníaco a nitratos, mediante dos grupos de bacterias que usan como fuente de carbono y energía la oxidación de compuestos inorgánicos como



amoníaco y los nitritos. Las bacterias nitrosomonas oxidan el nitrógeno del amoníaco a nitrito y las nitrobacter de nitrito a nitrato, este tipo de proceso es reversible, es por esta razón que se conoce como nitrificación-desnitrificación. La nitrificación es un proceso deseable cuando las aguas tratadas serán usadas para irrigación, ya que los nitratos sirven de abono, o cuando el agua se verterá a cuerpos de agua, donde el amoníaco resultaría tóxico para la fauna acuática.

2.2.1.4 Desinfección

La desinfección es un proceso complementario en el tratamiento de aguas residuales que tiene por objetivo eliminar del agua todos aquellos microorganismos patógenos para el ser humano. Existe una variedad importante de métodos de desinfección que dependen del destino del agua tratada y del volumen de agua a tratar, siendo la cloración el método más utilizado y económico.

La desinfección puede realizarse por dos métodos: físicos y químicos. Históricamente, el cloro fue el desinfectante principal de los métodos químicos que se usaba en las plantas de tratamiento en todo el mundo. El cloro es un oxidante fuerte que además de desinfectar, permite la remoción de color, hierro y manganeso.

Además del cloro gaseoso, se utilizan sus derivados entre los que encuentran los hipocloritos de sodio y calcio, el dióxido de cloro y las cloroaminas. El cloro y sus derivados no permiten sin embargo la eliminación de los virus del cólera. Las dosis establecidas de cloro por la CNA de acuerdo con los tratamientos empleados, se muestran en la tabla 2.4



Entre los diferentes agentes oxidantes alternativos del método químico de desinfección, se tiene: el ozono solo o combinado con agua oxigenada, con luz ultravioleta, con ultrasonido, agua oxigenada, permanganato de potasio, plata y cobre solos o combinados, ferratos, etc.

En el caso del método físico de desinfección, el proceso más común es la irradiación con luz ultravioleta.

Tabla 2.4 Criterios de dosificación de cloro

Nivel del tratamiento del efluente	Dosis (mg/L)
Aguas crudas	6 - 25
Sedimentación primaria	5 - 20
Tratamiento de precipitación química	3 - 10
Filtros percoladores	3 - 10
Lodos activados	2 - 8

Fuente: CNA Manual de Tratamiento de Aguas Residuales, 1994

2.2.2 Tipo de plantas de tratamiento biológico

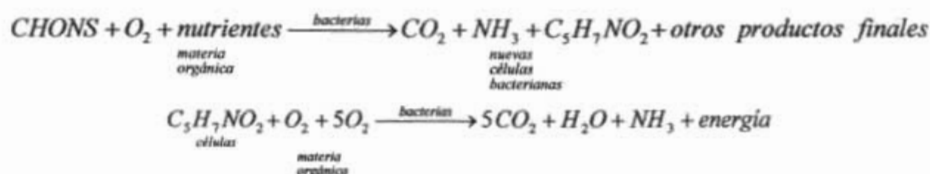
Según las condiciones de aireación en que el tratamiento biológico se lleve a cabo, las PTARs se pueden dividir en: plantas de tipo aerobio o de tipo anaerobio. Los sistemas aerobios se clasifican de acuerdo la forma en que se encuentra la biomasa en: procesos de medio suspendido y proceso de medio fijo. Los sistemas anaerobios se clasifican de acuerdo a la configuración del reactor, en sistemas de primera, segunda o tercera generación.



2.2.2.1 Plantas aerobias de medio en suspensión

En este tipo de proceso la biomasa se mantiene en suspensión dentro del líquido. Para lograr las condiciones de aireación necesarias para el desarrollo de los microorganismos se suministra aire u oxígeno por medio de sistemas mecánicos, tales como aireadores ya sean de tipo superficial, sumergible, o por medio de difusores que suministran el flujo de aire en forma de burbujas finas, medianas o gruesas.

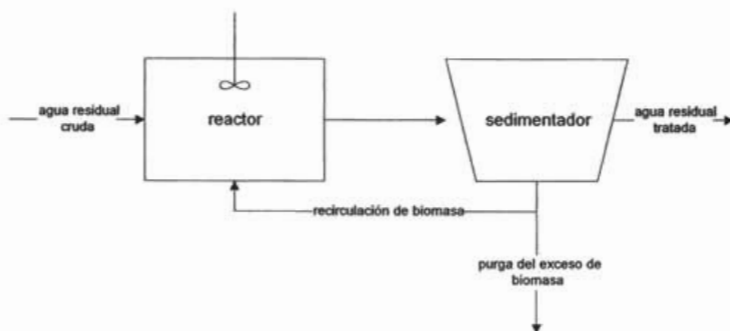
El proceso de degradación de la materia orgánica se lleva a cabo de acuerdo a las siguientes reacciones:



La biomasa se mantiene en agitación en el tanque de aireación (reactor) desde donde pasa al tanque de sedimentación. Una parte de la biomasa sedimentada es devuelta al tanque de agitación, para mantener una población adecuada, y una parte se purga del sistema como lodo en exceso, el esquema del proceso se muestra en la figura 2.1. Las variantes más comunes del proceso de lodos activado son *aireación extendida*, *zanjas de oxidación* y *reactor discontinuo secuencial*, conocido por sus iniciales en inglés como *SBR*, Sequencing Batch Reactor, EPA 2000



Fig. 2.1 Diagrama de flujo para un reactor de lodos activados



Lodos activados-aireación extendida. Las etapas típicas en esta modalidad son: cribado, equalización, tanque de aireación, clarificación (sedimentación) y desinfección. La aireación puede realizarse por medio de sistemas mecánicos o por medio de difusores, la etapa de mezclado se puede llevar a cabo mediante el sistema de aireación o con sistemas mecánicos. (EPA 2000).

Zanjas de Oxidación. Constituyen una de las versiones de lodos activados mas ampliamente aplicadas al tratamiento de aguas residuales, el sistema de tratamiento consta de las siguientes etapas, figura 2.2

1. Después del tratamiento primario, las aguas ingresan a una *cámara de premezclado*, donde se mezclan con los lodos de recirculación provenientes del *sedimentador secundario*, para ingresar conjuntamente al tanque de aireación, donde tiene lugar la degradación biológica por parte de la población microbiana mantenida al interior del mismo en una concentración dada.
2. El efluente del *tanque de aireación*, es enviado al *sedimentador secundario*, desde donde se recolecta el agua clarificada para enviarla al sistema de desinfección.



3. Por otro lado, parte del lodo decantado en el sedimentador es recirculado al tanque de premezclado, con el objeto de mantener una proporción constante entre los microorganismos y el sustrato en el interior del tanque de aireación. El resto de los lodos, es enviado a al sistema de tratamiento de los mismos.

Fig. 2.2 Diagrama de flujo para las zanjas de oxidación



Reactores SBR. El reactor secuencial por lotes (Sequencing Batch Reactor, SBR) es un sistema de lodos activados para tratamiento del agua residual que utiliza ciclos de llenado y descarga. En este sistema el agua residual entra en un lote a un reactor único, recibe tratamiento para remover componentes indeseables y luego se descarga. La homogenización de caudales, la aireación y la sedimentación se logran en ese reactor único. Para optimizar el desempeño del sistema, se utilizan dos o más reactores en una secuencia de operación predeterminada. Los sistemas SBR han sido utilizados con éxito para tratar aguas residuales tanto municipales como industriales.

Los procesos unitarios de los SBR y los sistemas convencionales de lodos activados son iguales. Un informe de la EPA de 1993 resumió esto al indicar que "los SBR son simplemente sistemas de lodos activados que operan en el tiempo



en lugar del espacio". La diferencia entre las dos tecnologías es que los SBR logran la homogenización de caudales, el tratamiento biológico y la sedimentación secundaria en un tanque único usando una secuencia de tiempo controlada.

2.2.2.2 Plantas aerobias de medio fijo.

A diferencia del medio suspendido, los microorganismos están fijos en un medio inerte, como piedras, materiales cerámicos o plásticos. Los sistemas más comunes son los llamados filtros percoladores y los biodiscos.

Filtros percoladores. El proceso involucra el contacto entre el agua residual que contiene contaminantes orgánicos y una población de microorganismos fijos o adheridos a la superficie del medio filtrante. Como medio filtrante típicamente se usan rocas o materiales sintéticos tales como anillos plásticos. El agua residual es distribuida sobre el filtro mediante un sistema de distribución fijo o rotatorio. El agua residual forma una delgada capa a medida que desciende a través del filtro y sobre la capa de microorganismos que está sobre la superficie del relleno. A medida que el distribuidor rota, la capa de microorganismos es expuesta alternativamente al flujo de agua residual y al aire. En el caso de un sistema de distribución fijo, el flujo de agua residual es sometido a un ciclo de encendido y apagado, manteniendo una dosificación especificada, para asegurar que un suministro adecuado de oxígeno está disponible para los microorganismos. El oxígeno del aire llega a los microorganismos a través de los espacios vacíos en el relleno. Los filtros percoladores disponen de un sistema de drenaje inferior para recolectar el agua residual tratada y todo material biológico que pueda desprenderse desde la superficie del relleno. El material orgánico presente en el agua residual es adsorbido a la película biológica. La degradación aeróbica de los contaminantes orgánicos hace que los microorganismos crezcan, resultando en un aumento del grosor de la película biológica. El oxígeno que se difunde en la



película es consumido antes de penetrarla en su totalidad. Luego, se establece un medio anaeróbico en la proximidad de la superficie del medio filtrante. Eventualmente, los microorganismos en la superficie del relleno comienzan una fase de crecimiento endógeno, debido a la ausencia de material orgánico (metabolizado totalmente antes de llegar a esta zona), y pierden la capacidad de adherirse a la superficie. El agua residual lava la película sobre el relleno y una nueva película biológica comienza a crecer.

Biodiscos. Los contactores biológicos rotatorios o biodiscos, consisten de una serie de discos paralelos, muy cercanos entre sí, que son rotados mientras están sumergidos parcialmente en un estanque de agua residual. Los discos están contruidos de poliestireno, cloruro de polivinilo, o materiales similares. Cada disco es recubierto con una película biológica que degrada el material orgánico disuelto en el agua residual. La rotación de los discos permite la exposición de los microorganismos al aire. A medida que un disco rota fuera el agua, la película de agua que lo cubre es expuesta al aire donde hay oxígeno disponible para la descomposición aeróbica. Un exceso de biomasa es producido que se desprende del disco y es separado del efluente del proceso en un sedimentador secundario.
Fig. 2.3

Fig. 2.3 Disco rotatorio





2.2.2.3 Plantas anaerobias

Principio de degradación anaeróbica. El proceso de degradación anaerobia se lleva a cabo en ausencia de oxígeno. Los microorganismos degradan la materia orgánica en sucesivas etapas. En una aproximación general, podemos diferenciar tres etapas fundamentales, *hidrólisis-acidogénesis*, *acetogénesis* y por último la *metanogénesis*.

En el proceso anaerobio, sólo una pequeña cantidad de la energía contenida en el sustrato es utilizada en el mantenimiento y crecimiento celular, quedando una gran parte en los productos, en forma de biogas. Esto hace que el tiempo de crecimiento sea lento, lo que condiciona el diseño y la operación de los digestores anaerobios.

Tecnologías de digestión anaerobia. Los primeros reactores anaerobios que se utilizaron fueron el *digestor de mezcla completa* y el *proceso de contacto anaerobio*. En el primero el tiempo de retención de los sólidos era igual al tiempo de retención hidráulico y en el segundo se incorporó un decantador después del tanque para clarificar el efluente y recircular los lodos con lo que se consiguió aumentar el tiempo de retención de los sólidos en este diseño. En los procesos modernos, denominados de alta velocidad, la característica común a todos ellos es la retención de la biomasa dentro del reactor, de manera que el tiempo de retención de los sólidos es mucho mayor que el tiempo de retención hidráulico por lo que se consigue aumentar la eficacia del proceso.

La clasificación de los reactores anaerobios de alta velocidad, se puede hacer en función de la manera en la que retienen la biomasa en:

- Medio poroso (Filtro Anaerobio)
- Película fija, AFF (Anaerobic Fixed Film), o sobre partículas móviles como en el AAFEB (Anaerobic Attached Film Expanded Bed)



- Lecho expandido/fluidizado (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

Filtro anaerobio. En el filtro anaerobio la biomasa se encuentra adherida a un medio poroso, relleno, que ocupa todo el reactor. Como relleno se utilizan todo tipo de materiales: cantos rodados, piedra caliza, granito, trozos de ladrillo, conchas de mejillón, y gran variedad de anillos plásticos. En realidad el filtro es un reactor mixto de lodos suspendidos y lodos inmobilizados. En la superficie del relleno se forma una biopelícula, mientras que en los huecos la biomasa puede quedar suspendida.

Reactores de película fija. Se desarrollaron partiendo del Filtro Anaerobio, buscando eliminar los problemas de saturación del relleno. Para ello se sustituye el relleno al azar por un relleno ordenado, y sobre su pared se adhiere y desarrolla la biopelícula. La alimentación se realiza por la parte superior del reactor.

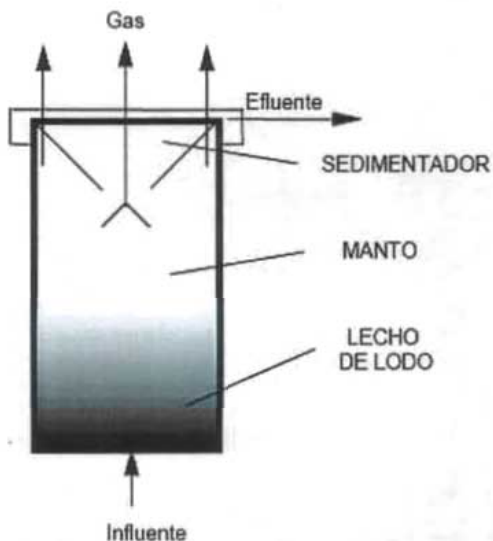
Reactores de lecho expandido/fluidizado. Tienen el mismo fundamento que los reactores de película fija, las bacterias son inmobilizadas sobre pequeñas partículas de soporte sólidas, y lo único que varía es el grado de expansión del lecho. Cuando se parte de un lecho poroso, y se aumenta la velocidad superficial del fluido, se alcanza un estado inicial caracterizado por el alargamiento del lecho, aún existe contacto físico entre partículas, la porosidad aumenta y se obtiene un lecho expandido. Si la velocidad superficial del fluido continúa aumentando, el grado de expansión del lecho es tal que las partículas dejan de estar en contacto entre sí, desplazándose arriba y abajo en un movimiento típico de lecho fluidizado. Con este sistema se consigue que la totalidad de la película bacteriana esté en contacto con el agua a tratar, aumentando la eficacia del sistema.

Reactor UASB. Desarrollado en Holanda por Lettinga y sus colaboradores en los años 70. El diseño de un reactor UASB consiste en una zona de reacción en la parte inferior, en la que se acumula la biomasa, la de mejor sedimentabilidad en el fondo y encima los lodos más ligeros, formando todo el lecho de lodos. Un



separador gas-sólido-líquido en la parte superior, impide la salida de los sólidos del reactor, separándolos del gas producido y del efluente líquido. Las grandes concentraciones de biomasa con elevada actividad, permiten el funcionamiento a altas velocidades de carga orgánica con buenas eficacias de eliminación. Esta biomasa puede estar en forma de gránulos compactos o en forma de lodos de gran sedimentabilidad. Figura 2.4

Fig. 2.4 Esquema de un reactor UASB



2.2.3 Costos de instalación y operación

Actualmente existen diversas compañías nacionales que se dedican a la venta de equipo de tratamiento, así como el diseño y/o la construcción de PTARs. Los datos de estas compañías se presentan al final de este documento, mencionando aquí solo el nombre de algunas de ellas: Agua, Servicios de Ingeniería,



Mantenimiento y Equipos S.A. de C.V. (Asime); IBTECH, S.A. de C.V; TQM; H₂Horizontes; Biotecnología Ambiental.

Obviamente, el costo de instalación y operación dependen del tamaño, especificaciones de operación y métodos de tratamiento de la planta, así como del tipo de contratación del servicio; pero, en general, está en un rango de 0.70 a 4.50 pesos/m³ de agua residual tratada para una planta de tratamiento biológico o fisicoquímico (Martínez, 2001).

2.2.4 Consideraciones ambientales

La mayoría de las compañías incluyen en el diseño de las PTARs la digestión de los lodos producidos en el tratamiento secundario. Sin embargo en la actualidad, como se mencionará en el capítulo 3, ni las plantas operadas por la DGCOH, (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica), ni las concesionadas, cuentan con sistemas de tratamiento de los lodos producidos y los vierten directamente al drenaje, ocasionando que la concentración de contaminantes y agentes patógenos se incremente en las zonas de descarga.

2.3 Fosas sépticas

En las comunidades donde no se cuenta, o no es viable, la instalación del sistema de drenaje, se puede recurrir a la construcción de fosas sépticas para el tratamiento parcial de sus aguas residuales. Estos sistemas se pueden construir *in situ* o adquirir tanques prefabricados de cemento, fibra de vidrio o polietileno de alta densidad (materiales resistentes que garantizan periodos de vida mayor a los 10 años).

