



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**SITUACIÓN ACTUAL DEL TRATAMIENTO DE AGUAS MUNICIPALES
EN MÉXICO Y PROPUESTA DE MEJORAS ENFOCADAS HACIA SU
REÚSO**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERA QUÍMICA**

PRESENTA

SANDRA ANAID MARTÍNEZ LÓPEZ



MÉXICO, D.F.

AÑO 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: José Antonio Ortíz Ramírez**
VOCAL: **Profesor: María Rafaela Gutiérrez Lara**
SECRETARIO: **Profesor: Marisela Bernal González**
1er. SUPLENTE: **Profesor: José Agustín García Reynoso**
2° SUPLENTE: **Profesor: Sergio Adrian García González**

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

UNAM FACULTAD DE QUÍMICA

ASESOR DEL TEMA:

M.I JOSÉ ANTONIO ORTÍZ RAMÍREZ

SUSTENTANTE:

SANDRA ANAID MARTÍNEZ LÓPEZ

ÍNDICE

GLOSARIO.....	9
INTRODUCCIÓN.....	10
OBJETIVO.....	13
Capítulo 1 SITUACIÓN ACTUAL	14
1.1 Control de descargas.....	14
1.2 Situación en México	22
1.2.1 Calidad del agua.....	22
1.2.2 Infraestructura Hidráulica en el país.....	28
1.2.3 Reúso de agua en México.....	34
1.3 Programa de sustentabilidad hídrica	36
1.4 Proyecto de Atotonilco.....	37
1.5 Agenda del Agua 2030	40
Capítulo 2 TECNOLOGÍAS PROBADAS A NIVEL MUNDIAL	43
2.1 Biotecnología	44
2.2 Biopelículas en suspensión	45
2.2.1 ¿Qué son las biopelículas?.....	46
2.2.2 AGAR (attached Growth Airlift Reactor).....	46
2.3 Tecnología de membranas	52
2.3.1 Tipos de materiales de las membranas.....	54
2.3.2 Configuración de las membranas.....	55
2.3.3 Ensuciamiento de membranas	57
2.4 Biorreactores de Membrana.	59
2.4.1 Ventajas	60
2.4.2 Desventajas.....	61
2.4.3 Características de diseño	62
2.4.4 Costos.....	64
2.5 Humedales artificiales.....	65
2.5.1 Ventajas	66
2.5.2 Desventajas.....	67
2.5.3 Costos	68
2.5. Humedales artificiales en México	69
2.6 Electroquímica	71
2.6.1 Electrocoagulación	72

Capítulo 3 PROCESOS DE TRATAMIENTO UTILIZADOS EN LA ACTUALIDAD Y PROPUESTA DE MEJORAS APLICANDO LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS.....	77
3.1 Introducción.....	77
3.2 Composición del agua residual municipal	78
3.3 Tratamientos convencionales utilizados en México	80
3.4 Escenarios aplicando las diferentes tecnologías.....	82
3.4.1 Tratamiento utilizando un MBR	82
3.4.2 Tratamiento utilizando biomasa en suspensión con soportes.....	84
3.4.3 Tratamiento utilizando humedales artificiales de flujo libre superficial	88
3.4.4 Tratamiento utilizando electrocoagulación	92
Capítulo 4 PERSPECTIVAS Y PROYECCIÓN AL IMPLEMENTAR LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS.....	94
4.1 Problemática.....	95
4.1.1 Crecimiento de la población.....	96
4.1.2 Demanda de agua a nivel nacional	99
4.1.3 Brecha de tratamiento de agua residual de origen municipal	100
4.2 Reúso	101
4.2.1 Reúso agrícola	103
4.2.2 Reúso Industrial	103
4.2.3 Reúso municipal	104
4.2.4 Reúso potable directo	105
4.2.5 Reúso para el mejoramiento ambiental	105
4.2.6 Recarga de acuíferos.....	106
4.3 Plan estratégico para disminuir la escasez de agua potable	108
CONCLUSIONES	116
BIBLIOGRAFÍA.....	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Normas Oficiales Mexicanas Vigentes que regulan la descarga y reúso de aguas residuales.....	15
Tabla 2. Número de sitios de monitoreo con datos para cada indicador de calidad del agua 2009	24
Tabla 3. Número de sitios de monitoreo con datos para cada indicador de calidad del agua 2009	25
Tabla 4. Distribución porcentual de sitios de monitoreo en cuerpos de agua superficiales por RHA de acuerdo al indicador DQO, 2009	26
Tabla 5. Distribución porcentual de sitios de monitoreo en cuerpos de agua superficiales por RHA de acuerdo al indicador SST, 2009	27
Tabla 6. Descargas de aguas residuales municipales y no municipales, 2009.....	28
Tabla 7. Número de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, estadística por año 2004-2009	29
Tabla 8. Caudal tratado en plantas de tratamiento en operación de agua residual municipal por entidad federativa según proceso de tratamiento, 2009	32
Tabla 9. Catálogo de procesos 2005- 2009 (número de plantas, total Nacional).....	33
Tabla 10. Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, estadística por año 2005-2009	34
Tabla 11. Fuerzas impulsoras en los procesos de membranas.....	52
Tabla 12. Clasificación de las membranas.....	53
Tabla 13. Costo de inversión y de O/M para Humedal FLS con una capacidad de 100,000 galones por día.....	68
Tabla 14. Composición característica de aguas residuales domésticas sin tratamiento.....	78
Tabla 15. Principales microorganismos patógenos en agua residual doméstica y sus lodos	79
Tabla 16. Procesos de tratamiento utilizados en un mayor número de plantas de tratamiento de aguas residuales en operación	80
Tabla 17. Comparación de calidad de efluente de un sistema de lodos activados y un MBR	83
Tabla 18. . Concentraciones “naturales” en Humedales FLS	89
Tabla 19. Resumen del desempeño de 27 sistemas de Humedales FLS.....	89
Tabla 20. Propuestas y escenarios aplicando la nuevas tecnologías.....	94
Tabla 21. Población en los años 2010 y 2030, por RHA (miles de habitantes)	97
Tabla 22. Agua renovable per cápita por RHA, 2010 y 2030.....	98

Tabla 23. Brecha restante si se tratara toda el agua residual en el 2030	109
Tabla 24. Unidades hidrogeológicas del acuitardo superior y el acuífero superior, con sus características y potencial para la recarga.....	111
Tabla 25. Tratamiento requerido para diferentes tipos de cultivo	114

Figura 30. situación de oferta y demanda de agua prevista para el 2030.....	100
Figura 31. Llenado del Lago de Xochimilco, Ciudad de México hace 30 años.	106
Figura 32. Ubicación de municipios y delegaciones en relación con las unidades geológicas de la Cuenca de México	112
Figura 33. Ciclo de reciclaje del agua	115

GLOSARIO

Aerobio	Proceso de tratamiento que se da en presencia de oxígeno.
Anaerobio	Proceso de tratamiento biológico que se da en ausencia de oxígeno.
Anóxico	Proceso facultativo (proceso biológico que se puede desarrollar en presencia o ausencia de oxígeno).
Biomasa	Materia orgánica originada en un proceso biológico.
Desnitrificación	Proceso biológico mediante el cual el nitrato se convierte en nitrógeno gas y otros productos gaseosos.
DBO	Cantidad de oxígeno que necesitan los microorganismos para oxidar la materia orgánica biodegradable (a mgO_2/mL).
DQO	Cantidad de oxígeno necesario para oxidar toda la materia orgánica (biodegradable o no biodegradable) que contiene el agua (a mgO_2/mL).
Ensuciamiento	Fenómeno que resulta de la acumulación de partículas y materia disuelta en la superficie de la membrana.
Floculo	Partícula formada por un conjunto de sólidos muy pequeños disgregados y dispersos en un fluido.
Porosidad	Relación entre el volumen de huecos y el volumen total de un elemento poroso.
PTM	Presión necesaria para hacer pasar el agua a través de la membrana.

INTRODUCCIÓN

El agua es un líquido vital para los seres vivos y además tiene un papel fundamental en las actividades humanas.

En el mundo se presenta un problema de escasez de agua potable, de acuerdo con las Naciones Unidas: el 20% de la población mundial enfrenta escasez de agua, y se espera que esto incremente en un 50% en los próximos 50 años. Una de cada seis personas en el mundo no tiene acceso diario a agua potable y al año mueren 1.6 millones de personas por beber agua contaminada, solo por destacar algunos datos.

Algunos países se han preocupado por solucionar estos problemas como el caso de Israel y han creado tecnologías que permitan la reutilización de las aguas residuales (domésticas e industriales), que aseguren una alta calidad para dichos efluentes y que sus costos no sean excesivos (comparadas con las tecnologías convencionales). México no es excepción si se habla de disponibilidad de agua, se tienen problemas por su distribución fisiográfica y climática, la contaminación tanto de aguas superficiales como subterráneas y por el acelerado incremento de las demandas que requieren los diferentes usos.

El tratamiento de las aguas residuales debe atenderse pronto de manera integral y como parte de la prestación del servicio de agua potable. En la actualidad las 2,029 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales solo tratan el 40 % del volumen total de aguas residuales de origen municipal. Esta baja cobertura en el tratamiento y la deficiente operación de la infraestructura existente, da por resultado el alto grado de contaminación que existe en varios de los cuerpos de agua como son: ríos, lagunas y mares, con consecuencias negativas para la salud, la vida acuática y el medio ambiente, no es difícil entender que se necesita de una inversión considerable para superar los rezagos en materia de saneamiento, por esta razón, se deben buscar nuevas estrategias financieras y tecnológicas con el fin de obtener recursos y resultados para hacer frente a esta prioridad.

La reutilización del agua en la agricultura es una práctica conocida en el país, sin embargo en la industria, servicios municipales, usos secundarios y recarga de acuíferos entre otros, sólo se practica en una proporción reducida. Ante la eminente escasez de agua en algunas zonas del país, el reúso de la misma se plantea como una alternativa de abastecimiento. Para el reciclaje de aguas residuales tratadas se requiere una demanda de agua; la disponibilidad de aguas residuales tratadas y los usuarios potenciales de estas; así como la capacidad de tratar el agua para obtener la calidad requerida para diferentes usos.

El presente trabajo se divide en dos partes principales:

- En la primera se presenta una investigación documental que constituyen el marco teórico de esta propuesta.
- En la segunda parte se desarrolla, la propuesta de mejoras que ayuden a incrementar el porcentaje de tratamiento de aguas residuales municipales y la reutilización de las mismas, con enfoque de proyectos nacionales prioritarios.

En el primer capítulo se muestra la problemática de nuestro país con respecto al tratamiento y la reutilización de las aguas residuales municipales, que incluyen algunos programas y acciones tomadas para cambiar dicha problemática.

El capítulo dos incluye algunos detalles como: Costos, ventajas y desventajas, etc., de diversas tecnologías que son comúnmente utilizadas en países desarrollados con resultados favorables. Entre dichas tecnologías encontramos: Los biorreactores de membrana, el tratamiento con biomasa en suspensión utilizando “soportes”, entre otras.

En el siguiente capítulo, se presentan diversos escenarios que aplican las diferentes tecnologías como alternativas para aumentar la capacidad y calidad del agua tratada, de las plantas de tratamiento existentes o para crear nuevas plantas.

Por último en el cuarto capítulo se presenta la problemática del crecimiento de la población, que como consecuencia aumentará la demanda de agua potable y el caudal de las aguas residuales a tratar y se propondrán algunas estrategias que permitan disminuir la presión hídrica que hay sobre algunas RH de México, mediante el reúso del agua residual tratada en diversas áreas como: El reúso agrícola, recarga de acuíferos, entre otras.

OBJETIVO

- Analizar la situación actual del tratamiento de aguas residuales municipales en México y estudiar la posibilidad para la aplicación de nuevas tecnologías utilizadas en el tratamiento de aguas residuales, con el fin de obtener una calidad adecuada que favorezca el reúso de los efluentes en México.