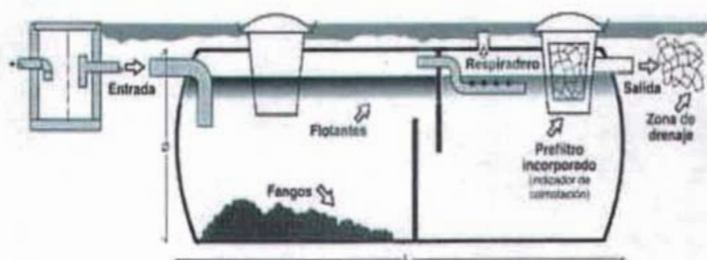


Estos sistemas constan de dos partes: tanque séptico y el sistema de infiltración (ver figura 2.5):

Tanque séptico. Los sólidos sedimentables se depositan en el fondo de este tanque formando una capa de lodo que se descompone anaerómicamente para convertirse en compuestos más estables como dióxido de carbono, metano y sulfuro de hidrógeno. Cuando las bacterias anaerobias no alcanzan a degradar completamente la materia orgánica, es necesario agregar un proceso aerobio suficientemente oxigenado (aquellos desechos que no pueden ser eliminados por la degradación anaerobia deberán removerse por bombeo).

Sistema de infiltración. El efluente que sale del tanque séptico aun contiene sustancias susceptibles de degradación y organismos patógenos que deberán ser tratados de alguna manera: un sistema económico es mediante la infiltración natural aprovechando la porosidad del suelo. En teoría, si el efluente atraviesa una capa mayor de 1.5 m de tierra, se vuelve lo suficientemente puro, incluso para consumo humano (Max y Alth, 1997).

Figura 2.5 Esquema de una fosa séptica





2.3.1 Costos de instalación y operación

Los costos de una fosa séptica dependen del costo de la obra civil, tanque séptico (costo del tanque prefabricado o material de construcción) y costo de instalación y mantenimiento. El costo promedio de un tanque prefabricado para dar servicio a 10 habitantes es de \$6,300 incluyendo su instalación; mientras que el costo de la obra civil dependerá de la zona donde se instale el tanque y de los materiales de construcción utilizados. Los costos de operación de este sistema son prácticamente nulos ya que funciona por gravedad. En la tabla 2.5 se muestran a detalle los costos de construcción de una fosa séptica en un suelo rocoso.

Tabla 2.5 Costos de instalación de fosas sépticas prefabricadas en material rocoso

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
Excavación con equipo en roca fija, en material seco de 0.00 a 2.00 metros de profundidad.	M ³	6.00	400.00	2,400.00
Plantilla apisonada al 85% Proctor en zanjas, con material producto de banco.	M ³	0.80	84.78	67.82
Acondicionamiento de letrinas existentes como pozos de absorción.	PZA	1.00*	500.00	500.00
Suministro de fosas sépticas con capacidad de hasta 10 habitantes.	PZA	1.00	4,045.00	4,045.00
Instalación de fosa prefabricada.	PZA	1.00	2,228.05	2,228.05
Relleno en zanjas a volteo con material producto de la excavación.	M ³	0.72	18.00	12.96
Compactado al 85% Proctor, con material de banco.	M ³	0.48	71.90	34.51
Suministro y fabricación de losa tapa de 15 cm., de concreto armado	M ²	4.00	450.00	1,800.00
Carga y acarreo de material producto de la excavación	M ³	5.28	160.00	844.80

TOTAL 11,933.15



2.3.2 Consideraciones ambientales

Sí este sistema es instalado correctamente, no presentará olores. Como ya se menciono, el efluente aún presenta condiciones sépticas, por lo que el sistema de filtrado no podrá realizarse a menos de 20m de pozos, ríos y otros cuerpos de agua, para garantizar que no se contaminen. El mayor inconveniente ambiental de esta tecnología es la posible presencia de grietas en el tanque séptico, lo cual ocasionaría infiltraciones al terreno y la posible contaminación de los mantos freáticos. El rendimiento de una fosa séptica, oscila entre el 30% al 40% de eliminación de la carga orgánica (DBO_5) y de un 40% al 50% en SST. Respecto a los gases generados producto de la descomposición anaerobia, el sistema debe de contar con un sistema de ventilación para su eliminación.

2.4 Humedales

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas con una frecuencia y duración tales, que sean suficientes para mantener condiciones saturadas. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm con plantas emergentes como espadañas, carrizos y juncos, figura 2.6. La vegetación proporciona superficies para la formación de películas bacterianas, facilita la filtración y la adsorción de los constituyentes del agua residual, permite la transferencia de oxígeno a la columna de agua y controla el crecimiento de algas al limitar la penetración de luz solar.

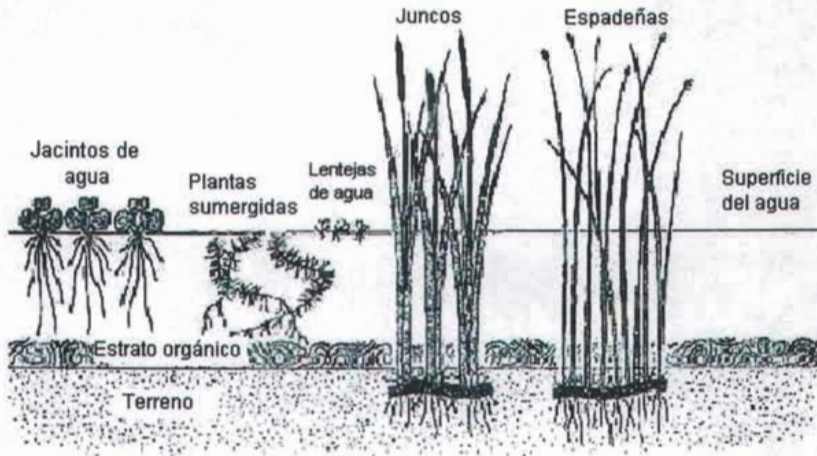
Los humedales tienen tres funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales, son estas:

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



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

Fig. 2.6 Vegetación típica de los humedales



Fuente: EPA 2000

Existen dos tipos de sistemas de humedales artificiales desarrollados para el tratamiento de agua residual: Sistemas de Flujo Libre Superficial (FLS) y Sistemas de Flujo Subsuperficial (FS).

2.4.1 Humedales de flujo libre superficial (FLS).

Se definen como humedales artificiales de flujo libre superficial, FLS, a aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. La mayoría de los humedales naturales son sistemas FLS entre los que se incluyen las zonas pantanosas (principalmente de vegetación arbórea), y las praderas inundadas (principalmente con vegetación herbácea).



En los humedales FLS el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga. En algunos casos, el agua se pierde completamente por evapotranspiración y percolación en el humedal. Un diagrama de un humedal FLS se presenta en la figura 2.7

Las metas de diseño de los humedales construidos van desde un uso dedicado exclusivamente a las funciones básicas de tratamiento hasta sistemas que proporcionan tratamiento avanzado y/o en combinación con mejoras del hábitat de la vida silvestre y oportunidades para la recreación pública. El tamaño de los sistemas de humedales FLS va de pequeñas unidades para tratamiento en el sitio de efluentes de tanques sépticos hasta grandes unidades de más de 16,888 hectáreas (U.S. EPA 2000). Los humedales en operación en los Estados Unidos diseñados para el tratamiento de aguas residuales tienen un rango de de 3,785 litros por día hasta más de 75,708 m³/d

Los sistemas de humedales FLS remueven en forma confiable la DBO, la demanda química de oxígeno (DQO) y los SST. También pueden producir bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo con tiempos de retención suficientemente largos. Los metales son también removidos eficazmente y se puede esperar también una reducción de un orden de magnitud en coliformes fecales.

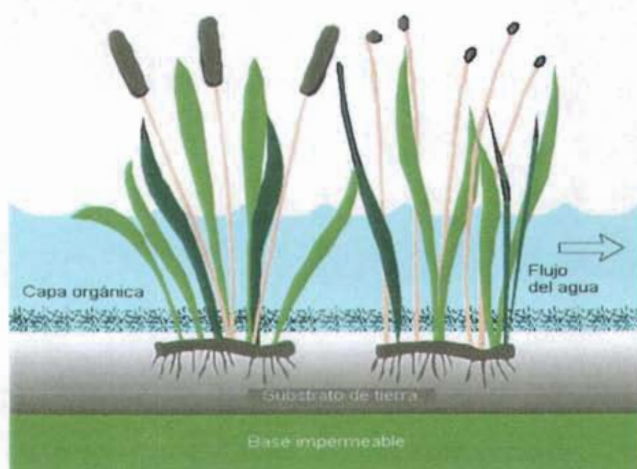
Criterios de Diseño. El contaminante que requiere la mayor área para su remoción determina el tamaño del área de tratamiento del humedal, la cual corresponde a la superficie del fondo de las celdas del humedal. La distribución del flujo de agua residual en toda la superficie debe ser uniforme para que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

Los sistemas de humedales son ecosistemas vivos en los cuales los ciclos de vida y muerte de la biota producen residuos que pueden ser medidos en función de



DBO, SST, nitrógeno, fósforo y coliformes fecales. Como resultado, y en forma independiente del tamaño del humedal o las características del afluente, en estos sistemas siempre existen concentraciones naturales de esos materiales. La tabla 2.5 resume esas concentraciones naturales.

Fig. 2.7 Esquema de un Humedal de Flujo Libre Superficial (FLS)



Fuente: EPA 2000

Debido a que la remoción de la DBO y las varias formas de nitrógeno dependen de la temperatura del agua, la temperatura del humedal debe conocerse para lograr un diseño adecuado. La temperatura del agua en sistemas con un tiempo hidráulico de retención largo (mayor a 10 días) se acerca a la temperatura promedio del aire, excepto en periodos de invierno cuando se presentan temperaturas bajo cero grados.

La resistencia al flujo impacta la configuración seleccionada para las celdas del humedal: entre más larga sea la trayectoria de flujo, más grande será la resistencia. Para evitar problemas de tipo hidráulico, se recomienda un cociente máximo entre longitud y el ancho de 4 a 1.



Tabla 2.6 Concentraciones Naturales en Humedales de FLS

Constituyente	Unidades	Rango de concentración
DBO5	mg/L	1 a 10
SST	mg/L	1 a 6
Nitrógeno total	mg/L	1 a 3
Nitrógeno como NH ₃ /NH ₄	mg/L	menos de 0.1
Nitrógeno como NO ₃	mg/L	menos de 0.1
Fósforo total	mg/L	menos de 0.2
Coliformes fecales	NMP/100 mL	50 a 500

Fuente: Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales, 2000

Operación y mantenimiento. Los requisitos de operación y mantenimiento rutinarios de los humedales FLS son similares a los de las lagunas facultativas. Estos incluyen el control hidráulico y de profundidad del agua, la limpieza de las estructuras de entrada y descarga, el corte de la hierba en bermas, la inspección de la integridad de las mismas, el manejo de la vegetación del humedal, el control de mosquitos y vectores de enfermedades, y el monitoreo rutinario.

La profundidad del agua en el humedal puede requerir ajuste periódico según sea la estación o en respuesta al aumento a largo plazo de la resistencia por la acumulación de detritos en el canal del humedal. Los mosquitos pueden requerir control dependiendo de las condiciones y requisitos locales. Las poblaciones de mosquitos en el humedal de tratamiento no debe exceder el de los humedales naturales cercanos.



2.4.1.1 Costos de instalación y operación

Los principales elementos que se incluyen en los costos de inversión de los humedales FLS son similares a los de sistemas de lagunas, incluyendo el costo del terreno, la evaluación del sitio, la limpieza del mismo, la movilización de suelos, el recubrimiento, el medio de sembrado, las plantas, las estructuras de entrada y descarga, las cercas, tuberías misceláneas, la ingeniería, los costos legales, las contingencias, y los gastos fijos y ganancia del contratista. El recubrimiento puede ser el elemento más costoso. Por ejemplo, una membrana lineal se podría acercar a un cuarenta por ciento de los costos de construcción. En la tabla 2.6 se muestran valores comparativos de los costos de inversión y de operación y mantenimiento para un humedal con recubrimiento de suelo impermeable y de membrana plástica, con capacidad de 379m³ por día.

Tabla 2.7 Costos de inversión, operación y mantenimiento de humedales FLS

Elemento	Costo, USD	
	Recubrimiento de suelo natural	Recubrimiento de membrana plástica
Costo del terreno	16,000	16,000
Evaluación del sitio	3,600	3,600
Limpieza del sitio	6,600	6,600
Movimiento de tierra	33,000	33,000
Recubrimiento	0	66,000
Medio de grava	142,100	142,100
Plantas	5,000	5,000
Sembrado	6,600	6,600
Estructuras de entrada y descarga	16,600	16,600



Tabla 2.7 Continuación.

Elemento	Costo, USD	
	Recubrimiento de suelo natural	Recubrimiento de membrana plástica
Subtotal	229,500	295,500
Costos de ingeniería, legales, etc.,	133,000	171,200
Costo total de inversión	362,500	466,700
Costos de operación y mantenimiento (\$/año)	6,000	6,000

Fuente: Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales, 2000

2.4.1.2 Consideraciones ambientales

Los sistemas de humedales proporcionan una adición valiosa al espacio verde de la comunidad, e incluye la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidades para recreación pública. Los sistemas de humedales FLS no producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.

En este tipo de humedales como el agua está expuesta y es accesible a personas y animales, recibir agua residual parcialmente tratada puede representar un problema en caso de existir viviendas individuales, parques, áreas de juego, o instalaciones públicas similares cercanas al humedal, por lo que se recomienda su instalación alejada de estas.

La generación de olores representa un inconveniente de este tipo de tratamiento, además, de la generación de vectores, que deben de ser controlados para evitar la proliferación de enfermedades.



2.4.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial (FS)

Un humedal artificial de flujo subsuperficial (FS) está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. Un ejemplo de un humedal FS se muestra en la figura 2.8. La grava es el medio más utilizado en Estados Unidos y Europa, aunque también se ha utilizado roca triturada y arena. El medio se planta normalmente con los mismos tipos de vegetación emergentes presentes en las praderas inundadas y, por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio.

Las reacciones biológicas se deben a la actividad de los microorganismos adheridos a las superficies disponibles de sustrato sumergido. En humedales FS el sustrato sumergido disponible incluye las raíces de las plantas que crecen en el medio, y la superficie misma del medio. Dado que el área de sustrato en un humedal FS puede sobrepasar por mucho el sustrato disponible en humedales FLS, las tasas de reacción microbiana pueden ser mayores que las de humedales FLS para muchos contaminantes. Como resultado, un humedal FS puede tener una menor superficie que un humedal FLS para los mismos caudales y objetivos de calidad del agua.

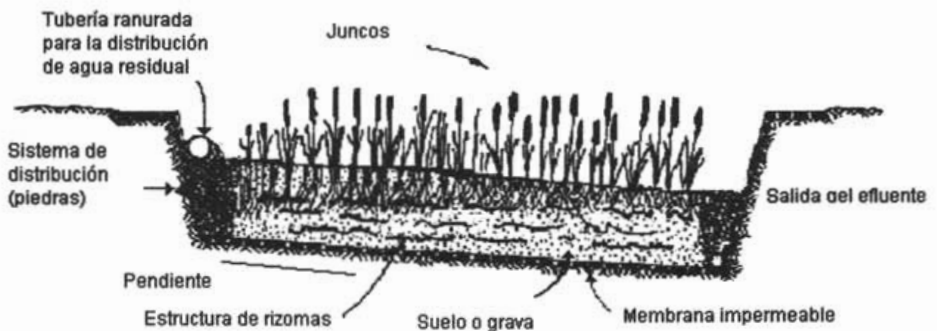
Las metas de diseño de los humedales FS artificiales son exclusivamente las funciones de tratamiento porque las posibilidades de proporcionar hábitat de vida silvestre y recreación pública son más limitadas que en el caso de los humedales FLS.

Los humedales FS normalmente incluyen una o más cuencas o canales de poca profundidad de fondo recubierto para prevenir la percolación a la capa freática susceptible a la contaminación. El tipo de recubrimiento depende de las condiciones locales. En algunos casos la compactación del suelo local es



adecuada, mientras que en otros se debe traer arcilla o utilizar recubrimiento de membranas plásticas.

Fig. 2.8 Esquema de un humedal de flujo subsuperficial



Diseño. Una estimación preliminar de los requerimientos de terreno para humedales FS puede obtenerse de los valores en la tabla 2.7 para las tasas típicas de carga superficial. El tamaño de los humedales FS es determinado por el contaminante que requiere la mayor área para su remoción. Esta es la superficie del fondo de las celdas del humedal, y para que sea efectiva en un 100 por ciento, la distribución del flujo de agua residual debe ser uniforme en toda la superficie. Esto es posible con humedales artificiales mediante un gradiente de fondo cuidadosamente seleccionado y el uso de estructuras apropiadas de entrada y descarga.

El área total de tratamiento debe ser dividida entre al menos dos celdas en todos los sistemas con excepción de los más pequeños. Los sistemas de mayor tamaño deben tener al menos dos trenes de tratamiento paralelos con celdas para proporcionar flexibilidad de manejo y mantenimiento.



Tabla 2.8 Tasas típicas de carga superficial para humedales FS

Constituyente	Concentración típica del afluente (mg/L)	Meta de tratamiento del efluente (mg/L)	Tasa de carga contaminante (libras/acres-día)
Carga hidráulica (pulg/día)	3 a 12		
DBO	30 a 175	10 a 30	60 a 140
SST	30 a 150	10 a 30	40 a 150
Nitrógeno como NH ₃ /NH ₄	2 a 35	1 a 10	1 a 10
Nitrógeno como NO ₃	2 a 10	1 a 10	3 a 12
Nitrógeno total	2 a 40	1 a 10	3 a 11
Fósforo total	1 a 10	0.5 a 3	1 a 4

Fuente: Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales, 2000

Los sistemas de humedales son ecosistemas vivos en los cuales los ciclos de vida y muerte de la biota produce residuos que pueden ser medidos en función de DBO, SST, nitrógeno, fósforo y coliformes fecales. Como resultado, y en forma independiente del tamaño del humedal o las características del afluente, en estos sistemas siempre existen concentraciones naturales de esos materiales. La tabla 2.8 resume esas concentraciones naturales.