Capítulo 1 SITUACIÓN ACTUAL

*“El agua, el aire y la limpieza son los principales productos de mi farmacia.”
(Napoleón Bonaparte).*

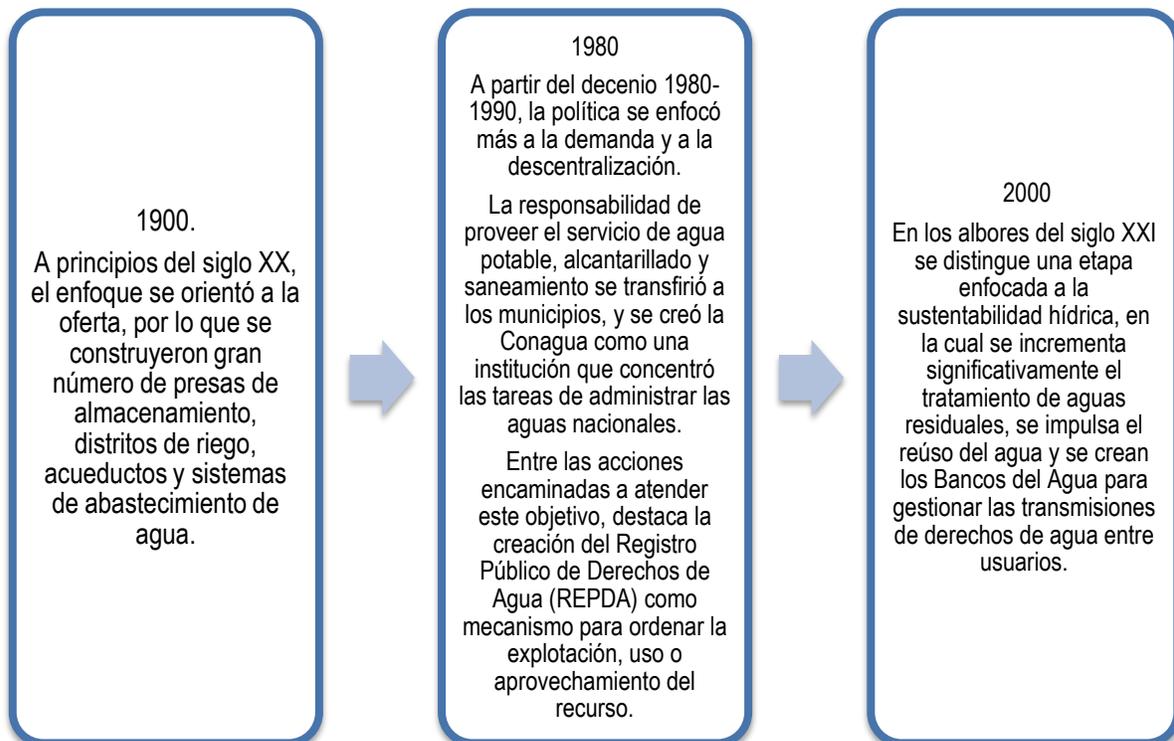
1.1 Control de descargas

El agua se emplea de diversas formas prácticamente en todas las actividades humanas, ya sea para subsistir o para producir e intercambiar bienes y servicios.

El agua consumible, es básicamente la misma agua que se extrae de pozos, manantiales o de la potabilización de agua de ríos o almacenada en presas, que llega a nuestros hogares o instalaciones y que se “usa y se desecha”.

- **México**

En la historia hídrica nacional se pueden distinguir tres etapas:



En la tabla 1 se muestran las Normas Oficiales Mexicanas que regulan la descarga y reuso de las aguas residuales.

Tabla 1. Normas Oficiales Mexicanas Vigentes que regulan la descarga y reuso de aguas residuales

NOM-001-SEMARNAT-1996	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES EN AGUAS Y BIENES NACIONALES.
NOM-002-SEMARNAT-1996	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES EN LAS DESCARGAS DE AGUAS RESIDUALES A LOS SISTEMAS DE ALCANTARILLADO URBANO O MUNICIPAL.
NOM-003-SEMARNAT-1997	LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES DE CONTAMINANTES PARA LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS QUE SE REUSEN EN SERVICIOS AL PÚBLICO.

A continuación se muestra lo que compete a materia ambiental (regulación) en diferentes países.

- **Alemania**

Los servicios de agua potable y aguas residuales de Alemania, aventajan en desarrollo y nivel de rendimiento a los de países vecinos como Austria, Suiza y Dinamarca.

En la segunda mitad del siglo XIX se produjo una mejora técnica del sistema de agua y alcantarillado en la que participaron algunas empresas privadas, pero que corrió principalmente a cargo de las plantas de tratamiento municipales creadas por la administración. El rápido crecimiento y la industrialización de las ciudades exigían mucho de las empresas privadas que, por lo general, no conseguían establecer un sistema de suministro permanente a un precio aceptable. Estos hechos fortalecieron la posición de las plantas municipales, que instalaron extensos sistemas de agua potable

que siguen funcionando hoy día. Las plantas municipales de agua suelen estar organizadas, de acuerdo con el derecho público, como asociaciones entre ciudades y otras comunidades.

En 1909, de 1,291 comunidades, el 96% disponía de su propia planta de tratamiento de agua, una cifra que se mantuvo prácticamente estable durante muchas generaciones.

En la actualidad, sigue habiendo 6,700 plantas de tratamiento de agua y 7,000 empresas de depuración de aguas residuales con propietarios particulares, la mayoría de las cuales se halla en manos públicas.¹

Casi todas las plantas de tratamiento son pequeñas y normalmente abastecen a pueblos de las zonas rurales. Suelen estar bien adaptadas a la situación hidrológica del lugar y pueden garantizar a los usuarios un agua de buena calidad. Normalmente, los pueblos y las pequeñas asociaciones de agua tienden a conservar la propiedad de las plantas y gozan de independencia municipal. Los servicios de agua y alcantarillado prestados por estas plantas se benefician de un costo neto bajo, sobre todo si se compara con otras empresas ubicadas en zonas menos favorables, como la parte media e inferior del Rin, donde el costo es muy superior.

Si se comparan los precios del agua a escala internacional, Alemania encabeza la lista. Las empresas se defienden aludiendo a la gran calidad del agua y del tratamiento de las aguas residuales, y recordando que las condiciones para fijar los precios son distintas de otros lugares e incluyen, por ejemplo, impuestos y ayudas directas o indirectas de los países europeos. Lo que sucede es que la Directiva Marco relativa al Agua de la Unión Europea, que exige que los precios del agua se calculen de acuerdo con su costo total (algo razonable en los países ricos) no suele respetarse. Si se realizara un análisis realista, que tuviera en cuenta múltiples factores, los precios del agua en Alemania pasarían a situarse en el centro de la escala.

Estas estructuras de los sistemas públicos de suministro de agua que suelen funcionar bien y son de gran calidad, son, en parte, resultado de ingenieros especializados con

¹ Transational Institute, Hans-Werner K. 2010

un gran sentido de la responsabilidad hacia el agua como un bien común y un producto básico. El gremio de ingenieros del agua y el gas ha elaborado, durante más de 125 años, un cuerpo integral y muy detallado de reglas y normas técnicas y organizativas.

Los municipios alemanes, gracias a su alto grado de autogobierno y de independencia económica y política, han organizado tradicionalmente la mayor parte de los servicios públicos (electricidad, gas, agua) en forma de Stadtwerke (empresas municipales), que serían el equivalente público de los grandes grupos privados de multiservicios.

Entre éstos destacan RWE (*Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk*), E.ON.

- **Japón**

Perfil de la gestión ambiental del agua en Japón.

Para el agua la Ley Ambiental básica considera dos tipos de estándares ambientales de calidad: Unos relacionados con la protección de salud humana y otros con la del medio ambiente vivo.

El rápido crecimiento económico de Japón en la década de los setentas estuvo acompañado de un incremento en la contaminación del agua, ello propicio la adopción de medidas. La atención del tema se da en el marco de: la Ley Básica para el Control de la Contaminación Ambiental (1967, con enmiendas en 1970), que fue sustituida por la Ley Ambiental Básica (1989) para integrar medidas más integrales para la sana conservación de condiciones ambientales; estándares ambientales de calidad de agua (1970); la Agencia del Medio Ambiente (1971), consideró la centralización de la política ambiental sobre el agua para su conservación, que fue modificada para convertirse en el Ministerio del Medio Ambiente (2001); legislación integral y de gran alcance para regular el nivel de contaminantes en ciertos cuerpos de agua donde la descarga de contaminantes era recurrente (1978); y, Ley sobre Medidas Especiales para la Conservación de la Calidad del Agua en Lagos (1984), aún cuando se buscó

combatir la contaminación en cuerpos de agua dulce a la fecha las medidas no han arrojado los resultados esperados.²

La Ley para el Control de la Contaminación del Agua, establece estándares para regular la descarga de contaminantes de instalaciones específicas; éstos consideran concentraciones específicas para diversas sustancias en relación con la salud humana y el medio ambiente vivo.

El Ministerio de Medio Ambiente, determina los estándares mínimos que deben cumplirse en todo el país para el caso de efluentes, que se consideran aguas descargadas de ciertas instalaciones que tienen permitida la descarga de aguas residuales en aguas del estado.

La Ley Ambiental Básica protege la salud humana y conservar el medio ambiente vivo, establece estándares de niveles deseables para alcanzar y mantener los objetivos de política.

Entre las sustancias ó metales regulados se encuentran cadmio, cianuros, plomo, cromo, arsénico, mercurio, fósforo, bifenilos ploriclorados (PBC), agroquímicos.

Los estándares para la protección de medio ambiente, en específico la protección del agua, se adoptan por tipo de cuerpo de agua (ríos, lagos, embalses, mares, áreas costeras) e incluyen contaminantes orgánicos y nutrientes (demanda química y bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto). Los estándares para los ríos, lagos y aguas costeras se clasifican por categoría dependiendo del uso que se da al agua (para consumo humano, pesca, uso doméstico) y ésta puede variar aguas arriba y aguas abajo. El Gobierno nacional reporta anualmente a través del Ministerio del Medio Ambiente sobre el cumplimiento de dichos estándares, recientemente se observa que la calidad del agua de los ríos ha mejorado significativamente, no así la de los lagos y los mares cerrados, ello se atribuye a la eutrofización e implica nuevas medidas.

² CONAGUA, Primer Coloquio jurídico internacional sobre regulación y manejo integral de los recursos hídricos, 2008.

Como ejemplo de los recientes avances administrativos en términos de medidas para la regulación de las descargas domésticas, se encuentran las enmiendas de 2005 a dos Leyes para mejorar la calidad del agua:

- ✓ La Ley Relativa a las Medidas Especiales para la Conservación de la Calidad del Agua de los Lagos, definió áreas para el control de efluentes, en la agricultura y zonas urbanas, además ampliaron las regulaciones a las industrias y estableció zonas de conservación ambiental en los lagos.
- ✓ La Ley de Saneamiento, fue innovada a fin de mejorar la planificación de los sistemas de tratamiento a partir del concepto amplio de cuenca, incluyendo metas de reducción e introducir la transferibilidad de las asignaciones de reducción de carga, es decir el comercio de calidad del agua.

- **Israel**

Es un país de 22,000 km² y 7.2 millones de habitantes, más de las dos terceras partes de su terreno se considera desierto, con una precipitación anual de 0 a 400 mm.

Los principales recursos de agua dulce provienen del Mar de Galilea (agua creada, pasa por un proceso de desalinización) y de los Acuíferos Costeros y de Montaña. El mayor desafío de Israel es abastecer a todos sus habitantes de suficiente agua potable, agua para la agricultura y la industria (a pesar del estado crónico de insuficiencia, sin comprometer la calidad del agua).

Las estrategias que se han adoptado en los últimos 30 años son:

- ✓ Proteger los embalses de agua dulce y asegurar su existencia
- ✓ Prevenir la pérdida de agua
- ✓ Usar el agua existente de manera eficiente, maximizando cada gota
- ✓ Cultivar nuevas fuentes de agua

Para ello, se han creado y aplicado cuatro herramientas estratégicas:

Gestión Nacional Integrada del Agua (visión, planeación, ejecución); en donde la autoridad nacional del agua asume la responsabilidad y el control dentro de un marco legal claro; educación hacia una sociedad ahorradora de agua; y tecnología.

Dentro del Marco Legal se puede observar que:

En 1959 se decretó una Ley del Agua, que declara al agua como bien público y encomienda su protección y gestión al gobierno. Acorde con esta Ley, actualmente Israel cuenta con tres entidades para la gestión del agua.

La autoridad nacional del agua, hace cumplir la política de “ahorros de agua” en materia de agua y aguas residuales mediante el establecimiento y seguimiento de reglas, estándares y tarifas. También concientiza y promueve la “cultura del ahorro de agua” por medio de campañas dirigidas al público en general, a través de reglas y estándares para promover el ahorro de agua; así mismo, aplica multas y penalizaciones a las entidades públicas y privadas y a los individuos que desperdicien el recurso.

Mekorot, es una empresa gubernamental que provee agua en grandes cantidades, cuyas funciones principales son: establecer, administrar y atender el Sistema Nacional del Agua.

Las compañías regionales y municipales del agua, operan los sistemas de agua y saneamiento regionales.

Después de que se estableció la Ley, el país diseñó un revolucionario sistema llamado “Portador Nacional de Agua” (PNA) en los años 50’s para tomar agua del norte y enviarla al sur. El sistema: recarga los acuíferos durante el invierno para asegurar su existencia continua, eliminar la evaporación y mejorar la protección del agua; conecta casi todos los recursos hídricos del país; y, mueve las corrientes salinas de los embalses al mar Muerto.

Además se promueve la cultura del ahorro de agua mediante la combinación de educación, tecnología y legislación

En los sistemas municipales de aguas residuales se ha puesto especial énfasis en la vigilancia y seguimiento del agua desde que entra a las ciudades y hasta que llega a las casas, a fin de que no se pierda agua en el trayecto. Actualmente, la pérdida de agua municipal es de 9.7%. Los municipios que desean instalar mecanismos para ahorro de agua reciben ayuda financiera de la Autoridad Nacional del Agua; aquellos que consumen más de la cantidad asignada son severamente multados.