Es necesario determinar la temperatura del agua en el humedal porque la remoción de DBO y de varias formas de nitrógeno, dependen de la temperatura. La temperatura del agua en sistemas con un tiempo hidráulico de retención (THR) extenso (mayor a 10 días) se acerca a la temperatura promedio del aire excepto en periodos de invierno con temperaturas bajo cero.

Las estructuras de entrada y descarga se emplean para asegurar la distribución adecuada y la recolección uniforme del agua residual aplicada. El método más comúnmente utilizado en los sistemas de menor tamaño consiste de una tubería



múltiple perforada. La profundidad del medio en estos humedales FS tiene un rango de 0.3 a 0.9 metros, siendo el valor más común el de 0.6 metros.

Tabla 2.9 Concentraciones naturales en humedales FS

Constituyente	Unidades	Rango de concentración
DBO ₅	mg/L	1 a 10
SST	mg/L	1 a 6
Nitrógeno total	mg/L	1 a 3
Nitrógeno como NH ₃ /NH ₄	mg/L	menos de 0.1
Nitrógeno como NO ₃	mg/L	menos de 0.1
Fósforo total	mg/L	menos de 0.2
Coliformes fecales	NMP/100 mL	50 a 500

Fuente: Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales, 2000

La vegetación emergente más comúnmente utilizada en humedales FS incluye las espadañas y aneas (*Typha* spp.), los juncos (*Scirpus* spp.) y los carrizos (*Phragmites* spp.). En Europa los *Phragmites* son las plantas preferidas para esta aplicación. Esta planta tiene varias ventajas debido a que se trata de una planta durable de rápido crecimiento que no es una fuente alimenticia para aves o la vida silvestre. Sin embargo, en algunas partes de los Estados Unidos el uso de *Phragmites* no está permitido porque esta es una planta de crecimiento agresivo, por lo cual se tiene la preocupación de que infeste humedales naturales. En estos casos la espadaña y los juncos pueden ser utilizados.

Muchos de los sistemas individuales de menor tamaño usan plantas decorativas tolerantes a la humedad. La vegetación en un humedal FS no es un factor significativo en la remoción de nutrientes y no se requiere su poda. En climas fríos, la acumulación de detritos vegetales sobre el lecho de grava proporciona un aislamiento térmico que es útil durante los meses de invierno. Las raíces de las



plantas sumergidas proporcionan sustrato para los procesos microbiológicos y dado que la mayoría de las macrófitas emergentes pueden transmitir oxígeno de las hojas a las raíces, se presentan microzonas aeróbicas en la superficie de las raíces y los rizomas. El resto del medio sumergido de los humedales FS tiende a carecer de oxígeno. Esta falta general de oxígeno limita la remoción biológica del amoníaco ($\text{NH}_3/\text{NH}_4 - \text{N}$) por nitrificación en los humedales FS, pero aún así el sistema es efectivo en la remoción de DBO, SST, metales y algunos contaminantes orgánicos prioritarios, dado que su tratamiento puede ocurrir bajo condiciones aeróbicas y anóxicas. La remoción de nitratos por desnitrificación biológica también puede ser muy efectiva dado que las condiciones anóxicas requeridas están siempre presentes y se cuenta

Operación y mantenimiento. La operación y mantenimiento (O/M) rutinarios de los humedales FS son: el control hidráulico y de la profundidad del agua, la limpieza de las estructuras de entrada y descarga, el corte de la hierba en bermas, la inspección de la integridad de las mismas, el manejo de la vegetación del humedal y el monitoreo rutinario. La profundidad del agua en el humedal puede requerir ajuste periódico según sea la estación o en respuesta al aumento a largo plazo de la resistencia por la acumulación de detritos en los poros del medio.

El control de mosquitos puede no ser requerido en sistemas de humedales FS en la medida que la superficie del agua se mantenga debajo de la superficie superior del medio. El manejo de la vegetación en estos humedales FS no incluye la poda rutinaria y disposición del material podado. La remoción de contaminantes por parte de la vegetación es un mecanismo relativamente insignificante, de manera que el corte y la remoción rutinaria de la vegetación no proporciona un beneficio significativo en cuanto al tratamiento. La remoción de detritos acumulados no es necesaria, y en climas muy fríos sirve de aislamiento térmico para prevenir la congelación del lecho del humedal. El mantenimiento de la vegetación también puede incluir el manejo de la vida silvestre dependiendo del tipo de vegetación



2.4.2.1 Costos de instalación y operación

Los principales elementos que se incluyen en los costos de inversión de los humedales son el costo del terreno, la evaluación del sitio, la limpieza del sitio, la movilización de suelos, el recubrimiento, el medio de grava, las plantas, las estructuras de entrada y descarga, las cercas, tuberías misceláneas, la ingeniería, los costos legales, las contingencias, y los gastos fijos y ganancia del contratista. El medio de grava y el recubrimiento pueden ser los elementos más costosos de esta lista. La tabla 2.10 presenta los costos para construcción de un humedal FS hipotético de 378 m³/d para lograr una concentración de 2 mg/L de amoníaco en el efluente (EPA, 2000).

De este tipo de tecnología no se tiene referencias de compañías o empresas que se dediquen a diseñarlos y construirlos comercialmente en México, sin embargo, en proyectos hechos por la propia UNAM se reporta un costo promedio de instalación de un humedal para una familia de 6 personas es de \$2,320.00 (Muñoz, 2003), con un costo anual de mantenimiento de \$232.00. pudiendo ser construido por el propio usuario en comunidades que no cuenten con servicio de drenaje y alcantarillado.

Tabla 2.10 Costos de inversión y de operación y mantenimiento para un humedal de flujo subsuperficial

Elemento	Costo USD \$*	
	Recubrimiento de suelo natural	Recubrimiento de membrana plástica
Costo del terreno	16,000	16,000
Evaluación del sitio	3,600	3,600
Limpieza del sitio	6,600	6,600
Movimiento de tierra	33,000	33,000



Tabla 2.10 Continuación

Elemento	Costo USD \$*	
	Recubrimiento de suelo natural	Recubrimiento de membrana plástica
Recubrimiento	0	66,000
Medio de grava	142,100	142,100
Plantas	5,000	5,000
Sembrado	6,600	6,600
Estructuras de entrada y descarga	16,600	16,600
Subtotal	229,500	295,500
Costos de ingeniería, legales, etc.	133,000	171,200
Costo total de inversión	362,500	466,700
Costos de O/M, \$/año	6,000	6,000

Fuente: Folleto Informativo de Tecnología de Aguas Residuales, 2000

2.4.2 Consideraciones ambientales

Los humedales FS proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados. Los sistemas de humedales FS no producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición. A diferencia de los humedales de FLS los mosquitos y otros insectos vectores similares no son un problema con los humedales FS mientras el sistema se opere adecuadamente y el nivel subsuperficial de flujo se mantenga. De igual forma, se elimina el riesgo de que niños y mascotas estén expuestos al agua residual parcialmente tratada.



2.5 Baños secos

Aunque los baños secos no son sistemas de tratamiento de aguas residuales, se incluyen en este trabajo, al igual que los sistemas de captación de agua de lluvia, porque ambos permiten disminuir el consumo de agua potable.

Un sistema de inodoro de compostaje (o biológico) contiene y procesa excrementos, papel higiénico y materiales que contienen carbono (como desechos de comida), pero a diferencia de las fosas sépticas, requiere condiciones no saturadas de humedad para que las bacterias aeróbicas descompongan los residuos. El proceso es similar al compostaje de residuos de jardín.

El objetivo principal de un sistema de inodoro de compostaje es el contener, inmovilizar y destruir organismos patógenos y así reducir el riesgo de infección. Los baños secos pueden ser de dos tipos: de compostaje continuo y de compostaje intermitente. Los sistemas continuos son de una sola cámara que recibe el excremento por la parte superior y permite la remoción del producto final desde el fondo. Los sistemas intermitentes son en realidad dos o más unidades de compostaje que se llenan y se dejan madurar sin la adición continua de nuevo excremento.

Comercialmente se pueden encontrar diferentes modelos, pero todos funcionan bajo el mismo principio, separar los desechos sólidos de los líquidos, para su tratamiento *in situ* y posterior aprovechamiento.

Funcionamiento. La orina es separada del excremento y conducida ya sea a un sistema de almacenamiento o a un jardín para su aprovechamiento como abono. El excremento se deposita en una cámara de acondicionamiento con tierra, arena o incluso cal, para permitir la degradación de la materia fecal en materia orgánica aprovechable (composta). La figura 2.9 muestra el diseño de la taza separadora y la figura 2.10 el esquema de la cámara de descomposición del sanitario seco.



Vaciado y disposición de residuos. La forma en que se procesan los residuos es: después de 10 meses (tiempo aproximado para llenar una cámara una familia de 6 personas), se vierte su contenido en una fosa, para dejar que pasen otros 6 meses, tiempo en el cual se habrán degradado completamente los desechos (comercialmente existen bacterias que favorecen la degradación de los desechos).

El modelo que se puede encontrar comercialmente en México, es el llamado de *doble cámara*, formado por dos cámaras diseñadas para su uso alternado, mientras una está en operación la otra está en proceso de degradación y desecación.

2.5.1 Costos de instalación y operación

Las compañías que en México se encargan del diseño, construcción y mantenimiento de baños secos son: Sanitarios Ecológicos Secos, IEPSA (Diseño, instalación y mantenimiento de sanitarios secos) y Grupo de Tecnología Alternativa S.C. Los costos de esta tecnología dependerán del diseño que se elija, existen desde los económicos con un precio entre \$3,642 y \$4,600, incluyendo la instalación y mantenimiento, hasta los de diseño más elaborado cuyo precio oscila entre \$7,250 y \$8,900 (Muñoz, 2003).

Además, se pueden comprar, vía internet, manuales para la autoconstrucción de estos sistemas. El costo del manual es de aproximadamente 50 USD (<http://www.compostingtoilet.org/products.cfm>).



2.5.2 Consideraciones ambientales

Ambientalmente, esta tecnología tiene dos ventajas: la principal es la reducción en el consumo de agua potable para descarga del sanitario, cerca del 40% del agua potable para fines domésticos se utiliza para este fin; la otra es el aprovechamiento del excremento y la orina como abono. La composta obtenida no es recomendable para la horticultura, ya que en caso de presentarse lombrices parásitas, estas son capaces de sobrevivir el tiempo del composteo; sin embargo, sí se considera adecuada para árboles frutales.

Cabe mencionara que esta tecnología es nueva en México y solamente se tienen datos de dos compañías que se dedican a su diseño, construcción e instalación. Esta tecnología es recomendable para las zonas donde no exista drenaje o alcantarillado, sustituyendo a las fosas sépticas y letrinas.

Fig. 2.9 Diseño de la taza separadora del sanitario seco

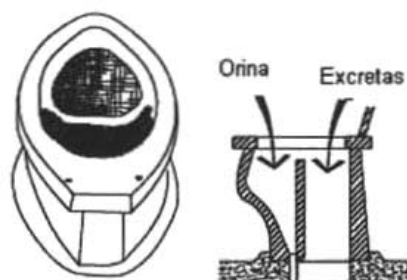
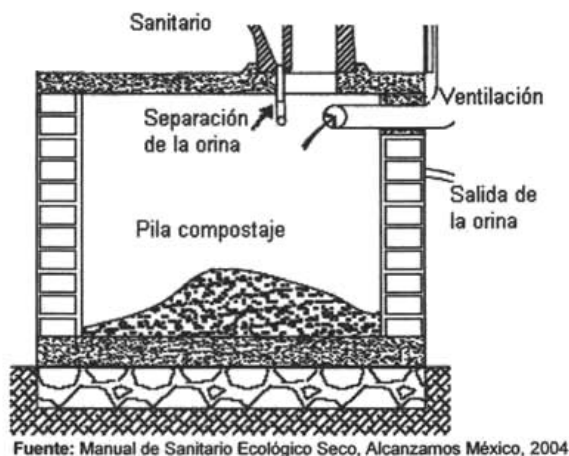




Fig. 2.10 Esquema de la cámara de descomposición de un baño seco



2.6 Sistemas de recolección de agua pluvial

El aprovechamiento de agua de lluvia puede representar, una fuente de abastecimiento importante para los habitantes, disminuyendo notablemente sus requerimientos hídricos.

Esta alternativa requiere de la construcción de sistemas de captación, almacenamiento y distribución, cuyas características estarán en función del sitio de instalación. En general, se pueden utilizar las azoteas como medio de captación, tuberías de PVC o canaletas metálicas como sistema de conducción y tinacos de polietileno de alta densidad como sistema de almacenamiento.

El almacenamiento del agua de lluvia depende de la disponibilidad de espacio y de las características del sistema de almacenamiento de agua potable disponible. Para tener una mejor calidad en el agua de lluvia recolectada se recomienda la instalación de un filtro de arena (figura 2.11).



Figura 2.11 Filtro de arena para el tratamiento de agua de lluvia



2.6.1 Costos de instalación y operación Dependiendo del lugar donde se instale el sistema de aprovechamiento del agua pluvial serán las necesidades de construcción, un ejemplo del costo de este tipo de sistemas se muestra en la tabla 2.11

Tabla 2.11 Costo de un sistema de aprovechamiento de agua pluvial

Concepto	Unidad	Cantidad	P.U.	Total
Suministro y colocación de canaleta de lámina galvanizada de 6m de longitud.	ML	6.00	67.62	405.72
Suministro y colocación de bajada pluvial, a base de tubería de PVC de 3" de diámetro.	ML	2.00	281.11	562.22
Suministro de tinaco de polietileno de alta densidad, con capacidad para 1,100 litros.	PZA	1.00	1,800.25	1,800.25
			TOTAL	2,768.19

Fuente: PMIC-Facultad de Ingeniería Nov-2002



2.6.2 Consideraciones ambientales

La instalación de este tipo de sistemas caseros en la ciudad, implicaría una disminución en el consumo de agua potable para usos domésticos, como el aseo del inmueble, y en consecuencia disminuiría la sobreexplotación de los cuerpos de agua.

La construcción de sistemas de captación de agua pluvial por parte del Gobierno del Distrito Federal, junto con las obras de tratamiento e inyección a los mantos freáticos respectivas, conducirá a la recarga del manto freático, actualmente sobreexplotado, de la Ciudad de México

2.7 Marco legal

Referentes a los límites máximos permisibles de contaminantes en los puntos de descarga de aguas residuales, deben mencionarse las siguientes tres normas oficiales mexicanas

NOM-001-SEMARNAT-96. Límites permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales.

NOM-002-SEMARNAT-96. Límites permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales en los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano o municipal.

NOM-003-SEMARNAT-97. Límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público.

NOM-004-SEMARNAT-2002. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final



En cuanto al marco legal referente a la participación de la Iniciativa Privada en el tratamiento de las aguas residuales, la Ley de Aguas Nacionales establece que la explotación, uso o aprovechamiento del agua por particulares se realice mediante concesiones otorgadas por el Ejecutivo Federal.



Capítulo III

Situación actual en la ciudad de México

Con el fin de establecer un criterio de selección a las alternativas existentes para el manejo de las aguas residuales, se debe conocer primero las características presentes en el sistema, los rasgos considerados como mas relevantes para la elaboración del presente trabajo son las características geográficas, económicas y sociales, además del sistema actual de manejo de aguas residuales.

3.1 Descripción del sistema

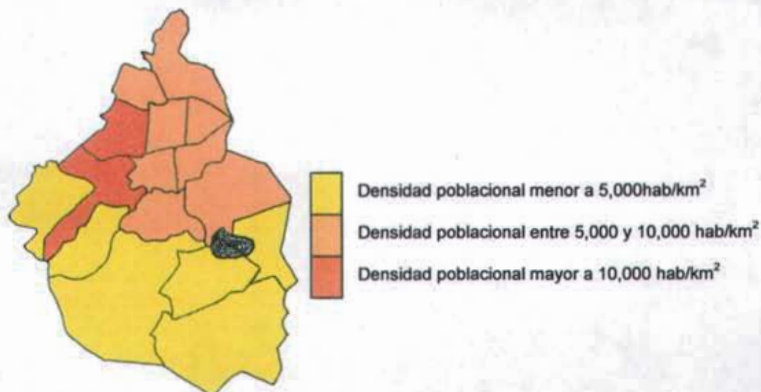
Dada la complejidad y extensión del D.F., primero se dividirá a este en zonas que presenten características similares respecto a: densidad poblacional, desarrollo industrial y áreas verdes (ya sean bosques, cultivos o zonas de recarga). También se subdividirá la zona de acuerdo con el nivel de cobertura del servicio drenaje, las características económicas y nivel educativo. Cada subdivisión podrá abarcar una o más delegaciones e incluso una delegación podrá tener características diferentes y ser subdividida.

Densidad poblacional. Este parámetro influye en la selección del proceso para el tratamiento del agua residual determinando el volumen a tratar y la disponibilidad de espacio para la instalación. Por ejemplo, los sistemas de lodos en suspensión son capaces de tratar grandes volúmenes de agua residual, pero requieren mayor espacio en comparación con los sistemas de lecho fijo.

El Distrito Federal se subdividió en tres rangos de acuerdo con la densidad poblacional, menos de 5,000 habitantes/km², entre 5,000 y 10,000 habitantes/km², y más de 10,000 habitantes/km² (figura 3.1).



Fig. 3.1 Distribución de la densidad poblacional del D.F.



Industrialización. Dado que la mayoría de los sistemas biológicos son muy sensibles a contaminantes de origen industrial, es necesario conocer la distribución de las zonas industriales.

Como se explica posteriormente en la sección 3.3, tabla 3.4, del presente capítulo, en la ciudad de México se presentan tres zonas altamente industrializadas siendo las delegaciones con más industrias: Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Iztacalco, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Miguel Hidalgo y Venustiano Carranza). En la figura 3.2 solamente se hace distinción entre las delegaciones consideradas con influencia industrial.

Áreas verdes y zonas de recarga. La identificación de este tipo de áreas se realiza pensando en el reuso y disposición final que se le pueda dar al agua residual tratada. Las zonas de recarga del acuífero de la ciudad son las zonas donde aun existen bosques (en la figura 3.3 se muestra la distribución de la vegetación del Distrito Federal).



Figura 3.2 Zonas con influencia industrial



Drenaje. Antes de pensar en la instalación de una planta de tratamiento de aguas residuales, es necesario saber si el área cuenta con servicio de drenaje. Como ya se mencionó, en la ciudad de México la cobertura de este servicio no es total (figura 3.4).

Ingreso per capita. Este parámetro es importante pensando en la posible participación de la iniciativa privada, así como de los propios usuarios. Los humedales pueden ser instalados tanto en zonas de escasos recursos con disposición de espacio, como en zonas de ingresos altos en donde su principal aportación es de tipo estético y ecológico (ver figura 3.5).

Nivel educativo. Para garantizar la eficiencia de cualquier sistema de tratamiento, es indispensable que los operadores tengan la capacitación necesaria sobre el proceso. En zonas donde el nivel educativo es bajo no es recomendable la instalación de sistemas de tratamiento complejos.

En el Distrito Federal, el índice promedio de analfabetismo es bajo; sin embargo dado el tamaño de la población, es posible encontrar asentamientos urbanos,



principalmente los no regularizados, en donde existen índices muy altos, que no estén correctamente reflejados en los datos estadísticos a nivel delegacional; por lo tanto el nivel educativo no se tomarán en cuenta para la caracterización de la Ciudad.

Fig. 3.3 Vegetación del D.F.

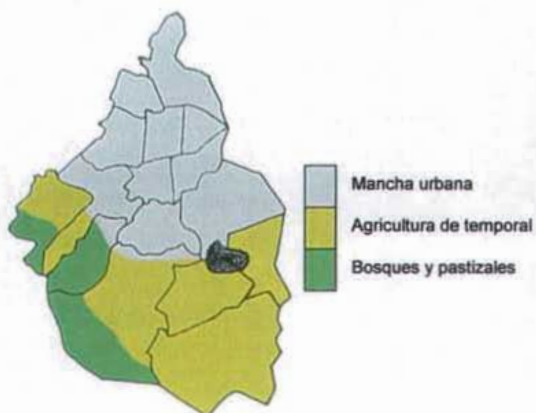


Fig. 3.4 Cobertura del servicio de drenaje del D.F.

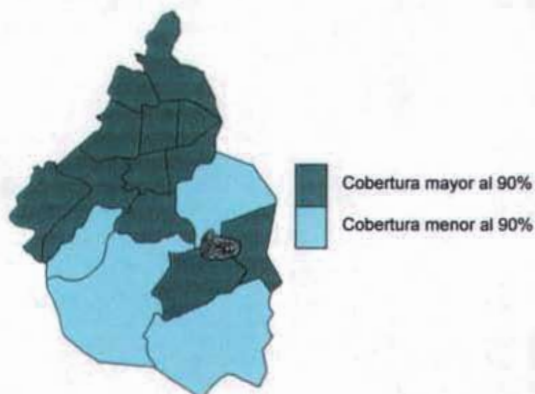
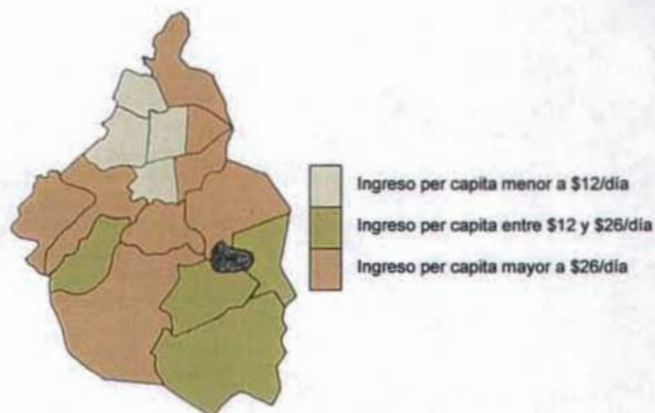




Fig. 3.5 Distribución del ingreso per capita en el D.F.



Al combinar cada uno de los mapas anteriores se obtiene la figura 3.6 en donde:

Zona I: Densamente poblada, sin áreas verdes, sin influencia industrial, nivel de cobertura en el drenaje mayor al 90% e ingreso per capita entre \$12 y \$26 por día. Delegación Coyoacán.

Zona II: Densamente poblada, sin áreas verdes, sin influencia industrial, nivel de cobertura en el drenaje mayor al 90% e ingreso per capita mayor a \$26 por día. Delegación Benito Juárez.

Zona III: Densamente poblada, sin áreas verdes, con influencia industrial, nivel de cobertura en el drenaje mayor al 90% e ingreso per capita entre \$12 y \$26 por día. Delegaciones Gustavo A. Madero, Iztacalco y Venustiano Carranza.

Zona IV: Densamente poblada, sin áreas verdes, con influencia industrial, nivel de cobertura en el drenaje mayor al 90% e ingreso per capita mayor a \$26 por día. Delegaciones Atzacotalco y Cuauhtémoc.



Zona V: Densamente poblada, sin áreas verdes, con influencia industrial, nivel de cobertura en el drenaje menor al 90% e ingreso per capita entre \$12 y \$26 por día. Delegación Iztapalapa.

Zona VI: Densidad de población entre 5,000 y 10,000 hab/km², con influencia industrial, con áreas verdes, nivel de cobertura en el drenaje mayor al 90% e ingreso per capita entre \$12 y \$26 por día. Delegación Álvaro Obregón.

Zona VII: Densidad de población entre 5,000 y 10,000 hab/km², con influencia industrial, sin áreas verdes, nivel de cobertura en el drenaje mayor al 90% e ingreso per capita mayor a \$26 por día. Delegación Miguel Hidalgo.

Zona VIII: Densidad de población menor a 5,000 hab/km², sin influencia industrial, con áreas verdes, nivel de cobertura en el drenaje mayor al 90% e ingreso per capita menor a \$12. Delegaciones Tláhuac y Xochimilco.

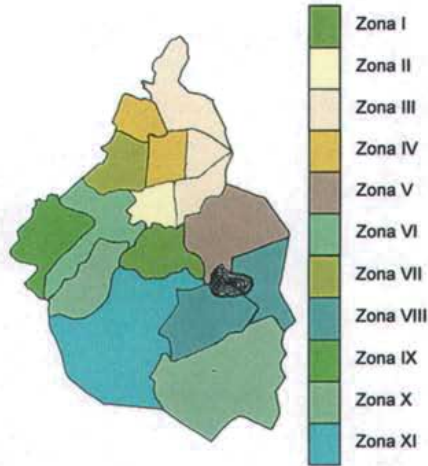
Zona IX: Densidad de población menor a 5,000 hab/km², sin influencia industrial, con áreas verdes, nivel de cobertura en el drenaje mayor al 90% e ingreso per capita entre \$12 y \$26 por día. Delegación Cuajimalpa.

Zona X: Densidad de población menor a 5,000 hab/km², sin influencia industrial, con áreas verdes, nivel de cobertura en el drenaje menor al 90% e ingreso per capita menor a \$12 por día. Delegaciones Magdalena Contreras y Milpa Alta.

Zona XI: Densidad de población menor a 5,000 hab/km², sin influencia industrial, con áreas verdes, nivel de cobertura en el drenaje menor al 90% e ingreso per capita entre \$12 y \$26 por día. Delegación Tlalpan.



Fig. 3.6 Características del D.F.



3.2 Consumo de agua potable

Para emitir una opinión sobre el sistema de manejo de aguas residuales del Distrito Federal, es necesario analizar no solo las características de las aguas residuales y sistemas de tratamiento y disposición, sino que se debe iniciar con las fuentes de abastecimiento y el sistema de suministro de agua a las zonas habitacionales e industriales.

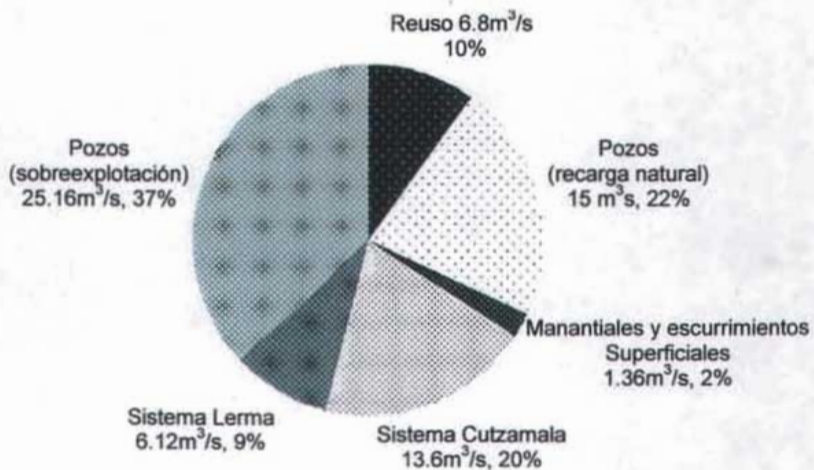
Los datos de suministro y colección de agua residual que se presentan en este capítulo corresponden, en ocasiones a la ZMCM, ya que por las características de las construcciones existentes, no es posible desintegrar los datos del Distrito Federal del resto de los municipios del Estado de México de la zona conurbada.

En la ZMCM se aprovechan alrededor de $68 \text{ m}^3/\text{s}$ de agua potable, de los cuales 35 m^3 corresponden al Distrito Federal y el resto al Estado de México. Para satisfacer la demanda se extrae agua de pozo (proceso que está agotando el



manto acuífero y ha producido el hundimiento de la ciudad), de manantiales, del sistema Lerma y Cutzamala, y también se emplea agua de reuso (la distribución de estas fuentes de explotación se muestra en la figura 3.7).

Fig. 3.7 Distribución de las fuentes de suministro de agua en la ZMCM



Fuente: CNA, 2002

En un sistema tarifario ideal, la cuota que se cobra al usuario, debe cubrir los gastos por el servicio del agua potable y el saneamiento de la misma. En nuestro país, la CNA establece que dicha tarifa sería en promedio de \$6.0 por m³, con algunas variaciones dependiendo de la zona hidráulica. Sin embargo, en el Distrito Federal la mayor parte del servicio de agua potable está subsidiado, teniendo tradicionalmente un sistema de cobro por tarifa fija (la tabla 3.1 presenta las tarifas vigentes en el D.F.).



Tabla 3.1 Tarifas para el agua potable en el Distrito Federal

Servicio doméstico		
Rango de consumo (m³)	Costo (\$/m³)	Cuota adicional (\$/m³)
Mínimo (0-10)	1.273	0.0
Máximo (1501-)	27.39	37.71

Servicio industrial y comercial		
Rango de consumo (m³)	Costo (\$/m³)	Cuota adicional (\$/m³)
Mínimo (0-10)	7.64	0.0
Máximo (1501-)	29.57	37.71

Fuente: Código Financiero del Distrito Federal

3.3 Composición de las aguas residuales

Las características del agua residual que llega a las plantas de tratamiento dependen del origen de las mismas, el uso recibido (doméstico o industrial), así como del sistema de alcantarillado que la conduce (combinado o pluvial). La tabla 3.2 presenta la distribución que tiene el consumo de agua potable para fines domésticos en el Distrito Federal.

Tabla 3.2 Distribución de usos de agua potable

Servicio	% consumo
Descarga a sanitario	40
Regadera	30
Lavado de ropa	15
Lavado de utensilios	6
Consumo humano	5

Fuente: INEGI, 1999



El agua residual proveniente de zonas habitacionales, tendrá como principal característica un alto contenido de materia orgánica (medida como DBO), y detergentes. Y no se espera que presente concentraciones importantes de metales pesados o compuestos orgánicos volátiles, como en el caso de las descargas industriales. La composición del agua residual en sectores industrializados de la ZMCM, de acuerdo a los análisis realizados en el proyecto *Diagnóstico de la Calidad del Agua Residual por Sectores*, se muestra en la tabla 3.3

Tabla 3.3 Composición del agua residual en la ZMCM

Parámetro	Unidad	Colectores antes de incorporarse a zonas industriales	Colectores con influencia industrial	Colectores sin influencia industrial
pH		7.36	7.59	7.60
Color	Pt-Co	145.00	193.01	270.59
Turbidez	UTN	161.33	232.49	217.07
Alcalinidad total	ppm CaCO ₃	229.73	365.39	561.25
Dureza total,	ppm CaCO ₃	169.92	224.42	312.11
Cloruros	mg/L	40.02	108.73	145.95
Sólidos totales	mg/L	923.67	1,971.30	264.44
Sólidos totales volátiles	mg/L	521.33	438.03	216.29
Sólidos suspendidos totales	mg/L	264.61	411.58	319.47
Sólidos sedimentables	mg/L	0.87	1.76	1.65
Nitrógeno amoniacal	mg/L	18.89	48.01	42.10
Nitrógeno total	mg/L	43.96	52.95	36.39
Nitratos	mg/L	0.40	0.26	0.51
Fósforo total	mg/L	7.04	13.02	14.45



Tabla 3.3 Continuación

Parámetro	Unidad	Colectores antes de incorporarse a zonas industriales	Colectores con influencia industrial	Colectores sin influencia industrial
Fosfatos totales	mg/L	21.59	39.93	44.36
Nitrógeno orgánico	mg/L	16.34	10.95	
Nitrógeno de nitritos	mg/L	0.07	0.10	0.07
Calcio total	mg/L	41.467	53.389	61.431
Magnesio total	mg/L	16.100	23.330	112.864
Sodio total	mg/L	81.267	145.986	214.653
Potasio total	mg/L	21.558	35.882	62.636
Plomo soluble	mg/L	0.063	1.494	0.065
Cadmio soluble	mg/L	0.009	0.019	0.008
Mercurio soluble	mg/L	0.001	0.001	0.001
Arsénico soluble	mg/L	0.002	0.003	0.004
Cromo soluble	mg/L	0.111	0.061	0.096
Cinc soluble	mg/L		0.016	0.007
Cobre soluble	mg/L		0.026	0.540
Silicio soluble	mg/L	24.251		29.000
Hierro total	mg/L	2.507	10.110	2.435
Manganeso total	mg/L	0.097	1.903	0.131
Plomo total	mg/L	0.104	0.182	0.082
Cadmio total	mg/L	0.009	0.018	0.009
Mercurio total	mg/L	0.001	0.001	0.001
Arsénico total	mg/L	0.004	0.006	0.016



Tabla 3.3 Continuación

Parámetro	Unidad	Colectores antes de incorporarse a zonas industriales	Colectores con influencia industrial	Colectores sin influencia industrial
Cromo total	mg/L	0.412	0.096	0.058
Cinc total	mg/L		0.309	0.076
Cobre total	mg/L		0.262	2.652
Silicio total	mg/L	26.10		27.50
Coliformes fecales	NMP/100 mL	4.90E+07	8.70E+07	2.67E+07
Coliformes totales	NMP/100 mL	1.26E+08	1.09E+08	1.13E+08
DBO total	mg/L	351.47	317.58	330.83
DBO soluble	mg/L	232.33	146.72	69.50
DQO total	mg/L	660.03	722.85	932.93
DQO soluble	mg/L	374.61	271.34	121.97
Grasas y aceites	mg/L	80.50 5	59.58	30.7
Temperatura	°C			21.00

Fuente: Diagnóstico de la calidad el agua residual por sectores, Secretaría del Medio Ambiente del D.F. 1999

Fuentes de agua residual industrial. En el Distrito Federal se identifican tres importantes áreas industriales: Vallejo, en la delegación Azcapotzalco; Iztapalapa, en la delegación Iztapalapa; y la llamada Zona Sur, que abarca las delegaciones de Tlalpan, Coyoacán, Álvaro Obregón y Xochimilco. Dentro de estas áreas se localizan industrias de los más diversos giros, y desafortunadamente algunas de ellas descargan directamente al sistema de alcantarillado (el anexo 1 presenta un listado de los giros industriales presentes en el Distrito Federal).

En 1999, la Secretaría del Medio Ambiente presentó, dentro del *Diagnóstico de la calidad el agua residual por sectores*, un análisis de la influencia de descargas



industriales en las características de las aguas residual que se transportan por los diferentes colectores de la ciudad de México (González, 2000). En la tabla 3.4 se muestran los colectores urbanos que reciben descargas industriales y las delegaciones afectadas. Los giros industriales cuyas descargas han sido identificadas son, de acuerdo con la clasificación del código mexicano de actividades productivas, CMAP: alimentos y bebidas (31); textiles y artículos de piel (32); maderera (33); celulosa, papel e imprentas (34); química, petroquímica y farmacéutica (35); productos a partir de no metales (36); industria básica de metales ferrosos y no ferrosos (37); automotriz, ensamble de maquinarias y equipo electrónico (38) y otras industrias manufactureras (39).