Con el calentamiento del planeta y menores lluvias cada año, la disponibilidad de agua dulce ha decrecido constantemente, por ello el gobierno ha decidido dos movimientos estratégicos: reciclar el agua residual en varios niveles, mediante tratamientos secundarios para la irrigación de tierras y a un nivel potable para la agricultura; y, en lo que se refiere a la fuente de agua del mar, el reto no es sólo desalinizar, sino hacer que el complicado y costoso proceso sea rentable a fin de que el país pueda utilizar esta agua y esté en posibilidad de manejar su presupuesto normalmente para atender el resto de las necesidades de la población.

Actualmente casi el 80% del agua residual es reciclada y utilizada para irrigación.

Anualmente 160 millones de m³ de agua de mar son desalinizados a un costo de tan sólo \$0.52-\$0.60 USD por m³. La meta es que en los próximos cinco años, se alcance un tratamiento del 90% y la desalinización de 500 millones de m³ anuales. Para el 2013, Israel cruzará la Barrera del 50% y utilizará más agua creada que agua dulce.³

³ CONAGUA, Primer Coloquio jurídico internacional sobre regulación y manejo integral de los recursos hídricos, 2008.

También fue lanzado un nuevo programa conocido como NEWTech (Tecnologías Novedosas para la Eficiencia del Agua). El objetivo del programa es fortalecer el sector desde dentro, opera de diferentes maneras: Fortalecer el capital humano, colaborando con centros de educación media y media superior para incluir cursos y estudios relacionados con el agua y ofertar cursos avanzados de asesoramiento para ingenieros y otros profesionales; fortalecer la investigación y el desarrollo, mediante becas y apoyo a los investigadores universitarios de campo, a jóvenes empresas e incubadoras de empresas tecnológicas, a la creación de nuevos institutos especializados de investigación; promover la aplicación de las nuevas tecnologías, a través de incentivos regionales y municipales para las entidades de gestión del agua, mediante la cooperación internacional con autoridades del agua de todo el mundo; y ayudar a promover en el extranjero la industria de tecnologías del agua, entre otros mecanismos mediante acuerdos de cooperación bilateral, la participación en eventos y creación de herramientas sectoriales de mercado.

1.2 Situación en México

En México se tienen problemas de disponibilidad de agua por su distribución fisiográfica y climática, contaminación de aguas superficiales y subterráneas y por el incremento acelerado de las demandas que requieren los diferentes usos.

1.2.1 Calidad del agua

En el 2009 la Red Nacional de Monitoreo contaba con 1,510 sitios, distribuidos a lo largo y ancho del país.

Las determinaciones de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos se llevan a cabo en la Red Nacional de Laboratorios, que consta de trece laboratorios ubicados en los organismos de cuenca y quince en las direcciones locales (en el 2009).

Adicionalmente a los parámetros fisicoquímicos antes señalados, a partir del 2005, se realizan monitoreos biológicos en algunas regiones del país.

La evaluación de la calidad del agua se lleva utilizando tres indicadores:

1. Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5)
2. Demanda Química de Oxígeno (DQO)
3. Sólidos Suspendidos Totales (SST)

Las primeras dos se utilizan para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua provenientes principalmente de las aguas residuales tanto de origen municipal como no municipal.

La DBO_5 determina la cantidad de materia orgánica biodegradable y la DQO mide la cantidad de materia orgánica susceptible a oxidarse. El incremento de la concentración de estos parámetros incide en la disminución del contenido de oxígeno disuelto en los cuerpos de agua con la consecuente afectación a los ecosistemas.

Por otro lado el aumento de la DQO indica la presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales (por la presencia de sustancias inorgánicas susceptibles de ser oxidadas como sulfuros, sulfitos, yoduros.etc).

Los SST tienen su origen en las aguas residuales y la erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática. Estos parámetros permiten reconocer gradientes que van desde una condición relativamente natural o sin influencia de la actividad humana hasta agua que muestra indicios o aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales, así como áreas de deforestación severa.

La evaluación de la calidad del agua para el 2009 considerando indicadores de calidad se realizó con base a lo citado en la tabla 2.

Tabla 2. Número de sitios de monitoreo con datos para cada indicador de calidad del agua 2009⁴

Indicador de calidad del agua	Núm. de sitios de monitoreo
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	605
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	646
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	744

De acuerdo con los resultados de las evaluaciones de calidad del agua para los tres indicadores de la misma (DBO₅, DQO y SST) aplicadas a los sitios de monitoreo en el 2009, se determinó que veintiún cuencas están clasificadas como fuertemente contaminadas en algún indicador, en dos de ellos o en todos.

⁴ CONAGUA, Descarga de aguas residuales municipales y no municipales, 2009

En la tabla 3 se presenta la distribución de sitios de monitoreo de cada RHA (Región-Hidroológico-Administrativa) considerando la DBO₅ como indicador.

Tabla 3. Número de sitios de monitoreo con datos para cada indicador de calidad del agua 2009⁵

RHA		Excelente	Buena Calidad	Aceptable	Contaminada	Fuertemente contaminada
I	Península de Baja California	27.3	9.1	45.5	13.6	45
II	Noroeste	50	26.5	23.5	0	0
III	Pacífico	70.7	12.2	17.1	0	0
IV	Balsas	16.6	23.8	41.7	13.1	4.8
V	Pacífico Sur	0	0	0	0	0
VI	Río Bravo	48.6	46.2	2.6	2.6	0
VII	Cuencas Centrales del Norte	90	10	0	0	0
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	48.7	9.3	24	12.7	5.3
IX	Golfo Norte	80.9	11.9	4.8	2.4	0
X	Golfo Centro	0	70.3	13	11.1	5.6
XI	Frontera Sur	0	86.1	13.9	0	0
XII	Península de Yucatán	90	0	10	0	0
XIII	Aguas del Valle de México	4.2	0	20.8	25	50
Total Nacional		41	26.8	19.7	7.9	4.6

⁵ CONAGUA, Estadística del agua en México, edición 2011.

En la tabla 4 se presenta la distribución de sitios de monitoreo de cada RHA (Región-Hidroológico-Administrativa) considerando la DQO como indicador.

Tabla 4. Distribución porcentual de sitios de monitoreo en cuerpos de agua superficiales por RHA de acuerdo al indicador DQO, 2009⁶

RHA		Excelente	Buena Calidad	Aceptable	Contaminada	Fuertemente contaminada
I	Península de Baja California	4.5	0	13.6	68.2	13.7
II	Noroeste	43.5	17.7	24.2	14.5	0.1
III	Pacífico	11.7	41.2	11.8	35.3	0
IV	Balsas	9.5	21.4	27.4	28.6	13.1
V	Pacífico Sur	96	0	4	0	0
VI	Río Bravo	51.6	39.8	1.1	7.5	0
VII	Cuencas Centrales del Norte	25	30	45	0	0
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	4	17.3	26.7	42	10
IX	Golfo Norte	55.6	22.2	11.1	6.7	4.4
X	Golfo Centro	39.6	8.3	22.9	25	4.2
XI	Frontera Sur	16.6	50	13.9	13.9	5.6
XII	Península de Yucatán	55	30	10	5	0
XIII	Aguas del Valle de México	4.1	0	12.5	29.2	54.2
Total Nacional		28	22.1	18.6	23.5	7.5

⁶ CONAGUA, Estadística del agua en México, edición 2011.

En la tabla 5 se presenta la distribución de sitios de monitoreo de cada RHA (Región-Hidroológico-Administrativa) considerando la SST como indicador.

Tabla 5. Distribución porcentual de sitios de monitoreo en cuerpos de agua superficiales por RHA de acuerdo al indicador SST, 2009⁷

RHA		Excelente	Buena Calidad	Aceptable	Contaminada	Fuertemente contaminada
I	Península de Baja California	68.4	18.5	5.6	5.6	1.9
II	Noroeste	69.4	17.7	4.8	4.8	3.3
III	Pacífico	41.4	36.6	17.1	4.9	0
IV	Balsas	35.6	42.9	14.3	6	1.2
V	Pacífico Sur	32	52	12	4	0
VI	Río Bravo	82.8	12.9	4.3	0	0
VII	Cuencas Centrales del Norte	30	40	20	5	5
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	35.4	38.4	15.1	7.6	3.5
IX	Golfo Norte	51.7	31	12.1	5.2	0
X	Golfo Centro	72.1	14.8	1.9	9.3	1.9
XI	Frontera Sur	69.4	30.6	0	0	0
XII	Península de Yucatán	95	5	0	0	0
XIII	Aguas del Valle de México	24	24	20	32	0
Total Nacional		54	28.9	10.1	5.9	1.6

⁷ CONAGUA. Estadísticas del agua en México, edición 2011.

1.2.2 Infraestructura Hidráulica en el país

México cuenta con aproximadamente 4,462 presas y bordos de almacenamiento, 6.5 millones de hectáreas de riego, 2.9 millones de hectáreas de temporal tecnificado, 631 plantas potabilizadoras en operación, 2,029 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación, 2,186 plantas de tratamiento de aguas residuales industriales en operación y más de 3,000 km de acueductos.

Las descargas de agua residual se clasifican por su origen, las cuales son: municipales (manejadas por los sistemas municipales urbanos y rurales de alcantarillado) y en industriales, directas a cuerpos receptores de agua de propiedad nacional, como en el caso de la industria autoabastecida.

En la tabla 6 se muestra el flujo de descarga de aguas residuales municipales en el 2009.

Tabla 6. Descargas de aguas residuales municipales y no municipales, 2009⁸

Centros urbanos (descargas municipales)		
Aguas residuales	7.49	km ³ /año (237.5 m ³ /s)
Se recolectan en alcantarillado	6.59	km ³ /año (209.1 m ³ /s)
Se tratan	2.78	km ³ /año (88.1 m ³ /s)
Se generan	2.02	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se recolectan en alcantarillado	1.78	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	0.61	millones de toneladas de DBO ₅ al año

Las aguas residuales procedentes de los sistemas de recolección mediante el alcantarillado ó mediante canales abiertos descargan en la mayoría de los casos, en los cursos naturales de agua. Su descarga en las corrientes cambia las características del agua que la recibe.

En ésta forma los materiales que se depositan en el lecho impiden el desarrollo de la vida acuática.

⁸ CONAGUA, Descarga de aguas municipales y no municipales, 2009.

Tabla 7. Número de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, estadística por año 2004-2009⁹

Nombre de Estado	Número de plantas en operación	Capacidad instalada (L/s)	Caudal tratado (L/s)
Aguascalientes	117	4099.48	3354.22
Baja California	31	7233.6	5620.03
Baja California Sur	23	1447.47	1062.77
Campeche	21	140.5	97.3
Coahuila de Zaragoza	23	5206.5	4026
Colima	69	1592.8	1145.9
Chiapas	28	1417.08	969.41
Chihuahua	140	9000.4	5937.25
Distrito Federal	28	6770.5	3329.8
Durango	174	4156.91	3208.06
Guanajuato	60	5875.35	4415.61
Guerrero	47	3500.97	2694.5
Hidalgo	12	329.5	289.2
Jalisco	122	4201.6	3530.3
Edo. de México	78	7090.2	5190.3
Michoacán de Ocampo	25	3583	2793.1
Morelos	38	1905.2	1366.1
Nayarit	63	2293.6	1428.4
Nuevo León	61	13249	10877.15
Oaxaca	66	1510.3	986.1
Puebla	72	3152.19	2545.29
Querétaro	75	1202	800.45
Quintana Roo	31	2211.5	1725.18

⁹ CONAGUA, Descarga de aguas municipales y no municipales, 2009.

San Luis Potosí	30	2333.74	1906.22
Sinaloa	162	5497.44	4574.31
Sonora	83	4672.21	2826.43
Tabasco	73	1930	1396.46
Tamaulipas	42	6113.93	4320.7
Tlaxcala	55	1295.91	890.63
Veracruz de Ignacio de la Llave	105	6799.92	4093.29
Yucatán	20	300.57	81.99
Zacatecas	55	747.52	644.63
Total	2029	120860.89	88127.08

En la tabla 7 muestra el número de plantas por entidad federativa que se encuentran operando hasta el 2009, dichas plantas trataron el 43% de los 209.1 m³/s de aguas residuales recolectados.¹⁰

¹⁰ CONAGUA. Estadísticas del agua en México, edición 2011.

En la figura 1 se observa la distribución de las plantas de tratamiento de aguas residuales en México.