Tabla 3.4 Descargas industriales a los colectores urbanos

Colectores con mayor influencia industrial que pasan por la delegación	Delegación	Industrias que descargan según rama industrial									
		31	32	33	34	35	36	37	38	39	Total
Prolongación San Antonio	Álvaro Obregón	7	3	9	0	7	2	2	13	1	44
Poniente 152, Poniente 146, Poniente 140 y Poniente 134, Poniente 116, Poniente 122, 15	Azcapotzalco	17	9	8	9	56	5	13	50	11	178
Río Consulado	Cuauhtémoc	8	2	5	4	12	3	3	15	4	56
13, 11B.	Gustavo A. Madero	3	3	9	1	7	2	1	21	2	49



Tabla 3.4 Continuación

Colectores con mayor influencia industrial que pasan por la delegación	Delegación	Industrias que descargan según rama industrial									
		31	32	33	34	35	36	37	38	39	Total
Plutarco Elías Calles, 8 sur, lateral Río Churubusco y Oriente 237, Av. de la unión	Iztacalco	17	9	8	9	56	5	13	50	11	149
Iztapalapa 1, Canela y Goma	Iztapalapa	25	7	14	30	58	7	31	72	8	252
Año de Juárez, Campesinos y Av. 5	Magdalena Contreras										
Río San Joaquín , Manuel González, Reforma, 15	Miguel Hidalgo	12	1	4	6	23	3	5	26	16	96
Norte 17, Av. de la industria, Puerto central aéreo, Oceanía	Venustiano Carranza	11	3	1	3	33	0	12	48	4	115

Fuente: Diagnóstico de la calidad el agua residual por sectores, Secretaría del Medio Ambiente del D.F. 1999



3.4 Alcantarillado

El propósito del drenaje es desalojar las aguas residuales de una ciudad, para evitar problemas de salud y reducir encharcamientos e inundaciones en época de lluvia. La red de drenaje de la ciudad de México es de tipo combinado, es decir: conduce agua residual y pluvial, y está formada principalmente por conductos dirigidos de poniente a oriente. En las partes centro – poniente, centro y sur, se han construido interceptores profundos que escurren de sur a norte, a los cuales descargan los sistemas de colectores.

En la actualidad, el sistema de drenaje y control de avenidas presenta un alto grado de complejidad como resultado de la interacción de diversos factores como: la gran extensión de la ciudad; el hundimiento del subsuelo en las zonas centro, oriente y sur que afecta las estructuras superficiales; las características de la precipitación pluvial (altas intensidades en tiempos cortos); la lejanía de los sitios de descarga (fuera de la cuenca); y la gran cantidad de elementos del sistema (presas, lagunas de regulación, interceptores profundos, ríos entubados, cauces a cielo abierto, plantas de bombeo, sistemas de colectores y redes de atarjeas).

El Sistema General Metropolitano de Drenaje esta formado por la Red Secundaria, la Red Primaria, el Sistema de Drenaje Profundo y el Sistema General de Desagüe (DGOH, 2001).

Red secundaria. Se denomina red secundaria al sistema que recolecta las aguas residuales provenientes de las descargas domiciliarias y de las coladeras pluviales que existentes en las calles, para conducir las a la red primaria. Se conforma por conductos con diámetro máximo de 45 cm y actualmente tiene una longitud de 10,363 km.

Red primaria. Constituye la unión entre la red secundaria y el sistema general de desagüe. La red primaria está formada por tuberías con diámetros de 60 cm a 4 m, y tiene actualmente una longitud aproximada de 1,375 km, incluye plantas de



bombeo, tanques de tormenta y otras obras auxiliares como lagos y lagunas de regulación. Esta red esta formada por 106 sistemas de colectores dentro del Distrito Federal y 20 en los distintos municipios conurbados del Estado de México, los cuales se agrupan de acuerdo el drenaje principal que recibe sus descargas (ver tabla 3.5)

Tabla 3.5 Sistema de colectores en el Distrito Federal

Drenaje principal	Número de sistemas
Gran Canal del desagüe	30
Río de La Piedad	7
Río Churubusco	13
Río de Los Remedios	6
Interceptor Centro Poniente	5
Interceptor Central	3
Interceptor Obrero Mundial	1
Interceptor Iztapalapa	3
Interceptor Poniente	2
Interceptor Oriente	11
Colector Miramontes	22
Río San Buenaventura	3
Total	106

Fuente: Diagnóstico de la calidad el agua residual por sectores, Secretaría del Medio Ambiente del D.F. 1999

Sistema de drenaje profundo. Ante el crecimiento incontrolado de la mancha urbana, la capacidad de la infraestructura hidráulica superficial fue rebasada y la construcción del drenaje profundo resultó ser el medio más adecuado para el



desalojo oportuno de grandes volúmenes de agua pluvial, además de ser parte importante de la historia hidráulica de la Ciudad de México de finales del siglo XX.

El drenaje profundo no requiere de bombeo, porque funciona por gravedad y no es afectado por los hundimientos del subsuelo. Además, fue diseñado para aprovechar la infraestructura primaria existente, la cual, por otra parte, se ha ampliado y conservado para garantizar a la población seguridad contra inundaciones. Este sistema se integra por un conjunto de interceptores que captan el agua conducida por conductos superficiales y la descargan al emisor central que desaloja los escurrimientos fuera de la ciudad.

- **Interceptores.** Los interceptores conectados al drenaje profundo son 9: Centro-poniente, Central, Oriente, Oriente-sur, Oriente 2, Iztapalapa, Obrero Mundial, Canal Nacional de Chalco y Poniente (ver tabla 3.6).
- **Emisor Central.** Cumple con la función de conducir fuera de la cuenca de la ZMCM las aguas del Sistema de Drenaje Profundo, descargándolas en el río El Salto, que conduce las aguas hasta la presa Requena o al canal El Salto-Tiamaco, posteriormente pasan al río Tula y finalmente a la presa Endó, que satisface las demandas de riego de la zona. El río Tula es influente del Moctezuma y éste a su vez del Pánuco, que descarga en el Golfo de México. El emisor central tiene un diámetro promedio de 6.5 m, longitud total de 49.70 km y una capacidad máxima de conducción de 200 m³/s.



Tabla 3.6 Características de los interceptores de la ZMCM

Nombre	Longitud (km)	Diámetro promedio (m)	Área servida o delegaciones que abarcan
Centro-poniente	16.5	4	39.19 km ² , Miguel Hidalgo y Azcapotzalco
Central	16.5	5	69.71 km ² Gustavo A. Madero, Azcapotzalco, Cuauhtémoc y Benito Juárez
Oriente	14.3	5	13.22 km ² Gustavo A. Madero, Benito Juárez, Cuauhtémoc
Oriente-sur	10.12	5	20.3 km ² Iztapalapa, Iztacalco, Venustiano Carranza
Oriente 2	8.0	5	Tlalpan, Chalco
Iztapalapa	4.6	3.2	12.15 km ² Iztapalapa
Obrero mundial	0.7	3.2	Benito Juárez
Canal nacional-canal de Chalco	6.8	3.2	Tláhuac, Coyoacán, Iztapalapa, Xochimilco, Chalco
Poniente	16.5	4	Magdalena Contreras, Álvaro Obregón, Miguel Hidalgo, Naucalpan

Fuente: Diagnóstico de la calidad el agua residual por sectores, Secretaría del Medio Ambiente del D.F. 1999

Sistema general de desagüe. Para lograr el desalojo de las aguas residuales, se requiere de estructuras que permitan captar, conducir y controlar los caudales manejados por la Red secundaria, la Red primaria y el Drenaje profundo. El Sistema general de desagüe esta formado por cauces a cielo abierto y ríos entubados, además de presas, vasos y lagunas de regulación que captan las aguas pluviales y combinan con aguas residuales a fin de controlar avenidas (ver figura 3.8; DGCOH, 2001):

- **Cauces a cielo abierto.** Gran canal del desagüe, Río de los Remedios, Río Tlalnepantla, Río San Buenaventura, Río San Javier, Río Cuauhtepac, Canal Nacional y Canal de Chalco.
- **Ríos entubados.** Churubusco, La Piedad, Gran Canal y Consulado,



- **Vasos de regulación.** El Cristo, Fresnos y Carretas.
- **Lagunas de regulación.** Coatepec, Churubusco, Horaria, Iztapalapa (mayor y menor), Ciénega chica, Ciénega grande, El Salado, San Lorenzo Tezonco y La Quebrada

Finalmente, es conveniente mencionar que el agua residual de la ZMCM tiene cuatro salidas artificiales:

- Tajo de Nochistongo, recibe las aportaciones del interceptor poniente
- Primer y segundo túneles de Tequexquiac, reciben las aguas del gran canal del desagüe
- Emisor central: es parte del drenaje profundo.

En 1997 los organismos operadores del agua de la ciudad de México planearon la construcción de tres plantas de tratamiento de aguas residuales con una capacidad combinada de $74\text{m}^3/\text{s}$, con un costo estimado de \$580 millones de dólares, sin incluir el sistema de drenaje. Este proyecto iba a estar financiado por el gobierno de la Ciudad, con el respaldo de un préstamo de \$410 millones de dólares realizado por la Japan's Overseas Cooperation Fund, el Banco Interamericano de Desarrollo haría un préstamo de \$365 millones de dólares para la construcción del sistema de drenaje y el gobierno federal proporcionaría \$260 millones adicionales para completar los trabajos de la obra. Para administrar este proyecto, conocido como *Proyecto de Saneamiento del Valle de México*, se crearía una nueva autoridad regional para el manejo del agua, conformada por el Distrito Federal, 17 municipios conurbados del Estado de México y el Estado de Hidalgo (Plan de Desarrollo del Estado de México 1999-2005). A la fecha, no se ha empezado dicho proyecto.



En la actualidad el nivel de cobertura promedio en la Distrito Federal es del 94%. La cobertura por delegación, se proporciona en el anexo A; pudiendo observar que las delegaciones que tienen una cobertura menor son: Milpa Alta, Tlalpan, Iztapalapa y Magdalena Contreras. La población que no dispone de este servicio generalmente descarga sus desechos en fosas sépticas, grietas y barrancas, terrenos baldíos e incluso directamente en la calle.

Finalmente, es conveniente mencionar aquí que, los costos de construcción de drenaje deben ser cubiertos por las autoridades estatales y que estos costos son muy variados, dependiendo en gran medida del tipo de suelo donde se realiza la obra. Por otro lado, donde existe una red de drenaje las cuotas por derecho de conexión están en función del tipo de construcción que se trate (casa habitación, inmuebles no habitacionales y los metros cuadrados construidos). La tabla 3.7 presenta las cuotas autorizadas en el Distrito Federal.

En el caso de descargas de tipo no doméstico, el cobro se hace en función del diámetro de la tubería, estos precios incluyen los costos de los materiales utilizados y el trabajo que se realice para su conexión, desde la red hasta el punto de descarga domiciliaria.

Tabla 3.7 Cuotas por conexión a los sistemas de drenaje de la Ciudad de México

Uso de suelo	Tarifa	
	Hasta 50 m ²	Por cada m ² excedente
Casa habitación	\$3,746.40	\$74.40
Inmueble no habitacional	\$7,492.80	\$146.60

Fuente: DGCOH, 2003



3.5 Plantas de tratamiento de aguas residuales

La descarga de aguas residuales en el Distrito Federal es de $24\text{m}^3/\text{s}$, de los cuales $4.8\text{ m}^3/\text{s}$ provienen de la industria, $3.6\text{ m}^3/\text{s}$ de los comercios y $15.6\text{ m}^3/\text{s}$ son de origen doméstico (GDF Secretaria del Medio Ambiente, 2001)

El Distrito Federal cuenta con: 21 plantas de tratamiento operadas por la DGCOH, 3 concesionadas, 44 operadas por los propios usuarios, 1 operada por la UNAM y dos operadas por la SEDENA. Todas las plantas cuentan con algún tipo de tratamiento secundario, excepto dos que solo cuentan con tratamiento primario. La tabla 3.8 presenta los datos de operación y la localización, por delegación, de las plantas de tratamiento en el Distrito Federal.

Tabla 3.8 Operación y distribución de las PTAR

Delegación	Planta	Capacidad instalada (lps)	Gasto de operación (lps)	Tratamiento principal
Azcapotzalco	U.H. El Rosario	25	21	Lodos activados
Coyoacán	Ciudad Universitaria	60	26.21	Lodos activados, filtros percoladores y biodiscos
Cauhtémoc	U.H. Nonoalco Tlateloco	22	18	Lodos activados
Gustavo A. Madero	San Juan de Aragón	500	200	Lodos activados
Iztacalco	U.H. Picos Iztacalco	13	10	Lodos activados
Iztapalapa	Cerro de la Estrella	4,000	2,000	Lodos activados
	Bosques de las Lomas	55.0	18	Lodos activados
Miguel Hidalgo	Lomas de Chapultepec	160	66	Lodos activados
	Campo Militar no 1	80	25	Lodos activados
Milpa Alta	San Pedro Actopán	60	35	Lodos activados



Tabla 3.8 Continuación

Delegación	Planta	Capacidad instalada (lps)	Gasto de operación (lps)	Tratamiento principal
Tláhuac	San Andrés Mixquic	30	30	Primario avanzado
	La Lupita	15	13	Lodos activados
	Paraje el Llano	250	100	Lodos activados
	San Lorenzo	225	85	Lodos activados
	Parres	7.5	1	Lodos activados
Tlalpan	Tetelco	15	3	Primario avanzado
	Abasolo	15	7	Lodos activados
	San Miguel Xicalco	7.5	3	Lodos activados
	U.H. PEMEX Picacho	13	10	Lodos activados
	H. Colegio militar	30		Lodos activados
Xochimilco	San Luís Tlalxial Temalco	150	100	Lodos activados

Fuentes: CNA 2001 y DGCOH, 1999.

Programas de mantenimiento. Aunque dentro de los manuales de operación de las plantas de tratamiento operadas por la DGCOH aparecen procedimientos para el mantenimiento preventivo y correctivo de las mismas, existe un desmantelamiento progresivo en algunas de ellas, ya que constantemente se pasan equipos y repuestos de una planta a la otra (DGCOH, 1999).

Manejo de residuos de las PTAR en el Distrito Federal. Ninguna de las plantas operadas por la DGCOH cuenta aún con un sistema para el tratamiento de los lodos residuales producidos, vertiéndolos al drenaje generalmente, aunque en varias de ellas se están haciendo estudios para su disposición. En este sentido, se debe de tener en cuenta las características contaminantes de los mismos, así



como su posible valor comercial como fertilizantes o mejoradores de suelo, así como la producción de biogas por medio de la digestión anaerobia de los mismos.

Al ser las PTAR tecnologías complejas, se necesita que los operadores tengan una capacitación para el manejo óptimo de la misma, ya que una de las causas de la baja eficiencia de producción de las PTAR en el Distrito Federal es la baja capacitación con que cuentan los operadores de las mismas (Agua Potable, 1998).

Tarifas del agua residual. La cuota que establece el Código Financiero del Distrito Federal para el agua residual tratada es de \$1.26/m³ si se trata de agua residual cruda. Si ha recibido algún tipo de tratamiento secundario y es para uso directo es de \$8.4/m³, pero si es para distribución o comercialización el costo es de \$28.2/m³, en caso de que el agua residual haya pasado por algún tratamiento terciario el costo para uso directo es de \$12.6/m³ y de \$39.48/m³ si es para distribución y/o comercialización.

3.5.1 Plantas de tratamiento operadas por la iniciativa privada

En el Distrito Federal operan 3 plantas concesionadas, ubicadas en las delegaciones Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero e Iztacalco; además, existen en las delegaciones Álvaro Obregón, Coyoacán, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo, Tláhuac y Tlalpan plantas de tratamiento operadas por los propios usuarios. En las tablas 3.9 y 3.10 se muestran las características de estas plantas.



Tabla 3.9 Resumen de las PTAR concesionadas en el DF.

Delegación	Planta	Capacidad instalada (lps)	Gasto de operación (lps)	Tratamiento	Uso del effuente
Coyoacán	Coyoacán	400	250	Lodos activados	Riego de áreas verdes, reuso industrial
Gustavo A. Madero	Acueducto de Guadalupe	85	69	Lodos activados	Riego de áreas verdes, reuso industrial
Iztacalco	Ciudad Deportiva	230	169	Lodos activados	Riego de áreas verdes, reuso industrial

Fuente: CNA 2001, DGCOH 1999

Tabla 3.10 Resumen de plantas operadas por los propios usuarios, por delegación.

Delegación	Total de plantas	Capacidad instalada, total por delegación (l.p.s)
Álvaro Obregón	24	1.12
Coyoacán	3	3.52
Cuauhtémoc	1	3.52
Miguel Hidalgo	7	20.13
Tláhuac	4	29.85
Tlalpan	5	75.93

Fuente Revista Hidráulica Urbana 1997



3.6 Fosas sépticas

El reglamento del servicio de agua y drenaje para el Distrito Federal, en el artículo 93, indica que en los lugares donde no exista servicio de drenaje, los propietarios del lugar deberán construir fosas sépticas y las obras necesarias para eliminar las aguas residuales y pluviales. Sin embargo, no se tiene un registro exacto de las zonas donde este tipo de tecnologías funcione, se puede suponer que parcialmente las delegaciones Álvaro Obregón, Coyoacán, Cuajimalpa, Gustavo A. Madero, Iztapalapa, Magdalena Contreras, Milpa Alta, Tláhuac, Tlalpan y Xochimilco, que no cuenten con una cobertura total del sistema de alcantarillado y drenaje, se hace uso de esta tecnología.

Manejo de residuos. De la poca información que se tiene sobre las fosas sépticas en la ciudad de México, puede deducirse que solo un pequeño número de instalaciones funcionan de manera eficiente, ya que no existen indicios de recolección o procesamiento de los residuos sólidos producidos. De aquí que pueda concluirse que la mayoría de *fosas sépticas* existente son en realidad hoyos negros, presentándose en consecuencia problemas de salud y contaminación del ambiente.