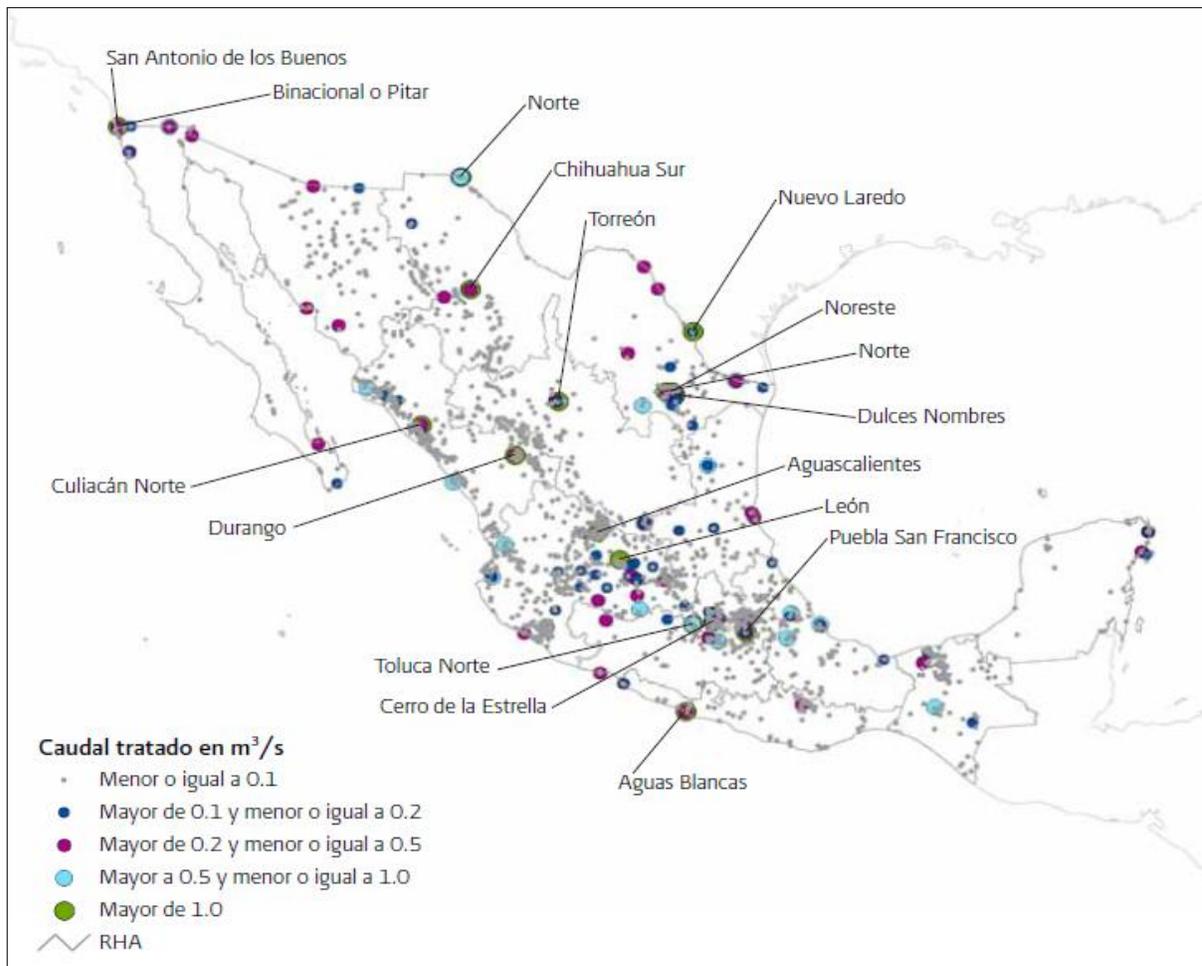


Figura 1. Plantas de Tratamiento de Aguas Municipales en México

En la tabla 8 se muestra un listado del tipo de tratamiento y el número de plantas que se tienen instaladas.

Tabla 8. Caudal tratado en plantas de tratamiento en operación de agua residual municipal por entidad federativa según proceso de tratamiento, 2009 ¹¹

Nombre genérico del tratamiento	Tipo de tratamiento	Número de plantas (total Nacional)	Caudal (L/s)
Discos biológicos	Aerobio	8	464.5
Dual	Aerobio y Anaerobio	10	4175.6
Filtros biológicos	Aerobio	97	4734.4
Lagunas de estabilización	Aerobio y Anaerobio	707	13738.1
Lagunas aireadas	Aerobio	32	7142.9
Lodos activados	Aerobio	546	40919.7
Primario	Físico	21	1598.56
Primario avanzado	Químico, Aerobio y Anaerobio	16	9814
R.A.F.A	Anaerobio	129	1125.7
Reactor enzimático	Aerobio	61	109.58
Tanque Imhoff	Aerobio	61	410.22
Tanque séptico	Anaerobio y Aerobio	78	105.26
Wetland	Aerobio	160	597.38
Zanjas de oxidación	Aerobio	24	2364.67
Otros	-----	79	826.51
Total	-----	2029	88127.08

RAFA= Reactor anaerobio de flujo ascendente.

¹¹ CONAGUA. Descarga de aguas residuales municipales y no municipales, 2009.

En la tabla 9 de muestran los él catalogo de procesos en el periodo del 2005 al 2009 y el número de plantas a nivel nacional.

Tabla 9. Catálogo de procesos 2005- 2009 (número de plantas, total Nacional)¹²

Cuenta de Proceso tratamiento		Año PTAR				
Clave proceso	Proceso tratamiento	2005	2006	2007	2008	2009
1	Biodiscos	7	7	6	6	8
2	Filtros biológicos	58	70	74	79	97
3	Humedal artificial	86	110	130	138	160
4	Lagunas de estabilización	592	622	646	677	707
5	Lagunas aireadas	14	19	26	24	32
6	Lodos activados	334	372	417	454	546
7	Primario	16	15	13	21	21
8	Primario avanzado	17	17	14	15	16
9	Reactor anaeróbico de flujo ascendente	79	116	111	130	129
10	Reactor enzimático	42	50	59	62	61
11	Tanque Imhoff	56	50	59	59	61
12	Tanque séptico	69	74	77	116	78
13	Zanjas de oxidación	20	23	20	22	24
14	Otros	43	48	58	20	79
15	Dual				10	10
Total general		1433	1593	1710	1833	2029

¹² CONAGUA, Descarga de aguas residuales municipales y no municipales, 2009.

La tabla 10 muestra como ha incrementado el número de plantas de tratamiento de aguas residuales del 2005 al 2009.

Tabla 10. Plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, estadística por año 2005-2009¹³

Año PTAR	Número de plantas en operación	Capacidad instalada	Caudal tratado
2005	1687	101673.77	72026.94
2006	1898	105759.66	74735.63
2007	2113	113972.47	79755.82
2008	1833	113023.97	83639.59
2009	2422	127976.55	88653.73

1.2.3 Reúso de agua en México

El reúso del agua en la agricultura es una práctica conocida en el país, sin embargo el reúso en la industria, servicios municipales, usos secundarios y recarga de acuíferos entre otros, sólo se practica en una proporción reducida. Ante la eminente escasez del recurso en algunas zonas del país, el reúso del agua se plantea como una alternativa de abastecimiento. Para este se requiere una demanda de agua, la disponibilidad de aguas residuales tratadas y los usuarios potenciales de estas, así como la capacidad de tratar el agua para obtener la calidad requerida para diferentes usos.

Se estima que se reutilizaron 5,051 millones de metros cúbicos de agua en el 2008 (equivalente a un caudal 160 m³/s), destacando la transferencia de aguas residuales colectadas hacia cultivos agrícolas. En menor proporción, se reutilizan las aguas en la industria.

En el reúso de agua de origen municipal destaca la transferencia de aguas residuales colectadas en las redes de alcantarillado hacia cultivos agrícolas. En una menor proporción se reutilizan dichas aguas en las industrias, así como en las termoeléctricas.

¹³ CONAGUA, Descarga de aguas residuales municipales y no municipales, 2009

En la figura 2 se muestra un esquema de la distribución del reúso del agua residual de origen municipal en México, considerada al 2009.

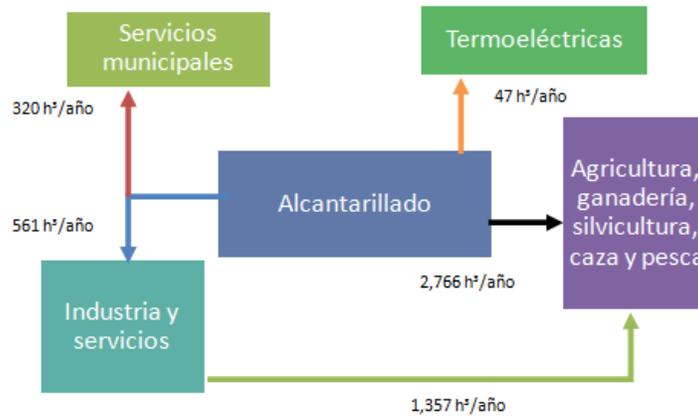


Figura 2. Reúso del agua residual en México, 2009¹⁴

En el país, de manera general, las tarifas de agua son bajas, lo que pone en desventaja a su tratamiento y reúso. Por estas razones los costos del agua residual tratada deben de compararse con los costos reales de producción de agua potable.

Adicionalmente, a los costos del agua para reúso deberían de agregársele los costos de los beneficios obtenidos por ahorros logrados al disminuir problemas de salud pública y de protección al ambiente; por la atenuación del impacto, por cambios de estilo de vida, atenuación de problemas sociales para la obtención de agua, reducción de la explotación de aguas subterráneas y superficiales y de sus consecuencias ambientales; disminución de gastos en la recuperación de suelos salinizados, y en general por reducir la tasa de consumo del agua limpia disponible. En términos prácticos, son difíciles de cuantificar los beneficios y costos de estos conceptos, sin embargo, sería injusto cargarlos a los gastos ocasionados por el reúso. El reúso debe incluir los costos de postratamiento de acuerdo con los requerimientos técnicos y normativos para cada tipo específico y los de conducción del agua tratada hasta el sitio de reúso.

¹⁴ CONAGUA, Subdirección General de Programación de Cuenca del Agua 2010.

1.3 Programa de sustentabilidad hídrica

Durante el sexenio anterior se puso en marcha, a través de la Comisión Nacional del Agua, el Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México.

Las acciones principales de este proyecto de CONAGUA, radican en la recuperación de los mantos acuíferos, el desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento de agua potable, dar cumplimiento a la normatividad vigente en materia ambiental, la rehabilitación al Sistema Cutzamala, fomentar el uso eficiente y ahorro de agua, el tratamiento del 100% de las aguas residuales, el saneamiento de cauces con aguas negras a cielo abierto, y la ampliación de la capacidad del sistema de drenaje. Todo esto para beneficio de 20 millones de habitantes del Valle de México.

Para estos fines, CONAGUA ha iniciado campañas y obras de infraestructura de suma importancia, como el Túnel Emisor Oriente y la Planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco.

- *Objetivos del Programa de Sustentabilidad Hídrica del Valle de México:*
 - La rehabilitación al Sistema Cutzamala
 - El desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento de agua potable
 - Disminuir la sobreexplotación de los acuíferos, con lo cual además se abatirá el hundimiento de la zona metropolitana
 - Ampliar la capacidad de drenaje, mediante la construcción del Túnel Emisor Oriente, lo que permitirá reducir el riesgo de inundaciones
 - Tratar el total de las aguas residuales del Valle de México
 - El saneamiento de cauces con aguas negras a cielo abierto
 - Dar cumplimiento a la normatividad vigente en materia ambiental
 - Fomentar el uso eficiente y ahorro de agua

1.4 Proyecto de Atotonilco

La planta de tratamiento de aguas residuales más grande del país, se construye en el municipio de Atotonilco de Tula, Hidalgo (Fig. 3). Tendrá capacidad para tratar 23 m³/s por segundo durante el estiaje (mediante proceso convencional) y un modulo adicional (mediante proceso físico-químico) para tratar 12 m³/s en época de lluvias.



Figura 3. Vista panorámica de avance de obras de la PTAR Atotonilco

Esta obra será de gran beneficio para los hidalguenses, ya que mejorará las condiciones sanitarias de la población y permitirá utilizar agua tratada en la agricultura (conservando los nutrientes de las aguas residuales pero eliminando los contaminantes), además de facilitar la tecnificación de los sistemas de riego y la producción de cultivos de mayor valor agregado. La localización de esta planta obedece a que las aguas negras del Valle de México descargan en el municipio de Atotonilco de Tula, donde también comienzan los distritos de riego de la región, por

lo que será posible el aprovechamiento de las aguas tratadas que actualmente son utilizadas en la agricultura sin ningún proceso de limpieza.

El agua tratada tendrá dos destinos: el Canal Salto Tlamaco para riego agrícola y el Río El Salto de cuyo cauce se derivan algunos canales de riego, en particular el Canal Viejo Requena, que descarga sus gastos excedentes en la presa Endhó. Con el procesamiento de las aguas sucias se beneficiará a 700 mil personas del Valle del Mezquital, de las cuales 300 mil habitan en zonas de riego. Además, durante la construcción se generarán 8, 880 empleos directos y 7, 820 indirectos.