3.7 Humedales

Al ser esta una tecnología nueva en México, se encuentra en etapa de investigación y desarrollo de plantas pilotos, las instituciones que han realizado trabajos en este sentido son la UNAM y la UAM. En la tabla 3.11 se muestran las investigaciones en este campo realizadas por las instituciones.



Tabla 3.11 Operación de los humedales e instituciones de investigación

Humedal	Tipo de agua que trata	Flujo de agua residual	Años de operación
Vivero Forestal de Coyoacán	Mezcla de aguas doméstica-industrial	5.6 m ³ /s flujo de diseño, soporta hasta un flujo mínimo de 3.92 m ³ /d	1998-1999
Zona Cultural CU	Doméstica	Diseñado para soportar una variación en el flujo entre 0.6 - 0.7m ³ /d	1998-
UAM Azcapotzalco	Combinación 1:1 de agua potable con agua residual de la PTAR del Rosario	Dato no disponible	Dato no disponible
UAM Iztapalapa	Agua de un reactor UASB	Dato no disponible	Dato no disponible

3.8 Otras infraestructuras

Al igual que en el capítulo anterior, a continuación se presentan algunas tecnologías que, aunque no son para el tratamiento de aguas residuales, su empleo permite reducir el volumen de agua potable suministrada.

3.8.1 Reuso de las aguas residuales tratadas

El agua residual tratada de la mayoría de las plantas operadas por la DGCOH tiene como principal destino el riego de áreas verdes y agrícolas, el llenado de lagos y canales, y en menor medida el reuso en la industria y la recarga de acuíferos. En la tabla 3.12 se muestra a detalle el reuso del agua residual tratada en el Distrito Federal (el agua se redistribuye por una red de tuberías de casi 783 kilómetros y se surte mediante 37 tomas).



Tabla 3.12 Reuso del agua residual tratada

Planta(s)	Reuso
Ciudad Universitaria, U.H. Nonoalco Tlateloco, U.H. Picos Iztacalco, Bosques de las Lomas, Campo Militar No 1, U.H. PEMEX Picacho y H. Colegio Militar	Riego de áreas verdes
U.H. el Rosario y Lomas de Chapultepec	Riego de áreas verdes y llenado de lagos
San Juan de Aragón	Mantener el nivel del lago de Aragón, riego de áreas verdes, industria y comercio
Cerro de la Estrella	Llenado de lagos y canales, riego de áreas verdes, agrícola, industria y recarga del acuífero
San Pedro Actopan, San Andrés Mixquic, Paraje el Llano y San Lorenzo	Riego agrícola
La Lupita San Miguel Xicalco	Riego agrícola y saneamiento de cauces
Parres, Tetelco y Abasolo	Riego de áreas verdes, riego agrícola y saneamiento de cauces
San Luis Tlaxialtemalco	Riego agrícola y áreas verdes.

Fuentes: CNA 2001 y DGCOH, 1999.

3.8.2 Recolección y aprovechamiento de agua pluvial

Como se mencionó en la sección correspondiente al drenaje y alcantarillado, históricamente en la Ciudad de México el sistema de drenaje es de tipo combinado, en consecuencia, no se hace un total aprovechamiento del agua pluvial que recibe el Distrito Federal, aunque, a partir del *Reglamento del Servicio de Agua y Drenaje para el Distrito Federal (1990)*, se establece el marco legal para el aprovechamiento de la misma; por ejemplo: el artículo 57 menciona la responsabilidad por parte del Gobierno de construir las obras necesarias para la captación de este recurso con el fin de incrementar los niveles de los mantos freáticos; y el artículo 91 plantea la construcción de sistemas separados para el



drenaje de aguas residuales y pluviales en los nuevos desarrollos urbanos, así como el uso de materiales que permitan la infiltración de las aguas pluviales en calles secundarias, pasillos andadores patios y banquetas.

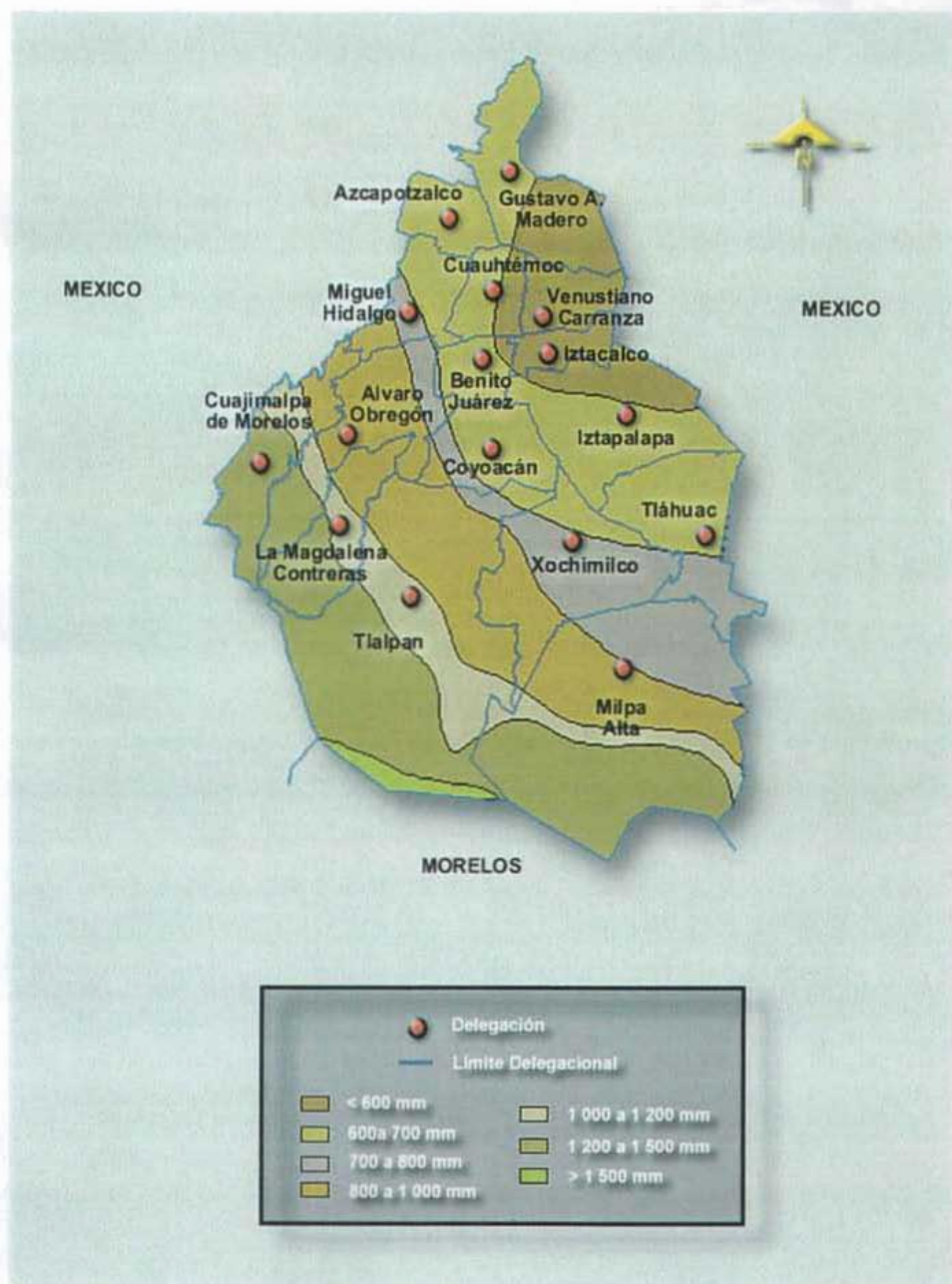
En consecuencia, la delegación Xochimilco es la única actualmente que cuenta con un sistema de drenaje separado, con aproximadamente 10 km de drenaje para recolección de aguas pluviales (DGCOH, 2002).

Cabe mencionar, que el agua de lluvia no solo puede aprovecharse a través de los sistemas de drenaje que la recolecten para su reinyección, sino que se puede aprovechar para usos donde no sea necesaria la desinfección (limpieza de pisos, descarga del sanitario, riego de áreas verdes, etc.).

La precipitación media anual en el Distrito Federal, dependiendo de la zona, tiene un valor de 600 a 1,500 mm (INEGI, 2000), figura 3.9, sin embargo no hay registro del volumen que se aprovecha de las precipitaciones en el Distrito Federal.



Fig. 3.9 Precipitación Anual Media en el Distrito Federal





Capítulo IV

Criterios de selección de alternativas

Una vez descrito el sistema (cap. 3) y las alternativas de solución (cap. 2) el siguiente paso para lograr un manejo integral del agua para la Ciudad de México es establecer los criterios de selección para las alternativas de solución

Dadas las condiciones mostradas en el capítulo anterior, se recomienda optar por sistemas de tratamiento de aguas residuales (principalmente doméstica), con bajas necesidades de operación y de mantenimiento.

El tratamiento de aguas residuales con fines de reuso esta limitado por la factibilidad económica. Actualmente existe un subsidio de 66 centavos por cada peso (PAOT, 2003), por lo que difícilmente se podrá producir una agua tratada con costos competitivos, capaz de motivar al usuario para que opte por un insumo con calidad inferior al agua de primer uso.

4.1 Análisis de alternativas de solución

Antes de establecer los criterios de selección de alternativas, vale la pena recordar que, de acuerdo a la teoría de toma de decisiones de Kepner (1970), para llegar a la resolución de un problema en forma eficaz deben seguirse los siguientes pasos:

- 1) Definir la meta a la que se pretende llegar
- 2) Establecer el alcance de la solución
- 3) Establecer los parámetros que deben cumplir las alternativas
- 4) Evaluar y seleccionar las alternativas



- 5) Implantar la alternativa seleccionada
- 6) Dar seguimiento al plan de control

En este caso la meta a la que se quiere llegar es el aumento del tratamiento in situ de las aguas residuales de la ciudad. Aunque lo ideal sería llegar al tratamiento de toda el agua residual producida en la ciudad, esto no se considera posible debido básicamente a la falta de espacio dentro de la misma.

Los alcances de la solución propuesta deberán encontrarse dentro de las condiciones económicas y sociales de nuestra ciudad, y hacer uso de las tecnologías limpias, que mejor se adapten a las diferentes características geográficas establecidas en el capítulo 3.

Para evaluar cada alternativa propuesta, se asignará una puntuación a los criterios técnicos, ambientales y sociales establecidos; y se calificarán para cada alternativa.

Dentro de los alcances de esta tesis no es posible establecer la implantación de un programa de manejo de aguas residuales, por lo que sólo se presentarán brevemente, las soluciones mejor se acoplen a las a las características sociales, económicas y ambientales, de la ciudad.

4.1.1 Identificación de problemas ambientales

Retomando del capítulo 3 sección 3.8, podemos concluir que los problemas que se presentan en el sistema de tratamiento de las aguas residuales en el Distrito Federal, y que son causa de problemas ambientales son:



Cobertura y operación. Existe un déficit entre la producción de aguas residuales y el tratamiento de las mismas del 87%, lo cual afecta además del Distrito Federal a los Estados de México e Hidalgo.

Economía. Existe un fuerte subsidio por parte del gobierno al servicio de agua potable (el costo del agua potable es aproximadamente de \$8.0 por m³ recaudándose solamente \$0.98 por m³), lo que implica que al gobierno no le quedan recursos suficiente para la inversión en plantas de tratamiento de agua residual.

Capacitación. Una de las causas por las cuales las PTAR no operan a la capacidad de diseño, es la falta de capacitación de los operadores.

Mercado. Aunque al agua residual tratada tiene ya algunos usos (comercial e industrial), no se percibe una demanda real de la misma en otros sectores donde podría sustituir el consumo de agua potable (limpieza de inmuebles, lavado de autos, campos deportivos, áreas verdes, etc.).

Técnicos. Como se demostrará mas adelante, las tecnologías que actualmente operan en la ciudad no son necesariamente las más adecuadas, de acuerdo a las condiciones presentes en la zona donde operan.

La meta y los alcances del programa que se pretende desarrollar no requieren mayor explicación, por lo que a continuación se inicia la presentación de los parámetros de evaluación de las alternativas de solución planteadas.

4.2 Criterios de selección

Como se mencionó anteriormente los criterios establecidos son de carácter técnico, ambiental y social.



4.2.1 Criterios técnicos

Rango de operación y variación en el flujo. Puesto que las aguas residuales de origen doméstico presentan grandes variaciones en el flujo, estas pueden llegar a afectar el desempeño de tecnologías como los lodos activados, que requieren de un cárcamo regulador para evitar problemas en su desempeño. Por lo tanto, este parámetro se considera determinante para seleccionar la tecnología de tratamiento en zonas densamente pobladas o en aquellas de fuerte afectación industrial.

Sensibilidad a contaminantes industriales. Como ya se mencionó en el capítulo 3, la Ciudad de México presenta sectores altamente industrializados, para estos sectores solo se podrá optar por aquellas tecnologías, como reactores SBR, que por sus principios de operación presenten mayor tolerancia a contaminantes de alta toxicidad, como lo son metales pesados y compuestos orgánicos de difícil biodegradación.

Área requerida. En función de la densidad poblacional de cada zona de la ciudad, se podrá optar por sistemas convencionales (alto consumo energético, menor espacio requerido) o por uno alternativo (bajo consumo energético, mayor espacio requerido).

Consumo energético. El consumo energético es un parámetro importante de selección, debido al impacto que tendrá en los costos de tratamiento. En todos los casos se buscará optar por la tecnología de menor consumo energético. Por ejemplo, de acuerdo a la literatura, los sistemas aerobios tipo lodos activados son los sistemas que tienen un mayor consumo de energía eléctrica, por otro lado los sistemas no convencionales, como los son los humedales, tiene prácticamente un consumo nulo de energía eléctrica

Requerimientos químicos. La adición de químicos en el proceso de tratamiento de aguas residuales incrementa el costo y, al igual que en el caso anterior,



siempre se dará preferencia a aquellas tecnologías que requieran menos tratamientos químicos o que no los requieran del todo. Esto es, siempre que sea posible se seleccionarán tratamientos físicos y/o biológicos.

4.2.2 Criterios ambientales

En éste sentido los parámetros que se considerarán son aquellos factores ambientales que puedan afectar la eficiencia de tratamiento, cómo los efectos que las tecnologías de tratamiento pueden tener sobre el ambiente.

Los parámetros ambientales que pueden influir en el desempeño de las diferentes tecnologías son: temperatura ambiental, dirección del viento y precipitación pluvial. Y los efectos adversos al medio son: producción de olores, de lodos de tratamiento, riesgo ambiental y contaminación del suelo por infiltración.

Temperatura. La temperatura promedio anual en la ciudad es de 15.6 °C (INEGI, 2000), llegándose a presentar sólo en zonas aisladas, en invierno, temperaturas cercanas a los cero grados, las cuales podrían inhibir los procesos biológicos. Sin embargo, siendo tan baja la probabilidad de tener estas temperaturas, no se considera cómo un factor influyente en la selección de las alternativas.

Dirección del viento. La dirección del viento es importante para la selección del sitio de tratamiento, ya que en caso de presentarse olores, estos no deben afectar a la población.

Precipitación pluvial. La precipitación promedio en la ciudad de México es de 787 mm, presentándose la mayor intensidad entre junio y septiembre; la precipitación es importante porque el flujo de diseño del proceso de tratamiento debe considerar la separación o no de las descargas pluviales (cómo se vio en el



capítulo 3, la mayor parte del sistema de drenaje del Distrito Federal es combinado).

Producción de olores. Este es uno de los aspectos más importantes por el efecto de rechazo que produce en comunidades aledañas. Sin embargo, considerando que solo se producen olores cuando el proceso de tratamiento no funciona correctamente, las medidas de control no deberán estar orientadas a alejar las plantas o cerrarlas, sino a operar correctamente los procesos.

Generación de lodos. En la depuración biológica de aguas residuales los contaminantes presentes son removidos, convirtiéndose en lodos. Estos lodos, por su características biológicas son considerados como residuos peligrosos y deben ser tratados y estabilizados antes de su disposición final.

Inevitablemente se generaran lodos en cualquier tecnología de tratamiento, debiéndose optar por tecnologías que produzcan la menor cantidad posible; además de contar con un sistema de tratamiento in situ.

A pesar de que la ciudad de México no cuenta con grandes extensiones de cultivo cercanas, existen bosques y suelos de conservación (50% del territorio del Distrito Federal, SMA D.F., 2000), donde podrían disponerse estos lodos de manera segura.

Riesgo a la salud (infecciones). El nivel de depuración del agua residual, como ya se mencionó, depende tanto de las normas existentes como del uso final que tendrá el agua residual tratada, a fin de evitar riesgos a la salud, en las zonas donde el agua residual tratada pueda estar en contacto con la gente se deberá restringir el acceso a estas, por ejemplo en los parques que sean regados con agua residual tratada las llaves y tuberías no deberán ser accesibles al público.

La infiltración al subsuelo o acuíferos del agua residual sin tratar, representa un grave riesgo a la salud. Para evitar la infiltración, las plantas de tratamiento deben



de contar con instalaciones impermeables. En este sentido, los sistemas que representan un mayor riesgo son las fosas sépticas, ya que muchas son construidas por los propios usuarios y no se tiene el cuidado de impermeabilizar la cámara. Se recomienda la instalación de fosas prefabricadas con materiales impermeables, y en caso de que ya estén instaladas, impermeabilizarlas.