Si bien la planta podrá procesar hasta 35 m³/s debido a las técnicas de saneamiento que serán empleadas durante su operación, será factible, en épocas de lluvia, soportar un pico de hasta 20% más, llegando así a 42 m³/s. El tratamiento de las aguas residuales se hará a través de un Tren de Procesos Convencionales (TPC), durante estiaje y en época de lluvias se usará un Tren de Procesos Químicos (TPQ) para tratar los excedentes de agua.

Además de los beneficios sociales que se generarán con la operación de la planta de tratamiento se aprovechará el contenido energético de los lodos y se convertirá el gas metano en energía eléctrica.

Con el aprovechamiento del metano se pretende que la planta tratadora sea autosuficiente en sus necesidades de electricidad. La inversión total de esta magna obra hidráulica será de 10 mil 22 millones de pesos, de los cuales el Fondo Nacional de Infraestructura (FONADIN) aportará 4 mil 599 mdp, y el capital restante provendrá de la iniciativa privada.

Las empresas ganadoras para elaborar el proyecto prestarán los servicios de tratamiento de aguas residuales del Valle de México, que incluye la elaboración del proyecto ejecutivo, construcción, equipamiento electromecánico, pruebas, operación, conservación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales Atotonilco.

El servicio que prestarán dichas empresas también incluye la remoción y disposición final de los lodos y biosólidos que se generen en la misma, así como la construcción de una planta de cogeneración; bajo la modalidad plurianual a precio fijo con inversión de recursos públicos y participación de inversión privada parcial recuperable. El contrato firmado el pasado 7 de enero establece que las empresas ganadoras prestarán los servicios de tratamiento de aguas residuales del Valle de México por 25 años, los primeros tres años serán para el diseño, elaboración del proyecto y construcción de la planta de tratamiento.

La figura 4 ¹⁵ muestra el proceso de tratamiento de la PTAR Atotonilco.



Figura 4. Esquema de funcionamiento de la PTAR Atotonilco

¹⁵ Coordinación de Proyectos del valle de México PTAR Atotonilco, 2009.

1.5 Agenda del Agua 2030

Es un instrumento para la cabal implementación de una política de sustentabilidad hídrica.¹⁶

Proporciona una visión a largo plazo que busca formar una coalición institucional para superar los rezagos del sector y consolidar la política hídrica de sustentabilidad en nuestro país.

Fue impulsada por la CONAGUA y durante el 2009 se llevaron a cabo estudios y acciones de planeación. En marzo de 2010 se tuvo una convocatoria del Poder Ejecutivo Federal para integrar la Agenda del Agua 2030, con el objetivo de lograr una visión compartida entre todos los involucrados en el sector hídrico (actores y usuarios), se diseñó un proceso de participación pública.

Dicha consulta pública fue llevada a cabo durante el periodo de marzo a noviembre del 2010, con una respuesta de más de 2,600 participantes con más de 3,300 participaciones, mediante los siguientes ejercicios¹⁷:

- ✓ Mesas de trabajo transversales. Para integrar una visión compartida sobre las tareas interregionales y transversales de la Agenda del Agua 2030
- ✓ Foro virtual. Como espacio abierto para participación pública
- ✓ Foros regionales. Para instaurar un proceso recurrente de pensamiento y participación respecto de la Agenda del Agua 2030, con énfasis en la problemática regional
- ✓ Foro nacional. Como proceso culminante de interacción, en que se identificaron necesidades de inversión. Al cierre de esta edición, se tienen identificadas diversas iniciativas agrupadas en los cuatro ejes de la Agenda del Agua 2030, así como iniciativas generales, que se identificaron en el proceso de consulta sobre los temas de planeación, financiamiento, información y manejo del cambio

¹⁶ Agenda del Agua 2030, CONAGUA, SEMARNAT, 2011.

¹⁷ CONAGUA. Estadísticas del agua en México, edición 2011.

La Agenda del Agua 2030 no agota la planeación nacional del agua, sino que es una parte de ésta; tiene como insumos las definiciones de política en materia de agua y los resultados de los análisis de origen técnico.

- **Ejes y estrategias de la Agenda del Agua 2030**

Ríos limpios	Cuencas en equilibrio	Cobertura universal	Asenamientos seguros frente a inundaciones catastróficas
<ul style="list-style-type: none"> • Todas las aguas municipales tratadas • Todos los ríos y lagos sin basura • Fuentes de contaminación difusa bajo control • Todas las aguas industriales tratadas 	<ul style="list-style-type: none"> • Toda la superficie de riego tecnificada • Cuencas autoadministra-das • Todas las aguas tratadas se reutilizan • Todos los acuíferos en equilibrio 	<ul style="list-style-type: none"> • Suburbios urbanos conectados a redes • Localidades rurales con agua potable • Organismos operadores funcionando eficientemente 	<ul style="list-style-type: none"> • Eficaz ordenamiento territorial • Zona inundables libres de asentamientos humanos • sistemas de alertamiento y prevención con tecnología de punta

Figura 5. Componentes básicos de la AA2030¹⁸

Como podemos observar en la figura 5. El tema del tratamiento de las aguas residuales se plantea en apartado que compete a Ríos limpios, en este punto se discute que para lograr ríos limpios en todo el territorio nacional se necesitará garantizar que las aguas residuales descargadas a los cuerpos receptores cumplan con los niveles de calidad definidos en el marco jurídico aplicable; diseñar acciones que reduzcan la contaminación generada por fuentes difusas como los retornos agrícolas y mantener los causes libres de basura.

Con la infraestructura existente en el 2010, se trataron 2.851miles de millones anuales de aguas residuales municipales, equivalente al 43% de las aguas residuales recolectadas.

¹⁸ Agenda del Agua 2030, CONAGUA, SEMARNAT, 2011.

Para el año 2030, se requerirá infraestructura para dar tratamiento a 7.157 miles de millones de metros cúbicos, lo que significa cubrir una brecha de 4.3 miles de millones de metros cúbicos (Fig. 6).

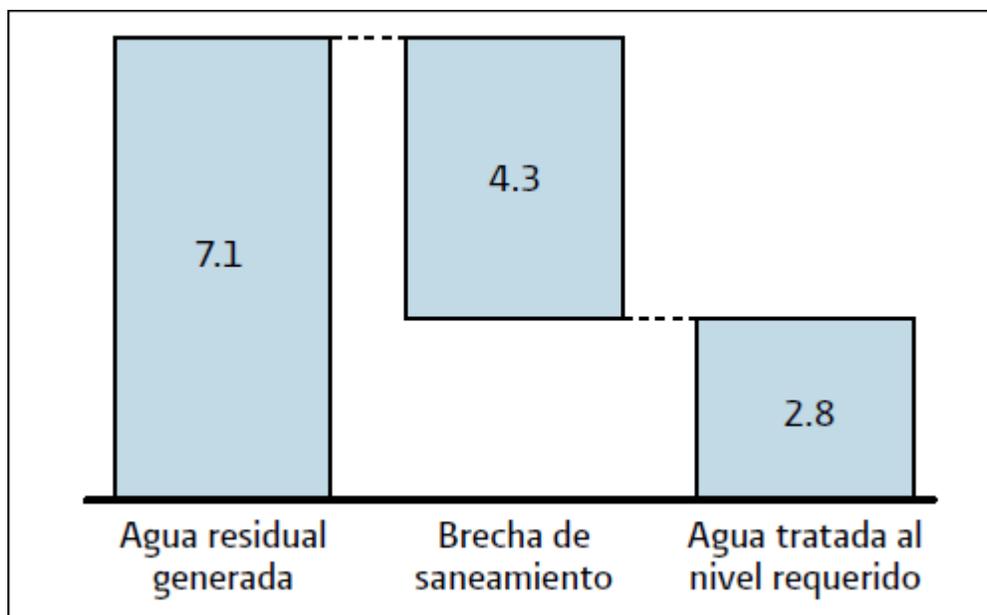


Figura 6. Brecha de tratamiento de origen municipal estimada al 2030 (miles de millones de metros cúbicos)¹⁹

Esta brecha de tratamiento estará integrada principalmente por insuficiencia de capacidad instalada sin operar, por falta de red de alcantarillado y agua residual tratada de manera eficiente.

Las cuencas con mayores retos en estos rubros son: Lerma, Valle de México, Tula, Balsas, Río Bravo, Bajo Papaloapan y Península de Yucatán.

Según la AA2030, para lograr el tratamiento a nivel de calidad conforme a las normas y condiciones particulares de descarga de todas las aguas residuales de origen municipal e industrial, se requieren inversiones del orden de 114 mil millones de pesos.

¹⁹ Agenda del Agua 2030, CONAGUA, SEMARNAT, 2011.

Capítulo 2

TECNOLOGÍAS PROBADAS A NIVEL MUNDIAL

“El agua es la fuerza motriz de toda naturaleza” (Leonardo Da Vinci).

Debido al aumento de la población mundial, el calentamiento global y la reducción en el suministro de agua, se estima que en los próximos quince años el mundo sufrirá una reducción del 35% en el abastecimiento de agua de consumo.

Actualmente el mundo se encuentra en el punto crucial en la búsqueda de soluciones eficientes para responder a la inminente escasez de agua. La carencia anticipada está transformando al agua en el “nuevo petróleo” del siglo XXI, y esto ocasiona el aceleramiento en el ritmo de desarrollo de nuevas tecnologías relacionadas con el agua.

El reúso y recirculación son operaciones que hacen parte de las estrategias de manejo del agua. Sin embargo es necesario realizar tratamientos a los efluentes.

Estos tratamientos deben ser adecuados para el propósito: Tener una alta eficiencia, bajos costos y adicionalmente traer ventajas ambientales. Por consiguiente es importante desarrollar técnicas innovadoras que entren a competir técnica, económica y ambientalmente con las tecnologías tradicionales.

En los países desarrollados se utilizan nuevos tratamientos de aguas residuales. Sin embargo un problema que plantea un desafío a las plantas de tratamiento de aguas residuales existentes es:

- La rápida urbanización y el crecimiento de la población en todo el mundo, a menudo causan un incremento imprevisto en el caudal de las aguas residuales, que se deben tratar por las instalaciones existentes.

En muchos casos, los sistemas de tratamiento existentes son incapaces de cumplir con estos retos o necesitan de la adición de otro proceso que requiera un mayor espacio que puede no estar disponible en la instalación existente.

Uno de los países que se ha preocupado por desarrollar nuevas y mejores tecnologías para el tratamiento de aguas es Israel, su tecnología en el sector del agua ha prosperado a pesar de la crisis financiera mundial, debido en gran parte a los paquetes de estímulos globales y la penetración en los países en desarrollo.

“El Agua es un bien extremadamentepreciado en Israel. El terreno allí proporciona el entorno perfecto para la investigación y desarrollo de tecnologías de agua en condiciones “reales” para su mercadeo y venta a nivel global”⁴ .

2.1 Biotecnología

La biotecnología se utiliza cada vez más como la tecnología ecológica más idónea para varios usos, en particular la descontaminación.

La biotecnología es, hoy en día, la tecnología por excelencia para el tratamiento de aguas residuales: el tratamiento biológico puede procesar distintos efluentes de manera más eficaz que con métodos químicos o físicos, y se adecua especialmente bien al tratamiento de aguas residuales contaminadas por los agentes orgánicos más comunes. Se han inventado procesos aerobios y anaerobios.

El tratamiento aerobio ha pasado a ser la tecnología más comúnmente utilizada para los desechos de baja y media contaminación, así como para las moléculas tóxicas más persistentes. Los procesos anaerobios se adaptan mejor a los desechos con gran proporción de materia orgánica, como los fangos urbanos, y en los últimos años han reemplazado a los sistemas aerobios en muchos usos. Las plantas de tratamiento anaerobio de aguas residuales son más pequeñas, fraccionan los compuestos

⁴Dr. Roger Radke. CEO de la División Tecnologías de Agua de Siemens, Junio de 2006/GES.

orgánicos y producen gas combustible (metano), y pueden lograr tasas de recuperación de agua de más del 80%.

2.2 Biopelículas en suspensión

La limitación de los espacios para instalar plantas de tratamiento de agua residuales, obliga a desarrollar nuevas tecnologías para incrementar la capacidad de los sistemas depuradores por unidad de área construida. Una alternativa son los sistemas que utilizan el crecimiento de biopelículas.

Las biopelículas han tomado importancia en el tratamiento de aguas residuales (Fig. 7) debido a que la concentración de la biomasa en ésta puede llegar a ser mayor que la concentración en un cultivo líquido.



Figura 7. Soportes de biomasa (Aqwise)

2.2.1 ¿Que son las biopelículas?

Las biopelículas son conglomerados de microorganismos donde predominan las bacterias heterótrofas impartiendo al conjunto de adhesión gracias a la producción de polímeros extracelulares, principalmente polisacáridos. Las bacterias se agrupan en colonias con el objeto de buscar protección ante posibles condiciones adversas del medio.

Los microorganismos formadores de biopelículas poseen algunas ventajas sobre los microorganismos suspendidos:

1. Mayor persistencia dentro del sistema
2. Mayores tasas de crecimiento
3. Mayor incremento en la actividad metabólica
4. Mayor resistencia a la toxicidad

Las biopelículas que se desarrollan sobre materiales porosos son más estables y resistentes.

2.2.2 AGAR (*attached Growth Airlift Reactor*)

La tecnología de tratamiento de aguas residuales basada en portadores de masa en suspensión, utiliza el principio de biopelícula en condiciones aerobias, conservando las ventajas de los sistemas de lodos activados sin estar restringido con sus desventajas. El portador de biomasa es el elemento clave del proceso, provee una extensa área protegida y las condiciones ideales para el vigoroso crecimiento de la biopelícula, la cual en cada portador protege el cultivo bacteriano, permitiendo sistemas de tratamiento robustos para el caso de aguas industriales con altas cargas y sometidos a fuertes fluctuaciones. Además, provee un “hogar” estable para el crecimiento bacteriano, de tal manera, que requiere menor área comparado con otros procesos biológicos y mucho menos sistemas de control. Sistemas existentes de lodos activados pueden ser fácilmente mejorados para incrementar su remoción de carga orgánica, nitrógeno y fósforo. El cultivo de bacterias digiere la carga orgánica

soluble, de manera gradual y se desplaza de los portadores formando flóculos que pueden ser fácilmente separados del agua mediante un sistema de clarificación.

El portador de biomasa patentado por Aqwise utiliza un diseño hidroneumático optimizado con una superficie externa abierta, que permite el paso del agua, oxígeno y nutrientes a la biopelícula localizada en el interior del portador. Los portadores tienen una superficie efectiva de $650 \text{ m}^2/\text{m}^3$ son fabricados de High Density Poly Ethylene (HDPE) lo que garantiza una vida útil de por lo menos 20 años.

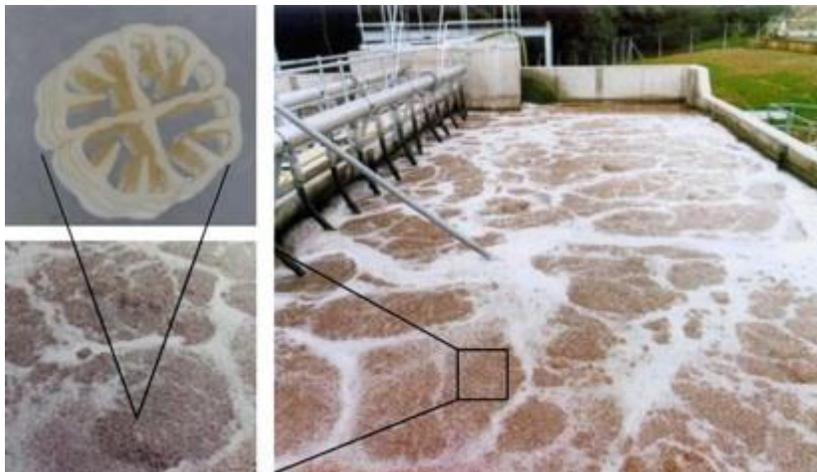


Figura 8. Soportes de Biomasa HDPE, Aqwise

El diseño patentado del sistema de aireación AGAR utiliza difusores de aire (Fig. 8), para crear un patrón de movimiento dentro del reactor, generando una colisión constante entre los portadores y mantiene una delgada biopelícula sobre el interior de los portadores. Así, el proceso AGAR (Attached Growth Airlift Reactor, por sus siglas en inglés), en el reactor es muy efectivo y no requiere programar rutinas de limpieza (a diferencia de otros procesos de película fija).

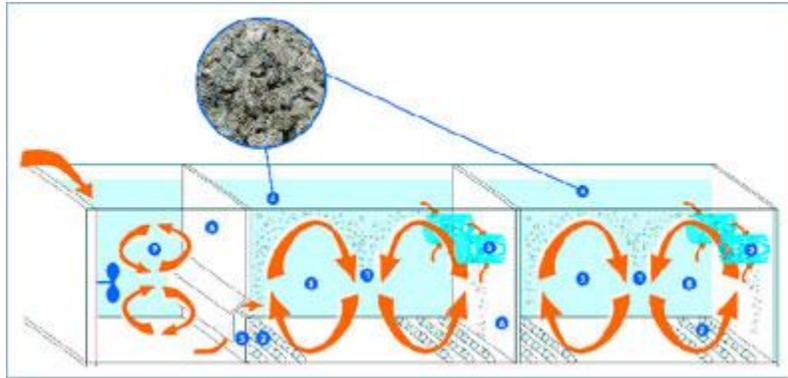


Figura 9. Sistema de aireación AGAR, patrón de movimiento²¹

Dado el diseño de patrón de movimiento, no se requiere aire adicional para mantener en suspensión los portadores (Fig.9), quiere decir, que la demanda de aire de la biomasa, es suficiente para el proceso biológico y para garantizar el movimiento de los portadores.

- **Configuraciones del proceso**

En la Fig. 10 y 11 se muestran las diferentes configuraciones dependiendo de las necesidades del cliente.

La figura 10 muestra el proceso de AGARA MBBR, en este proceso las aguas residuales se introduce en un sistema de una o múltiples etapas (el número de etapas se determina de acuerdo a la calidad del efluente requerida), cada uno de los cuales contiene el volumen adecuado de soportes o portadores de biomasa Aqwise.

Las aguas residuales entran en el reactor, y el efluente sale del mismo e ingresa a una unidad de separación de sólidos (como un clarificador, una unidad DAF , filtración de los medios de comunicación , etc.) En esta configuración, no hay lodos reciclar al tanque de aireación, y toda la actividad biológica toma lugar en la biopelícula que se forma sobre los portadores.

²¹ AqWise Water Technologies, 2006.



Figura 10. AGAR Moving Bed Bio Reactor (MBBR)²²

La figura 11 muestra un proceso de AGAR IFAS, este proceso básicamente consiste en introducir portadores de biomasa en el sistema de lodos activados, permitiendo así que los lodos activados puedan eliminar la mayor parte de DBO, al mismo tiempo que permite a la biopelícula desarrollar una población microbológica que oxida los compuestos de amonio.

Estos reactores se dividen en una serie de etapas de proceso (aeróbicas , anóxicas y anaerobias). Los portadores de biomasa se llenan en las fases aeróbicas. Los portadores son retenidos por mallas situadas en el extremo por donde sale el efluente de la etapa de proceso.

²² AqWise Water Technologies, 2006.

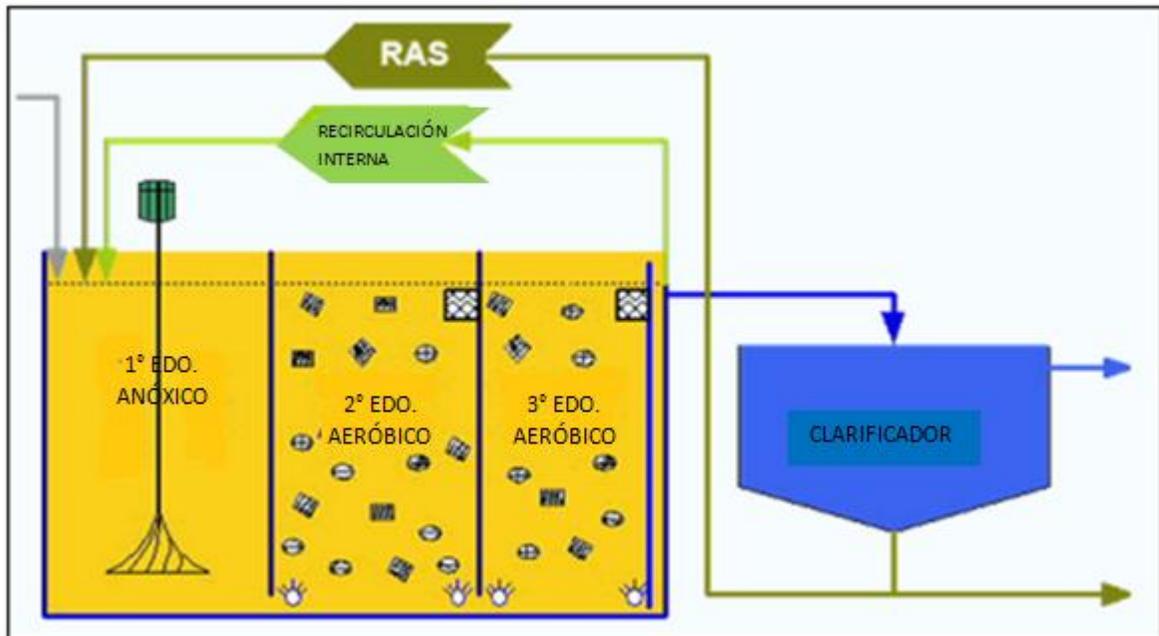


Figura 11. AGAR IFAS (Integrated Fixed film Activated Sludge)²³

- **Ventajas**

El sistema AGAR es uno de los mejores sistemas disponibles en la actualidad, con ventajas reales sobre otros sistemas de tratamiento biológico aerobio tales como lodos activados, que incluyen entre otras:

- Área mínima, tanto para instalaciones nuevas como ya existentes
 - ✓ Para el caso de aguas domésticas, el tiempo de retención es mucho menor a lodos activados: 2 horas contra mínimo 12 horas para el mismo trabajo de metabolización de carga orgánica
 - ✓ No se requiere ampliar los reactores para expandir la capacidad. En un proyecto las diferentes fases planeadas, trabajan con el mismo reactor, solo se adicionan portadores
- Bajo costo, requiere menos obra civil y menor tiempo de ejecución

²³ AqWise Water Technologies, 2006.

- ✓ Costos de capital y operación muy favorables (comparando plantas de equivalente calidad de instalaciones primarias, clarificación, nivel de automatización y especificación técnica de materiales y procesos)
 - ✓ Capacidad inmediata de crecimiento para sistemas existentes
 - ✓ Menor producción de lodos que sistemas equivalentes de tipo Lodos Activados, ya que para el mismo trabajo de metabolización de carga orgánica produce menos tejido celular nuevo (hasta un 50% inferior)
- Flexibilidad e innovación
 - ✓ Muy aplicable para mejora de plantas existente
 - ✓ Fácil expansión gradual
 - ✓ Permite hacer un planeamiento detallado, según la generación real haciendo la inversión Just-in-Time
 - ✓ Portadores con diseño Fully open-fully protected. Elimina la posibilidad de colmatación presente con otras marcas de portadores
 - ✓ Diseño patentado de Patrón de Movimiento
- Estabilidad y durabilidad
 - ✓ Resistencia al choque hidráulico
 - ✓ Rápida recuperación luego de cargas tóxicas.
 - ✓ Vida útil de portadores extendida.
 - ✓ Simplicidad, mantenimiento mínimo y simple de bajo costo, operación sencilla
- Amigable con el medio ambiente
 - ✓ Uso de materiales reciclados
 - ✓ Menos uso de suelo
 - ✓ Menos obstrucción visual
 - ✓ No produce olores ofensivos
 - ✓ Cumple con exigentes legislaciones de remoción de compuestos de Nitrógeno

2.3 Tecnología de membranas

Una membrana se puede considerar como una barrera o película que permite la transferencia de determinados componentes de un medio a otro a través de ella y evita o restringe el paso de otros componentes.

El flujo de estas sustancias a través de la membrana está determinado por la fuerza impulsora aplicada. Esta fuerza impulsora puede ser debida a gradientes de concentración, presión, temperatura o potencial eléctrico.

Tabla 11. Fuerzas impulsoras en los procesos de membranas

Proceso	Fuerza impulsora	Flujo principal a través de la membrana.
Ósmosis	Diferencia de concentración	Disolvente
Ósmosis inversa (OI) Nanofiltración (NF) Ultrafiltración (UF) Microfiltración (MF)	Diferencia de presión	Disolvente (permeado)
Díálisis	Diferencia de concentración	Sustancias disueltas
Electrodíálisis (ED)	Diferencia de potencial eléctrico	Sustancias iónicas
Permeación de gases	Diferencia de presión	Moléculas de gas

En la tabla 11 se muestran los diferentes procesos de membrana, clasificándolos según la fuerza impulsora de la separación e incluyendo las abreviaturas con las que suelen referir los procesos impulsados por la diferencia de presión.

Por otro lado, la permeabilidad selectiva viene determinada por la medida de la partícula, la afinidad química con el material de la membrana y/o la movilidad de los componentes a través de la membrana (movimiento difusivo o convectivo).