4.2.3 Criterios sociales

Aceptación social. Cualquier tecnología que se seleccione para una comunidad tendrá un impacto social; si este es negativo o de rechazo, su funcionamiento podría verse afectado; por lo que es necesario justificar su instalación (técnica y económicamente), para lograr la aceptación en el público.

Nivel educativo. Este parámetro se traduce en la complejidad del sistema a instalar, principalmente para sistemas individuales (humedales, fosas sépticas y baños secos). Se debe recordar que uno de los principales problemas en las plantas de tratamiento es la capacitación del personal, lo cual está ligado con su nivel educativo.

Parámetros económicos. La importancia de este parámetro es obvia, debiéndose señalar que para la selección de tratamientos siempre se buscará aquella tecnología que ofrezca la mejor relación costo-beneficio.

4.3 PTAR

Debe recordarse que, antes de instalar una planta de tratamiento es necesario que exista un sistema de drenaje que conduzca el agua residual a la planta, por lo que al costo de instalación y operación que se presentarán a continuación deberá agregarse el costo de drenaje cuando este no exista.



4.3.1 Lodos activados con aireación extendida

Parámetros técnicos. Los más relevantes son:

- manejo de grandes volúmenes;
- sensible a variaciones en el flujo (requiere de un cárcamo regulador);
- los metales pesados disminuyen eficiencia;
- el tiempo de retención hidráulica es típicamente de 5 a 15 días por lo que requiere de grandes áreas;
- el consumo energético es alto;
- no requiere de la adición de ningún químico;
- la remoción de carga orgánica es del 90%, sin embargo presenta el problema de generar lodos, que después necesitan ser tratados.

Parámetros ambientales. La producción de olores es mínima por sus condiciones aerobias (cuando se llegan a presentar olores, significa que el sistema no opera adecuadamente). Esta modalidad no requiere sedimentación primaria y genera lodos altamente mineralizados, lo que permite su disposición como acondicionador de suelos (previo acondicionamiento en zona de acopio) sin necesidad de tratamiento posterior.

Parámetros sociales. Como es un sistema muy usado es aceptado sin problema por la población; para su operación se requiere personal calificado.

Costos. Su costo de operación se estima entre 0.529 y 1.58 USD por litro (EPA, 2000).



4.3.2 Lodos activados con zanjas de oxidación

Parámetros técnicos. Los principales son:

- rango de operación de 378 a 45,425 m³/d;
- son sensibles a variaciones en el flujo por lo que requieren de cárcamos reguladores;
- los metales pesados disminuyen su eficiencia;
- el área requerida es mayor a la de los procesos de aeración extendida, ya que el tiempo de retención hidráulica va de 12 a 24 días;
- el consumo energético es menor al de aeración extendida;
- no requiere químicos;
- su remoción es del 90% y la producción de lodos se estima en 0.65 kg SST/kg de DBO removido.

Parámetros ambientales. Al igual que los lodos activados con aireación extendida, se trata de un sistema aerobio, por lo que no debe existir la producción de olores.

Parámetros sociales. La operación es más sencilla que para el proceso de aeración extendida y al igual que esa, es ampliamente aceptado.

Costos. El costo por litro de agua residual tratada se estima entre 0.013 y 1.41 USD (EPA, 2000)



4.3.3 Reactor tipo SBR

Parámetros técnicos. Esta tecnología:

- tiene un rango de operación de hasta 18,000m³/d;
- soporta mayores variaciones en el flujo que los sistemas tradicionales (se ajusta a las condiciones de operación a las condiciones del influente por lo que no presenta sensibilidad a contaminantes);
- el área requerida es reducida, debido al corto tiempo de retención hidráulica que tiene este sistema. Se recomienda para localidades con poco espacio;
- el consumo energético es menor a cualquier modalidad de lodos activados;
- no tiene ningún requerimiento químico;
- presenta una eficiencia muy alta, superior al 90% (EPA, 2000) capaz de cumplir los límites permisibles, la producción de lodos es menor a los sistemas tradicionales

Parámetros ambientales. Este tipo de sistema es un sistema de lodos activados que opera de manera secuencial, por lo que no debe existir generación de olores.

Parámetros sociales. Son sistemas menos notorios que las plantas de tratamiento tradicional, por lo que la aceptación de la comunidad debería ser mayor; sin embargo, desde el punto de vista de complejidad del sistema, representa un mayor reto para los operadores, por lo que se necesita de personal capacitado.

Costos. De acuerdo con las hojas de información técnica de la EPA (2000), esta tecnología tiene un costo de operación que va de 20¢ a 50¢ por m³.



4.3.4 Filtros percoladores

Parámetros técnicos. Por la configuración de este tipo de tratamiento:

- el rango de operación es limitado para pequeñas comunidades, flujos menores a 1000 m³/d;
- son sistemas que soportan variaciones en el flujo;
- sensibles a contaminantes como metales pesados;
- el área requerida, medida en función del tiempo de retención hidráulica, es menor que en lodos activados;
- su consumo energético es menor a cualquier modalidad de lecho en suspensión;
- no tiene ningún requerimiento químico;
- presenta eficiencias de remoción de carga orgánica de hasta del 85% y produce lodos estables (lo que significa que se pueden disponer de manera segura).

Parámetros ambientales. Son sistemas mas sensibles a las condiciones de aireación por lo que pueden llegar a generar olores fácilmente.

Parámetros sociales. Al igual que los reactores SBR, son sistemas poco notorios, por lo que cuentan con la aceptación de la comunidad; sin embargo la generación de olores puede representar un serio inconveniente. Son sistemas poco complejos.

Costos. De acuerdo a la bibliografía, el costo de tratamiento con esta tecnología va de los 3.69 USD a los 16 USD/m³ (EPA, 2000).



4.3.5 Reactores anaerobios tipo UASB

Parámetros técnicos. La digestión anaerobia constituye principalmente un método de pretratamiento de gran interés. En algunos casos incluso puede ser un tratamiento completo cuando no es preciso conseguir un efluente de alta calidad, y no se requiere la eliminación de nutrientes. Así, el proceso anaerobio, basado en un digestor UASB con un tiempo de retención entre 10 y 14 horas, puede conseguir una eliminación de DQO del 75% y de SS del 90% (25 mg/l de DBO₅, 125 mg/l de DQO y 35 mg/l de SS, Ruiz, 2003).

Las ventajas de esta tecnología son:

- su amplio rango de operación; puede manejar grandes cargas de DBO, mucho mayores que los sistemas aerobios;
- son muy sensibles a variaciones en el flujo y resistentes a metales pesados;
- el área requerida es mucho menor a los sistemas aerobios, al igual que el consumo energético;
- es eficiente para la remoción de DBO y no produce tantos lodos como los procesos aerobios.

Parámetros ambientales. La principal ventaja que presenta ésta tecnología respecto a las anteriores es la prácticamente nula generación de lodos, a la vez que se genera biogas, el cual puede ser aprovechado.

Parámetros sociales. Son sistemas compactos, que producen poco ruido, por lo que no se presentarían problemas de aceptación por parte de la comunidad. Son además sistemas poco complejos.

Costos. Las ventajas económicas del tratamiento anaerobio de efluentes residuales urbanos son consecuencia fundamentalmente del ahorro energético en



relación al consumo necesario en los tratamiento aerobio para bombear el aire u oxígeno y la generación de una menor cantidad de lodos más estabilizados y de más fácil tratamiento, el costo promedio de este tratamiento es de 0.70 ϕ /m³ a 1.4 ϕ /m³ (Biotec, 2002)

4.4 Fosas sépticas

Parámetros técnicos. Estos equipos:

- manejan flujos menores a 2,300 L/d, familias de 6 a 10 integrantes;
- requieren de muy poco espacio (1-2 m²),
- la capacidad de remoción de DBO es baja, 50% de los sólidos generados se quedan en al tanque;
- son usados comúnmente en zonas donde no existe drenaje

Parámetros ambientales. Pueden representar un riesgo para el ambiente si no son instalados correctamente por: la generación de olores (se puede mitigar con el diseño adecuado del respiradero); la infiltración al subsuelo (debe impermeabilizarse el fondo); o por ser un foco de infección al manejarse inadecuadamente los lodos.

Parámetros sociales. La fosa séptica es una tecnología comúnmente empleada en regiones que no cuentan con drenaje, en zonas de escasos recursos así como asentamientos irregulares, por ejemplo los de delegación Tlalpan.

Costos. El costo de instalación de una unidad se estima en 630 USD (EPA, 2000).



4.5 Humedales de flujo subsuperficial

Se realizará el análisis sólo para éste tipo de humedales, ya que son los recomendados para el tratamiento de las aguas residuales en zonas urbanas y semiurbanas (EPA, 2000).

Parámetros técnicos. Los humedales se recomiendan para zonas donde no existe drenaje ya que ofrecen tratamiento in situ de las aguas residuales, además tienen la ventaja de ser flexibles en el diseño, tanto para el tratamiento de las aguas residuales de una sola casa o de pequeñas comunidades, además:

- son sistemas que pueden soportar sustancias tóxicas como los metales pesados,
- sin embargo, es una tecnología que requiere de un espacio considerable para un desempeño óptimo,
- la eficiencia de remoción de esta tecnología es alta, del orden del 90% de DBO, (EPA, 2000)

Parámetros ambientales. Si se les da mantenimiento, presentan pocos problemas de olores, así como la generación de vectores. El aspecto ambiental más atractivo es que pueden mejorar estéticamente la zona, siendo muy atractivos para zonas de mayores ingresos y disponibilidad de espacios.

Parámetros sociales. Al ser una tecnología que ofrece un aspecto estético, puede ser aceptada con mayor facilidad en comparación con los sistemas tradicionales para el manejo de las aguas residuales. Son tecnologías poco complejas que incluso puede ser mantenida por la propia comunidad o usuarios.

Costos. Los costos asociados a está tecnología se mostraron en el capítulo 2, sección 2.4.2.1, tabla 2.10.



4.6 Baños secos

Este tipo de tecnologías, a pesar de no ser para el tratamiento de aguas residuales, se ha manejado a lo largo de esta tesis, ya que contribuye significativamente a la disminución de producción de aguas residuales, al evitar la descarga de sanitarios.

Parámetros técnicos. El principio de funcionamiento de los sanitarios secos es tal vez la tecnología más simple, pudiendo ser operados por el propio usuario, aunque existen en el mercado tecnologías para uso residencial muy sofisticadas (Envirotoilet Company, 2002)

Parámetros ambientales. La principal desventaja que presenta desde el punto de vista ambiental es el riesgo de contagio debido al contacto con los desechos orgánicos, mismo que se puede reducir con el manejo adecuado de los mismos.

Parámetros sociales. Desde el punto de vista social, los sanitarios secos podrían tener una oposición por parte de los usuarios, dada la arraigada costumbre al uso de sanitarios con descarga de agua.

Costos. Respecto al costo, este es similar al de las fosas sépticas, pero con un rango muy amplio, de 300 a 1,500 USD. Como se mencionó en el capítulo 2, se pueden encontrar comercialmente diseños desde muy simples y económicos, adecuados para localidades con baja cobertura del drenaje y bajos ingresos, hasta diseños elegantes y muy complejos para aquellas zonas con mayores ingresos económicos que cuentan con drenaje y se emplean por el deseo de proteger el ambiente con alternativas innovadoras que disminuyan el consumo de agua.



4.7 Sistemas de recolección de agua pluvial

Parámetros técnicos. Son sistemas de baja tecnología, lo que representa una ventaja ya que los propios usuarios pueden instalarla.

Parámetros ambientales. Estos sistemas son sugeridos para el ahorro en el consumo de agua para usos como limpieza de edificios.

Parámetros sociales. Es una tecnología que puede ser instalada por los propios usuarios y debería existir ninguna oposición para su uso.

Costos. Los sistemas de recolección de agua pluvial, técnicamente son aplicables en toda la ciudad, dado que es cuestión solo de instalar un sistema de canaletas en los techos para la recolección y transporte de la misma (ver tabla 2.11).



Capítulo V

Selección de alternativas

Respecto a la situación actual de la infraestructura para el tratamiento de aguas residuales en la ciudad de México, es interesante comparar los datos presentados en el capítulo tres (tabla 3.12), correspondientes al 2003, contra el panorama existente en 1995 según se reportó en: Mexico City's Water Supply (National Research Council, 1995):

Tabla 5.1 Comparación del panorama 1995 – 2003

Situación	Año	
	1995	2003
Consumo de agua (mcs)	60	68
Distribución de la demanda de agua:		
a) Doméstico	67%	68%
b) Industrial	17%	16%
c) Comercial	16%	16%
Producción de aguas residuales (mcs)	21	22
Plantas de tratamiento	27	29
Capacidad instalada (mcs)	7.52	9.65
Volumen de aguas residuales tratado (mcs)	4.3	3
Porcentaje de agua residual tratada	10%	12%
Usos del agua residual tratada	Riego áreas verdes, riego agrícola, recarga de acuíferos, llenado de lagos, reuso industrial	

Pudiendo observar (tabla 5.1), que respecto al tratamiento de las aguas residuales no se ha avanzado notablemente, y aunque se han instalado mas plantas estas no tienen la capacidad para cubrir el servicio satisfactoriamente.



5.1 Discusión de alternativas

El balance hidrológico de la cuenca del Valle de México presenta desequilibrios graves, que comprometen la viabilidad de las actividades humanas. Es necesario abordar el problema de la escasez del agua y del rezago en la infraestructura de saneamiento con nuevos enfoques. El manejo sustentable de este recurso requiere de soluciones integrales y en muchos casos descentralizadas, en donde se vea el agua como un recurso de múltiples usos escalonados.

Además de su flexibilidad, los sistemas de recolección y tratamiento in situ favorecen las acciones de reuso en el mismo predio o en zonas aledañas; como por ejemplo, el riego de áreas verdes cercanas, la infiltración en suelos adecuados y el uso de agua tratada en la industria.

Es por esto que las soluciones que aquí se proponen estén enfocadas hacia un manejo in situ de las aguas residuales.

5.2 Selección de alternativas

Para poder seleccionar la mejor alternativa para cada sector de la ciudad, es necesario considerar detenidamente los criterios de cada tecnología, analizados en el capítulo anterior, y comparar estos criterios contra las características encontradas para cada zona de la ciudad (ver figura 3.6 de la sección 3.1). El resultado de esta comparación se muestra en la tabla 5.2



Tabla 5.2 Zona y tipo de tecnología aplicable

Zona	Tecnología aplicable
I	UASB
II	UASB
III	SBR
IV	SBR
V	SBR
VI	SBR
VII	SBR
VIII	L.A-AE, LA-ZO, FP
IX	LA-AE, LA-ZO, FP
X	FS, HU, BS
XII	FS, HU, BS



ZONAS I y II. Se recomiendan plantas de tratamiento con reactor anaerobio tipo UASB. Se recomienda esta tecnología ya que estas zonas no tienen actividad industrial importante y están densamente pobladas. Y, como se describió en la sección 4.3.5, esta tecnología tiene la capacidad de soportar altas cargas orgánicas, además de ser compacta. Aunque los reactores UASB han sido usados prioritariamente en la industria alimenticia, por las altas cargas orgánicas que se presentan, puede ser usada en las zonas mencionadas ya que no se corre el riesgo de tener presencia de sustancias tóxicas, como lo son los metales pesados, que afecten su desempeño.

ZONAS III, IV, V, VI y VII. Para estas se recomiendan plantas de tratamiento con un reactor tipo SBR. Estos reactores tienen la bondad de poder modificar su operación de acuerdo a las condiciones del efluente, soportando así tanto



variaciones en el flujo como la presencia de contaminantes tóxicos. Cabe mencionar que aunque es una tecnología que presenta un elevado nivel de complejidad, es ampliamente recomendable su aplicación en las zonas mencionadas, ya que de acuerdo a los datos presentados, sección 4.3.3, es la única alternativa que tiene una mayor tolerancia a las sustancias tóxicas provenientes de la influencia industrial existente en estas zonas. Por la parte de costos, esta es una tecnología bastante económica tanto en costos de operación, como de mantenimiento.

ZONAS VIII y IX. En estas dos zonas es posible emplear cualquiera de las siguientes tres alternativas, sin embargo, por cuestiones económicas y espacio, los filtros percoladores son más ampliamente recomendados:

LA-AE. Las plantas de tratamiento con lodos activados con aireación extendida pueden ser aplicadas en estas zonas; sin embargo no se recomienda, ya que los costos son demasiados altos. Se menciona su aplicación porque ha sido una tecnología tradicionalmente usada y se tiene mayor experiencia para su operación; sin embargo, no necesariamente es la tecnología más recomendable desde el punto de vista de las características de la ciudad.

LA-ZO. El tratamiento con lodos activados, modalidad zanja de oxidación, al igual que los lodos activados con aireación extendida, podría ser aplicado en estas zonas, ya que son zonas que no presentan influencia industrial y la densidad poblacional no es muy alta; sin embargo. Las razones por las que se descartan a los lodos activados son: requieren de gran espacio, su consumo de energía eléctrica es mucho mayor que el de las otras tecnologías, incrementando su costo de operación y son sensibles a las variaciones en el flujo y a la presencia de contaminantes industriales.

FP. Las plantas de tratamiento con filtros percoladores se recomienda para las zonas VIII y IX ya que no presentan influencia por descargas industriales,



además de ser una tecnología de poca complejidad y bajos costos de operación y mantenimiento, respecto a los lodos activados en cualquiera de sus modalidades.

ZONAS X y XI. En estas zonas solo se considera económicamente posible la aplicación de dos tecnologías de tratamiento de aguas residuales: fosas sépticas y humedales artificiales. Debiendo acompañar éstas del aprovechamiento de aguas de lluvia y, de ser posible, sustituir las fosas sépticas por el uso de baños secos para reducir en lo posible la generación de aguas residuales.