Con relación a tamaño de poro las membranas que emplean la diferencia de presión como fuerza impulsora pueden ser clasificadas como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Clasificación de las membranas²⁴

	Ósmosis inversa (OI)	Nanofiltración (NF)	Ultrafiltración (UF)	Microfiltración (MF)
Membrana	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica	Simétrica Asimétrica
Espesor de capa superficial	150 µm 1 µm	150 µm 1 µm	150-250 µm 1 µm	10-150 µm 1 µm
Tamaño del poro	0.002 µm	0.002 µm	0.05-0.2 µm	0.2-5 µm
Rechazos	HMWC ¹ LMWC ² Cloruro, Sodio, Glucosa, Aminoácidos, Proteínas	HMWC ¹ Mono, di y oligo- sacáridos, aniones polivalentes	Macromoléculas ³ , proteínas polisacáridos y virus	Partículas, bacterias
Material de membrana	⁴ CA capa delgada	CA capa delgada	Cerámica, ⁵ PSO, CA capa delgada, ⁶ PVDF	Cerámica, ⁷ PP, PSO, PVDF
Módulo de membrana	Tubular, enrolladas en espiral y planas	Tubular, enrolladas en espiral y planas	Tubular, enrolladas en espiral, fibra hueca y planas	Tubular, fibra hueca y planas
Presión de trabajo	15-150 bar	5-35 bar	1-10 bar	2 bar

¹HMWC (compuestos de alto peso molecular): 100,000 a 1 millones de moles/g.

²LMWC (compuestos de bajo peso molecular): 1,000 a 100,000 moles/g.

³Macromoléculas: 1 millón de moles/g.

⁴CA-acetato de celulosa; ⁵PSO-polisulfona; ⁶PVDF-polivinil difluoruro; ⁷PP-polopropileno.

²⁴ Poyatos, J. 2007.

Las membranas que se utilizan en los MBR son de ultrafiltración y microfiltración, que en cuanto a su composición, cumplen los siguientes requisitos:

- Inertes
- Fáciles de limpiar y deben ser resistentes a los agentes químicos y a las presiones y temperaturas elevadas
- Tener una distribución de poros uniforme y elevada porosidad
- Neutras o presentar una carga negativa para evitar la adsorción de microorganismos
- Duraderas y fáciles de sustituir

2.3.1 Tipos de materiales de las membranas

Principalmente existen dos tipos de materiales que suelen utilizarse en el tratamiento de aguas residuales, las membranas cerámicas y las poliméricas. Las membranas cerámicas suelen tener mayor estabilidad química, mecánica y térmica que las membranas poliméricas, sin embargo son muy frágiles, por lo que la mayoría de las empresas que comercializan membranas destinadas a tratamiento de aguas residuales utilizan membranas poliméricas.

Las membranas poliméricas de uso común en los biorreactores de membrana son las de polifluoruro de vinilideno (PVDF), polietersulfonas (PES), polietileno (PE) y polipropileno (PP). Estas membranas normalmente son hidrofílicas para evitar un ensuciamiento rápido de la membrana, aunque algunos de los materiales de fabricación son hidrofóbos, como pueden ser el PVDF y el PP, a los cuales se les aplica un tratamiento químico especial en su manufactura para garantizar que la superficie de la membrana sea hidrofílica.

2.3.2 Configuración de las membranas

La configuración de la membrana se refiere a su geometría y la manera en que esta es orientada en relación con el flujo de agua. El módulo de membrana define como se agrupan las membranas y permite conocer el comportamiento del fluido sobre la superficie de esta.

La membrana deberá ser configurada para tener:

- Un área grande de membrana
- Un alto grado de turbulencia para la promoción de transferencia de masa sobre el lado del efluente
- Un gasto de energía bajo por volumen de agua producido
- Un precio bajo por membrana en relación al área
- Un diseño que facilite la limpieza
- Un diseño que permita la modulación

Actualmente existen seis configuraciones principales en los procesos de membrana existiendo diferencias prácticas con beneficios y limitaciones distintas. Las configuraciones listadas a continuación están basadas en geometrías plana y cilíndrica.

- Placa plana (Fig. 12)
- Fibra hueca
- Multitubular
- Tubo capilar
- Filtro de pliegues
- Espiral (Fig.13)

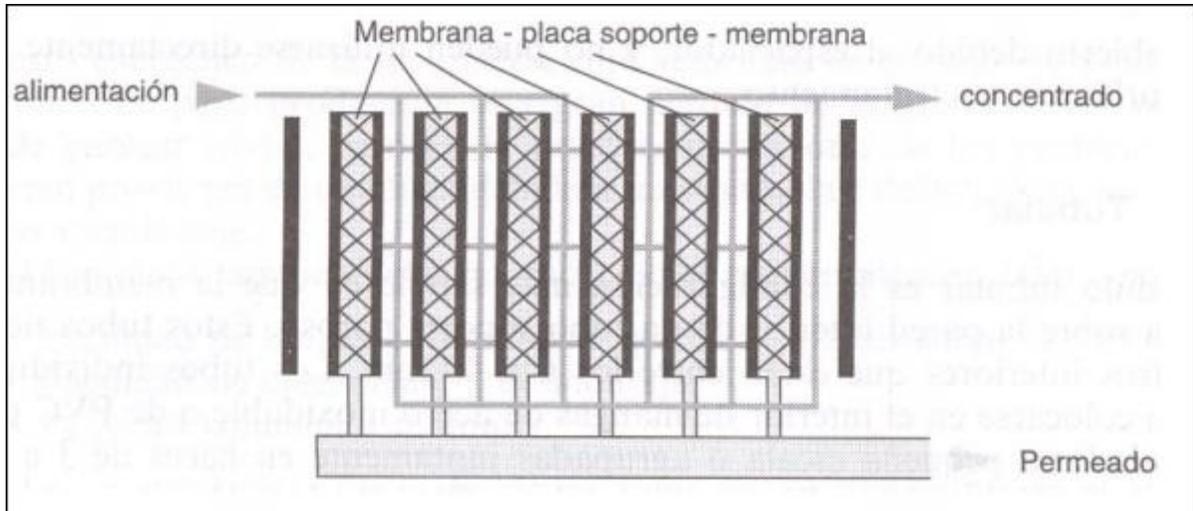


Figura 12. Esquema de configuración de membrana de placa plana²⁵

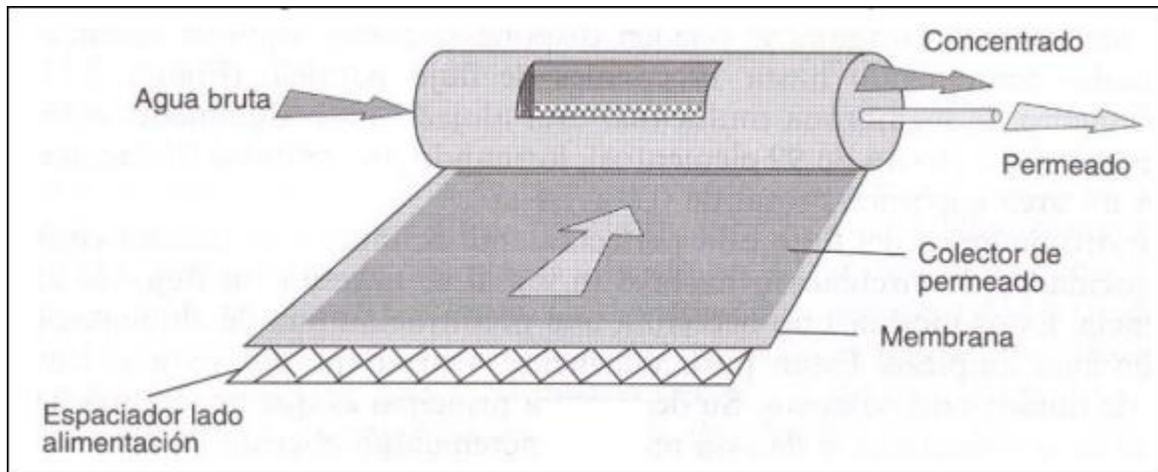


Figura 13. Sistema de membrana en espiral²⁶

Los tipos de membranas más empleadas en los MBR son las de fibra hueca y placa plana (como se muestra en la Fig. 14 (a) y (b)) Aunque su geometría, hidrodinámica, configuraciones espaciales y propiedades mecánicas son distintas, los rendimientos obtenidos en estudios comparativos no presentan diferencias significativas entre ambas membranas en términos de eficiencias obtenidas.

²⁵ Poyatos, J. 2007

²⁶ Poyatos, J. 2007

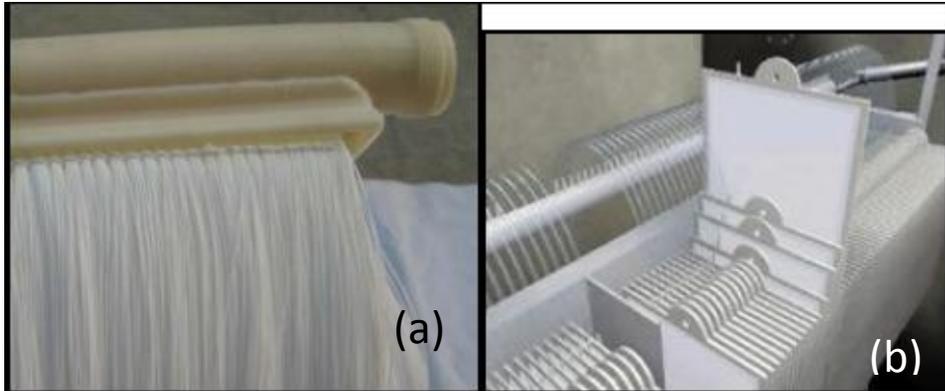


Figura 14. Principales configuraciones para MBR. Membranas de fibra hueca (a) ó placa plana (b)

2.3.3 *Ensuciamiento de membranas*

Las tecnologías de membranas han sido una de las tecnologías más comunes para el tratamiento de aguas en las últimas décadas. Se trata de un sistema de gran rendimiento, pero que presenta un problema común que es el ensuciamiento.

El ensuciamiento de la membrana es un problema que ocurre debido a la presencia en la alimentación de sustancias que interactúan con ella precipitándose en su superficie o penetrando en su interior y siendo absorbidas en sus paredes, reduciendo de esta manera el diámetro de paso de ellas mismas y el agua a través de la membrana.

Entre las consecuencias que presenta el ensuciamiento en las membranas se encuentra una disminución del flujo de permeado debido al aumento de la resistencia de la membrana para permitirlo. Al aumentar progresivamente la diferencia de PTM con el fin de mantener el flujo de permeado puede acelerar el proceso de ensuciamiento e incluso llevarlo a una situación de taponamiento irreversible y estropear la membrana.

Según el caso de ensuciamiento así será el método aplicado para realizar la limpieza, ya sea con un retrolavado (cambio de dirección del flujo) o cuando el ensuciamiento sea en el interior de la membrana se deberá realizar un lavado químico.

Existen varias formas con las cuales se podría retrasar el problema del ensuciamiento, como optimizar la diferencia de presión de trabajo para retrasar el taponamiento de los poros, operando a presiones menores que las de flujo de permeado máximo pero con una presión suficiente para que la relación flujo de permeado-tiempo de utilización de la membrana sea ventajosa; mejorar el PH de trabajo; determinar el tipo de pretratamiento a hacer para tener un mejor control en el ensuciamiento.

Otra manera de prevenir el ensuciamiento es haciendo una buena elección de la configuración de membrana a utilizar, ya que se ha comprobado que las membranas del tipo fibras huecas, de pequeño diámetro, dispuestas con orientación vertical y baja densidad de empaquetamiento tienen un mejor comportamiento al ensuciamiento, que las membranas con mayor porosidad y mayor diámetro de poro se produce antes la reducción en el flujo de permeado.

Existen varios tipos de ensuciamiento, los cuales pueden ser agrupados en tres categorías principales: Inorgánico, orgánico y bioensuciamiento.

Como ya se dijo anteriormente las biopelículas son importantes en la degradación de la materia orgánica para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo tienen un efecto negativo en los biorreactores de membrana utilizados para tratar el agua residual industrial y doméstica. La adhesión de los microorganismos a las membranas es un fenómeno denominado como bioensuciamiento, que provoca una pérdida en la eficiencia de filtración de las mismas. Por lo cual, es esencial realizar una selección adecuada de membranas a utilizar, que sean menos susceptibles a este problema (por medio de técnicas sencillas y rápidas que permitan la caracterización de biopelículas sobre dichas membranas).

Las membranas han sido utilizadas básicamente asociadas con reactores de tipo aerobio; los sistemas anaerobios, al ser poco utilizados en los países desarrollados para el tratamiento de efluentes municipales, han sido poco considerados para acoplarlos con membranas.



Figura 15. Sistema MBR de Sydney Water Corporation. Planta de agua de reciclaje al norte de Nueva Gales del Sur, Australia. Siemens.