FS. El uso de fosas sépticas se recomienda para zonas donde no existe drenaje. Sin embargo, hay que tener en cuenta que presentan riesgo de infiltración y podrían contaminar los acuíferos, por lo tanto se recomienda que se asegure de que la cámara de descomposición no presente filtraciones. De aquí que se recomiende sustituirlas por baños secos y emplear humedales artificiales para el tratamiento de las aguas residuales.

Hu. La creación de humedales artificiales se recomienda ampliamente para estas zonas ya que presentan la menor densidad poblacional de la Ciudad de México, aprovechándose así las áreas verdes aún existentes para el tratamiento de las aguas residuales. Cabe mencionar que el uso de humedales en esta zona puede ser como: *humedales comunitarios*, para tratar el agua residual de las zonas de menores recursos, como los asentamientos irregulares de la delegación Tlalpan; o *humedales particulares*, para tratar el agua residual en las casas habitacionales que cuenten con el espacio suficiente y que puedan emplearlos además por su valor estético.

RAP. En principio la recolección y aprovechamiento de agua pluvial puede hacerse en toda la ciudad; desde instalaciones comunales en los edificios habitacionales y comerciales, donde el agua recolectada puede ser usada para la limpieza de las instalaciones, hasta instalaciones los sectores de menor capacidad económica de la ciudad donde no se cuenta con el servicio del agua potable. En



este segundo caso se debe ser cuidadoso a fin de evitar contaminarla y así poderla emplear para usos más amplios, que solo el lavado.

BS. Como ya se mencionó, los baños secos compiten en el mercado con las fosas sépticas, sin embargo, presentan la ventaja de que al no existir un medio líquido en la cámara de descomposición se reduce el riesgo de contaminación del acuífero. Los baños secos son una tecnología flexible desde el punto de vista del acabado y la presentación de los mismos, cubriendo tanto las necesidades de comunidades de bajos ingresos, como de las comunidades más privilegiadas.

5.3 Participación de la iniciativa privada

La iniciativa privada (IP) puede participar en el negocio del manejo y tratamiento de las aguas residuales a diferentes niveles, dependiendo la alternativa que se trate:

Plantas de tratamiento. En este caso, la IP puede participar bajo el esquema de concesión, mecanismo en el cual ya se tiene experiencia, como se mostró en la tabla 3.10 del capítulo 3.

Actualmente, la mayor oportunidad de participación para la IP en relación con esta tecnología es en la parte de consultoría y capacitación de personal para la operación de las plantas ya existentes debido a que, como ya se mencionó, una causa de la baja eficiencia en el desempeño de las plantas de tratamiento es la carencia de capacitación de su personal.

Fosas sépticas. En este sentido, la IP ha tenido una participación importante en la ciudad proveyendo de sistemas sépticos en las zonas de la ciudad que aún no tienen sistema de drenaje para el desalojo de las aguas residuales. Sin embargo, es una tecnología que podría resultar en un riesgo de contaminación del manto



acuifero si no son manejadas adecuadamente. Además, la IP también puede ofrecer el servicio de mantenimiento (vaciado y saneamiento) de las fosas sépticas ya instaladas en la ciudad.

Humedales. En el caso de humedales artificiales, como ya se mencionó en el capítulo 2, no se tiene registro de compañías nacionales que se dediquen al diseño e instalación de los mismos, sin embargo existe un gran potencial de participación de la iniciativa privada, dada la necesidad de tratamiento de aguas residuales en la ciudad, con la ventaja de que esta tecnología es muy flexibles respecto a su dimensionamiento y a los bajos costos de operación.

La IP puede participar no solo en el diseño y construcción de estos sistemas, sino en su supervisión y mantenimiento. En la Republica Mexicana existen antecedentes del exitoso funcionamiento de estos sistemas (Durán, 2002).

Baños secos. Para el caso de baños secos, la IP, puede participar directamente ofreciendo la instalación y mantenimiento de los mismos, como el caso de las compañías IEPSA S.A. de C.V. y Sirdo S.A de C.V. La IP puede participar de forma directa con el usuario que requiere del servicio, o con las delegaciones de la ciudad que podrían ofrecer el financiamiento para la instalación de esta tecnología.

5.4 Acciones previas a la aplicación

Antes de establecer puntualmente la aplicación de las tecnologías recomendadas es necesario buscar la solución del problema general de la ciudad mediante:

1. obtener los recursos económicos para dar el mantenimiento adecuado a las plantas de tratamiento ya existentes,



2. recabar los fondos necesarios, principalmente de la IP, para invertir en el desarrollo de nueva infraestructura que cubra el déficit existente (para esto es indispensable analizar el sistema actual de recaudación),
3. disminuir el consumo de agua por habitante, promoviéndose el reuso; mediante campañas más agresivas.

y, más puntualmente:

4. revisar y reparar las fugas del sistema de agua potable y alcantarillado,
5. dar mantenimiento y reparar las plantas de tratamiento de aguas residuales ya existentes,
6. revisar y reparar fugas e infiltraciones en fosas sépticas,
7. promover el aprovechamiento del agua de lluvia por parte de particulares,
8. incentivar el cambio de fosas sépticas por sanitarios secos y
9. fomentar el uso de humedales artificiales, donde sea factible, para el tratamiento de las aguas residuales domésticas.

El desarrollo de algunas de las tecnologías mencionadas podrá ser realizado tanto por los propios usuarios, como por industriales, favoreciéndose así un mejor manejo del recurso y, aunque sea ésta una obligación de las autoridades de la ciudad, debe ser una actividad en la que todos los sectores del Distrito Federal participen.



Capítulo VI

Conclusiones y recomendaciones

De acuerdo con la información presentada a lo largo de esta tesis, se puede concluir que la baja eficiencia en el tratamiento de las aguas residuales se debe principalmente a la falta de fondos por parte del gobierno para la inversión en el sector. Como ya se mencionó, la CNA establece una cuota de \$6/m³, mientras que el costo real de extracción es de \$8/m³ y la recaudación lograda es de solamente \$0.98/m³ (González, 2002).

Otro factor importante que parcialmente originó el rezago del servicio de tratamiento de aguas residuales en la ciudad, fue la crisis económica de 1996 que afectó el desarrollo comercial e industrial de todo el país (U.S Dep. of Commerce, 1997). Además de, en muchos casos, no contar con personal capacitado para la operación de las PTAR, reduciendo esto su eficiencia de operación.

El panorama que se tiene en el manejo de las aguas residuales de la Ciudad no es alentador; un esquema de cuotas con un subsidio muy alto, sobreexplotación del acuífero de la ciudad y de otras cuencas para satisfacer las necesidades de agua potable, bajo mantenimiento y pobre capacitación en las plantas de tratamiento existentes, un gran déficit en el tratamiento de las aguas residuales, un alto nivel de industrialización, un alto crecimiento poblacional, no hay que olvidar claro, el constante hundimiento de la ciudad, provocado por la sobreexplotación misma del manto acuífero.

Sin embargo, el óptimo manejo del recurso puede ser una realidad, si se analiza a la ciudad desde todas sus ámbitos, con el propósito de comprender la dinámica de la misma, logrando así identificar el origen de los problemas en el manejo de las aguas residuales y entonces sí, proponer soluciones que resuelvan al problema, y no sólo a las manifestaciones de éste, como se ha venido haciendo.



El enfoque convencional, como se esta resolviendo actualmente el manejo del agua en la Ciudad de México, es decir grandes colectores de drenaje y grandes plantas de tratamiento, no es necesariamente la solución más adecuada; el manejo descentralizado del agua puede ser la respuesta a la limitada infraestructura que se tiene actualmente.

El tratamiento y reuso in situ abre amplias posibilidades de un manejo racional. La escala de este tipo de aplicaciones puede variar entre una casa habitación individual hasta una colonia, pasando por condominios, conjuntos habitacionales, fraccionamientos e industrias una vez desarrollada este tipo de tecnología se podría diseminar rápidamente, ya que no requeriría grandes obras civiles, constituyendo así una pronta respuesta a las necesidades crecientes de este servicio.

Para lograr un manejo integral del agua en el la Ciudad de México debe de tenerse un uso eficiente del agua además del manejo sustentable del recurso, estos conceptos tienen en común el reuso amplio del agua residual tratada en la misma cuenca.

En este caso, la ventaja se reflejaría en el costo reducido del sistema de drenaje, menores diámetros y pendientes de la red colectara, así como del sistema de tratamiento; incluso podría efectuarse el intercambio de agua potable por agua tratada entre una zona marginada y zonas urbanas que cuenten con áreas verdes o zonas industriales. Un esquema conceptual del manejo del agua propuesto para zonas urbanas favorece la existencia de dos sistemas de recolección y tratamiento de efluentes: uno autónomo o in situ y otro centralizado o convencional.

A fin de lograr una mayor diseminación de las alternativas aquí propuestas, se deben de hacer los estudios particulares para cada zona, identificando puntualmente las zonas donde se podrían aplicar.



La participación de la iniciativa privada, por el momento esta muy limitada, sin embargo, se pueden empezar a explotar las tecnologías de los humedales y de los baños secos.

Por último, se puede decir que se cubrió los objetivos de, identificar los problemas en el manejo de las aguas residuales de la ciudad, proponer las alternativas para su solución, y establecer los mecanismos de participación para la iniciativa privada.

6.1 Recomendaciones

El mayor reto al que me enfrente durante la realización del presente trabajo, fue la poca información que se proporciona por parte de las autoridades, respecto al desempeño de las instalaciones para el manejo de las aguas residuales. Para la gente que quiera seguir con el desarrollo de este tema, le sugiero empezar buscando la información en las fuentes internacionales tanto nacionales como, como lo es la EPA, OPS, SMA, Cespedes.

Dado que para el análisis de la ciudad se dividió a la misma en diferentes zonas, es recomendable que la gente que le interese seguir este enfoque para la resolución de problemas tenga por lo menos conocimientos elementales en el procesamiento de imágenes, dado que es importante tener una imagen completa de la ciudad, donde se puedan apreciar aspectos geográficos, sociales y económicos, a fin de seleccionara la tecnología que más se adecue a estos.

Respeto a la información técnica, la mejor librería a la que pueden acudir es el internet, ya que existe gran divulgación de los últimos avances en el desarrollo de tecnologías para el manejo del agua, en sitios serios como lo es la propia página de la EPA, o de instituciones de investigación extranjeras, así como la facilidad para estar en contacto con empresas constructoras.



Referencias

1. Alcanzamos México, México 2004, Manual de Sanitario Seco, <http://www.zoomzap.com/manuals/SES/download-esp.php>
2. Baños Secos, Información General sobre el diseño y construcción de sanitarios secos. <http://www.compostingtoilet.org> Visitada Septiembre 200.
3. Cespedes, El Desafío del Agua en la Ciudad de México, México 2002.
4. CNA, Estadística del Agua en México, CNA, México 2002.
5. CNA, Inventario de plantas potabilizadoras y plantas de tratamiento de aguas residuales, México 2001
6. CNA, Manual de tratamiento de aguas residuales, CNA, México 1994.
7. Código Financiero del Distrito Federal, Gobierno del Distrito Federal, México 2003.
8. DGCOH, Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales, México 1999
9. DGCOH, Plan Maestro de Agua Potable, DGCOH, México 2000.
10. DGCOH, Tarifas vigentes, DGCOH, México 2003.
11. Durán Domínguez María del Carmen, Conferencia en Facultad de Química, México 2002.
12. Durán Moreno Alfonso, Curso de tratamientos de aguas residuales industriales, Facultad de Química, México 2002.



13. EPA, Folleto informativo de sistemas descentralizados. Tratamientos Aerobios, EPA, Estados Unidos 2000.
14. EPA, Folleto informativo de sistemas descentralizados. Tratamientos Anaerobios, EPA, Estados Unidos 2000.
15. EPA, Folleto informativo de sistemas descentralizados. Tratamiento y disposición de residuos sépticos, EPA, Estados Unidos 2000.
16. EPA, Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales. Humedales de flujo libre superficial, EPA, Estados Unidos 2000.
17. EPA, Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales. Humedales de flujo subsuperficial, EPA, Estados Unidos 2000.
18. EPA, Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales. Plantas paquete, EPA, Estados Unidos 2000.
19. EPA, Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales. Reactores SBR, EPA, Estados Unidos 2000.
20. EPA, Folleto informativo de tecnologías de aguas residuales. Sistemas de tanque séptico, EPA, Estados Unidos 2000.
21. EPA, Guidelines for Using Free Water Surface Constructed Wetlands to Treat Municipal Sewage, Estados Unidos 2000.
22. EPA, Onsite Wastewater treatment Systems Manual, EPA, Estados Unidos 2002.



23. González Aragón, Diagnóstico de la calidad del agua residual por sectores, Secretaria Medio Ambiente del Distrito Federal, México 1999.
24. Hidráulica Urbana, Vol. 5 Año 3, México 1997.
25. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, <http://www.inegi.gob.mx>
26. INEGI, Cuaderno Estadístico del Distrito Federal. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México 1997.
27. Jiménez Tovar Balám Jesús, Construcción y arranque de una planta de tratamiento de agua residual tipo humedad artificial de flujo horizontal, Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico, Facultad de Química México 1999.
28. Joseph Fredik, Design of aerobic process, Water Quality Management, Estados Unidos 1992
29. Martínez Mayra, Tratar el Agua, Propuesta de este Tiempo, Revista Céspedes Volumen 1 No. 5, México 2001.
30. Max y Alth, Wells and Septic Systems, Estados Unidos, 1992
31. Metcalf & Eddy, Ingeniería de las Aguas Residuales, Estados Unidos, 1996.
32. Miranda Ríos Mónica, Desarrollo, situación actual y aplicaciones potenciales de los humedales artificiales de flujo horizontal en México, Tesis



para obtener el título de Ingeniera Química, Facultad de Química, México 2000.

33. Muñoz Soberanes Juan Carlos, Humedales como una alternativa en el tratamiento de agua, Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico, Facultad de Química, México 2003.
34. National Research Council-Academia de la Investigación Científica, Mexico's City Water Supply, National Academic Press, Estados Unidos-México, 1995
35. NOM-001-Semarnat-1996 "Norma Oficial Mexicana NOM-001-Semarnat-1996", que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997.
36. NOM-002- Semarnat-1996 "Norma Oficial Mexicana NOM-002-Semarnat-1996" que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de octubre de 1993.
37. NOM-003- Semarnat-1996 "Norma Oficial Mexicana NOM-003-Semarnat-1996", Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se reusen en servicios al público. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 14 de enero de 1998



38. NOM-004-Semarnat-2002. "Norma Oficial Mexicana NOM-004-Semarnat-2002". Que establece las especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes en lodos y biosólidos para su aprovechamiento y disposición final Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de febrero del 2002.
39. NOM-006-CNA-1997 (1999) "Norma Oficial Mexicana NOM-006-CNA-1997, Fosas sépticas prefabricadas-especificaciones y métodos de prueba". Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 29 de enero de 1999.
40. Plan de Desarrollo del Estado de México 1999-2005, Gobierno del Estado de México, México 2000.
41. PMIC. Programa de Manejo Integral de Contaminantes. Facultad de Ingeniería, 2002
42. Secretaria del Medio Ambiente del Distrito Federal, Estadísticas Ambientales del Distrito Federal, México 2002.



Anexo

Directorio de empresas

Agua, Servicios De Ingeniería, Mantenimiento Y Equipos, S.A. De C.V. (Asime):
ofrece venta de equipos para Tratamientos de Agua. Contacto:

Canarias No. 724 Col. Portales 03300 México, D.F. México

Tel: (55) 5539-9189, Fax: (55) 5539-2626

E-mail: asime@asime.com.mx

IBTECH, S.A. de C.V: ofrece Aplicación de tecnología e ingeniería ambientales en
proyectos y servicios relacionados con el tratamiento de aguas residuales,
industriales, agropecuarias o urbanas. Contacto:

Poseidón No. 7 Col. Crédito Constructor 03940 México, D.F. México

Tel: (55) 5661-7522, 5661-7535, 5661-4811, 5661-4795, Fax: (55) 5661-7495

E-mail: ibtech@ibtech.com.mx

TQM: ofrece fabricación y diseño de PTAR, ubicada en el Estado de México, Blvd..
Adolfo López Mateos No 17-28, Plaza América Jardines de Atizapán, Atizapán de
Zaragoza contacto: www.tqm.com.mx, ptorres@tqm.com.mx



H2Horizontes: ofrece servicios integrales del tipo outsourcing para acondicionamiento, tratamiento y reuso de agua. Contacto:

Av. José López Portillo No. 39 Col. Lechería 54940 Tultitlán, Edo. de Méx.
México

Tel: (55) 5899-1106, 5899-1132, Fax: (55) 5884-6682, 5899-1131

E-mail: h2horizontes@mail.girsa.com.mx

Biotecnología Ambiental, ofrece: diseño, construcción y equipamiento de plantas de tratamiento de aguas residuales. Contacto:

Adolfo Prieto No. 1649-902 Col. del Valle 03100 México, D.F. México

Tel: (55) 5534-4930, Fax: (55) 5534-2196

Sanitarios Ecológicos Secos, diseño, instalación y mantenimiento de sanitarios secos (IEPSA). Contacto:

Av. Emiliano Zapata No. 107. Col. La Pradera Cuernavaca Morelos

Tel. (777) 311-13-50 y 311-58-78

Grupo de Tecnología Alternativa S.C.



Ave. De los Arcos 24 bis, San Juan Totoltepec, Naucalpan, Edo. de México CP
53270

Tel. (5) 344-0312 FAX: (5) 343-3748

E-mail: gtasc@www.interflow.com.mx