La tecnología de biorreactores de membrana (o MBR *por sus siglas en inglés, Membrane Bioreactors*) (Fig. 15) combina el proceso físico de separación con el tratamiento biológico (combinan un reactor biológico con la remoción de sólidos por medio de filtración). Estos sistemas utilizan membranas de micro y/o ultrafiltración que permiten la retención de sólidos coloidales y suspendidos además de que ha demostrado su utilidad en la remoción de microorganismos patógenos, huevos de helminto y de algunas macromoléculas solubles²⁷. El sistema de filtración de membrana en efecto puede reemplazar el clarificador secundario y filtros de arena en un sistema de tratamiento de lodos activados típico. La filtración por membrana permite una mantener una mayor concentración de biomasa, permitiendo de ese modo utilizar biorreactores más pequeños.

En los últimos 10 años se ha incrementado el interés por el uso de reactores con membranas en proyectos de tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas e industriales que incluyen irrigación agrícola, procedimientos industriales

²⁷Barker y Stuckley, 1999

con agua de enfriamiento, agua de parques de recreación y para protección contra incendios²⁸.

2.4.1 Ventajas

Los biorreactores de membrana tienen el potencial para subsanar las limitaciones que presentan los reactores biológicos convencionales en el tratamiento y reutilización de aguas residuales domésticas ya que:

- Permiten tiempos largos de residencia de sólidos
- Poseen una alta capacidad para remover microorganismos patógenos
- Permiten separar a la biomasa del licor mezclado, sin intervención de la gravedad
- Se obtiene un efluente sin sólidos en suspensión
- Las moléculas solubles de alto peso molecular son retenidas en la membrana

Las ventajas de los sistemas BRM sobre los sistemas biológicos convencionales incluyen:

- Una mejor calidad de efluente
- Un espacio requerido más pequeñas
- y la facilidad de automatización

Específicamente, un MBR funcionan a altas velocidades de carga volumétrica que dan lugar a tiempos de retención hidráulicos inferiores. Los tiempos de retención bajos significan que se requiere menos espacio en comparación con un sistema convencional. Los MBR a menudo han sido operados con tiempos de residencia de sólidos más largos (SRT, por sus siglas en inglés *solids residence times*), lo que resulta en una baja producción de lodos, pero esto no es un requisito.

²⁸ Ogashi, 2001.

El efluente del MBR contiene bajas concentraciones de bacterias, sólidos suspendidos totales (SST), la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y fósforo. Esto facilita la desinfección de alto nivel. Actualmente cumplir con la normatividad ambiental puede requerir de la adopción de tecnologías complementarias de alto costo por lo que en muchos casos se hace factible la adopción de un sistema de membranas ya que los efluentes se descargan fácilmente a las corrientes superficiales o pueden ser reutilizados, como irrigación.

2.4.2 Desventajas

Entre las limitaciones más importantes asociadas con esta tecnología se encuentran:

- Los altos costos de inversión y operación en comparación con los sistemas convencionales para el mismo rendimiento
- El problema de taponamiento que sufren las membranas durante su operación. Los costos de operación y mantenimiento incluyen la limpieza de la membrana, el control de incrustaciones y la eventual sustitución de la membrana
- Los costos de energía son más altos debido a que se requiere de la limpieza con aire para controlar el crecimiento bacteriano en las membranas
- Los lodos residuales de dicho sistema podrían tener una baja tasa de sedimentación, lo que resulta en la necesidad de agregar productos químicos para producir biosólidos aceptables para su disposición²⁹ han demostrado que los lodos residuales de BRM se pueden procesar usando tecnologías estándar que se utilizan para los procesos de lodos activados

A pesar de ello, la tendencia actual en el mercado de membranas es aumentar la producción y por lo tanto abatir el costo en virtud de la creciente aceptación de estas tecnologías alrededor del mundo³⁰.

²⁹ Hermanowicz, 2006.

³⁰ Adham et al, 2001.

2.4.3 Características de diseño

- **Pretratamiento**

Para reducir las posibilidades de daño a la membrana, el agua residual debe someterse a un alto nivel de remoción de escombros antes de entrar al RBM. El tratamiento primario se proporciona a menudo en instalaciones de mayor tamaño, aunque no en la mayoría se lleva a cabo en instalaciones de pequeño o mediano tamaño, y no es un requisito. Además, todos los sistemas de BRM requieren de 1 a 3 mm de mallas finas de corte inmediatamente antes de las membranas (dependiendo del fabricante del reactor). Estas mallas requieren limpieza frecuente.

Algunas alternativas para la reducción de la cantidad de material que llega a las mallas incluyen el uso de dos etapas de cribado y la localización de las mallas después de la sedimentación primaria.

- **Ubicación de la membrana**

Los sistemas de MBR están configurados con las membranas inmersas en el reactor biológico (Fig. 16) o como alternativa, se colocan en un tanque separado a través del cual se hace circular la mezcla líquida del reactor biológico.

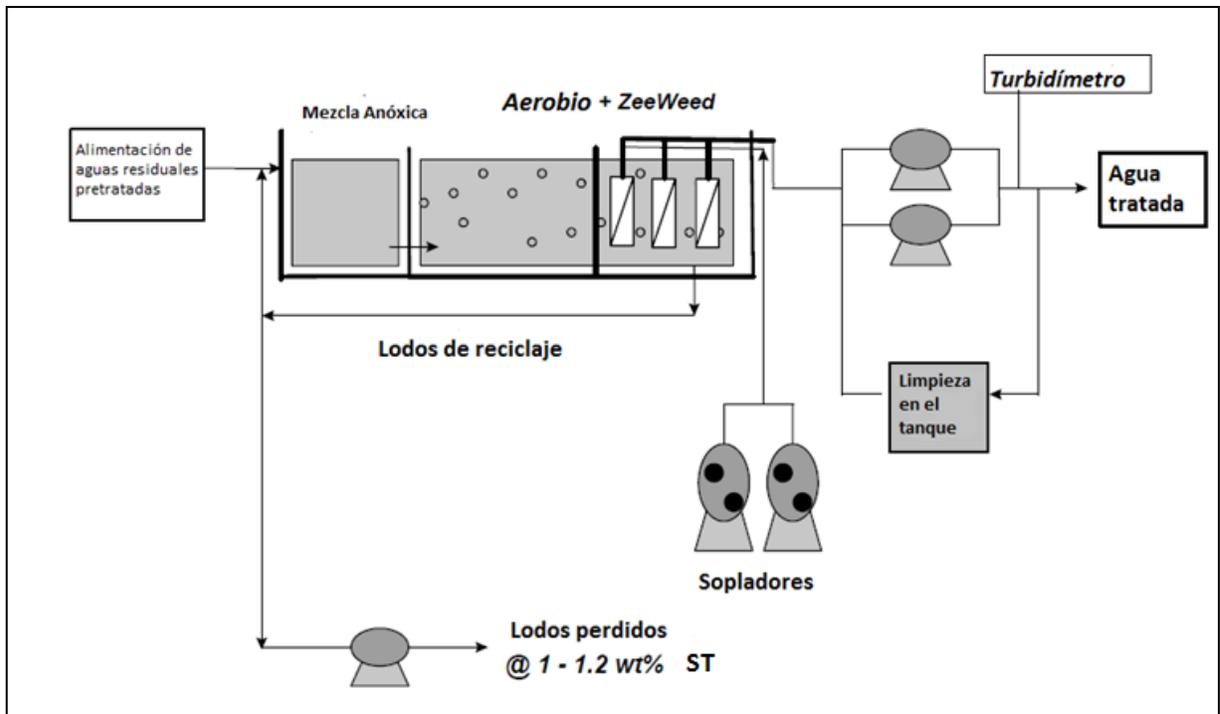


Figura 16. Configuración del sistema de membrana sumergida³¹

- **Operación del sistema**

Todos los sistemas de BRM requieren algún grado de bombeo para forzar el agua que fluye a través de la membrana. Mientras que otros sistemas de membrana utilizan un sistema a presión para empujar el agua a través de las membranas, los principales sistemas utilizados en BRM establecen un vacío a través de las membranas de modo que el agua en el exterior se encuentra a presión ambiente. La ventaja de utilizar vacío es que es más amigable para las membranas; por otro lado la ventaja de la presión es que el rendimiento puede ser controlado. Todos los sistemas también incluyen técnicas para la limpieza continua del sistema para conservar la vida de la membrana y mantener el sistema operativo el mayor tiempo posible.

³¹ GE / Zenon, 2002.

Los sistemas de membrana principales utilizados en BMR utilizan una técnica de limpieza con aire para reducir la acumulación de material en las membranas. Esto se realiza mediante la aplicación de aire alrededor de las membranas de los colectores.

2.4.4 Costos

- **Costos de Capital**

Los costos de capital para los sistemas MBR históricamente tienden a ser más altos que los de los sistemas convencionales con rendimiento comparable debido a los costos iniciales de las membranas. En ciertas situaciones, sin embargo, incluyendo modernizaciones, los sistemas de BRM pueden tener costos de capital menores o competitivos en comparación con otras alternativas porque los BRM tienen requerimientos de terreno más bajos y el uso de tanques más pequeños, lo que puede reducir los costos para el concreto. Filtro / Siemen 's US Memcor plantas paquete se han instalado con un costo de \$ 7 - \$ 20/galón de agua tratada.

Debido a un límite de la demanda de oxígeno químico, adsorción con carbón activado se incluye con el sistema MBR. Se encontró que el costo de capital para MBR además de carbón activado granular en \$ 12/galón de agua tratada estaba en el mismo orden de magnitud que los procesos alternativos, incluyendo la adición de múltiples puntos de alumbre, tratamiento de alta cal, y de filtración de membrana post-secundaria.

- **Costos de operación**

Los costos operativos de los sistemas BRM suelen ser más altos que los de otros sistemas convencionales comparables. Esto es debido a que los costos de energía son más altos si la limpieza con aire se utiliza para reducir el ensuciamiento de la membrana. La cantidad de aire necesario para la limpieza ha sido reportada como el doble de lo necesario para mantener la aireación en un sistema convencional de

lodos activados³². Estos costos de operación altos son frecuentemente compensados (parcialmente) por los bajos costos de disposición de lodos, asociados con el funcionamiento de los tiempos de residencia de lodo más largos, y con el engrosamiento / deshidratación de la membrana de lodos perdido.

Se estima que los costos de operación de un sistema MBR incluyendo la adsorción con carbón activado es de \$ 1.77 por cada 1,000 galones tratados. Estos costos eran del mismo orden de magnitud que los de los procesos alternativos, y se compararon favorablemente con los de los procesos que son químicamente intensivos, tales como el tratamiento con cal³³.

2.5 Humedales artificiales

Se define como humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS, pos sus siglas en ingles *free wáter surface wetland*) aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. La mayoría de los humedales naturales son FLS.

La observación de la mejora en la calidad del agua en humedales naturales llevó al desarrollo de humedales artificiales para tratar de reproducir en ecosistemas construidos los beneficios de calidad de agua y hábitat. En los humedales FLS el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga.

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 inoportunidades para la recreación pública. El tamaño de los sistemas de humedales FLS va de pequeñas unidades de tratamiento en el sitio de efluentes de tanques sépticos hasta grandes unidades de más de 16,888 hectáreas.

³² Scott Blair, 2006.

³³ Fleischer, 2005.

Los humedales FLS consisten normalmente de una o más cuencas o canales de poca profundidad que tienen un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación al agua freática susceptible a contaminación, y una capa sumergida de suelo para las raíces de la vegetación macrófita emergente seleccionada. Cada sistema cuenta con estructuras adecuadas de entrada y descarga para asegurar una distribución uniforme del agua residual aplicada y su recolección. La vegetación emergente más comúnmente utilizada en humedales FLS incluyen las espadañas y aneas (*Typha* spp.), los juncos (*Scirpus* spp.) y los carrizos (*Phragmites* spp.).

2.5.1 Ventajas

- Proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores adiestrados
- Pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento
- La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos. La operación a nivel de tratamiento terciario avanzado es posible durante todo el año en climas cálidos o semicálidos
- Los sistemas de humedales proporcionan adición a los “espacios verdes”, incluyen la incorporación de hábitat de vida silvestre y oportunidad para la recreación pública
- No producen biosólidos ni lodos residuales que requerirán tratamiento subsiguiente y disposición
- La remoción de DBO, SST, DQO, metales y compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas puede ser muy efectiva con un tiempo razonable de retención. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos

niveles puede ser también efectiva con un tiempo de retención significativamente mayor.³⁴

2.5.2 Desventajas

- Necesitan espacios grandes para su construcción, especialmente si se requiere la remoción de nitrógeno o fósforo
- La remoción de DQO, DBO y nitrógeno en los humedales son procesos biológicos y son esencialmente continuos y renovables. El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo
- En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO y de las reacciones biológicas responsables por la nitrificación y desnitrificación. Un aumento en el tiempo de retención puede compensar por la reducción en esas tasas pero el incremento en el tamaño de los humedales en estos climas puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico
- La mayoría del agua contenida en los humedales FLS es esencialmente anóxica, limitando el potencial de nitrificación rápida del amoníaco
- Los mosquitos y otros insectos vectores de enfermedades pueden ser un problema
- Pueden remover coliformes fecales del agua residual municipal, al menos en un orden de magnitud. Esto no siempre es suficiente para cumplir con los límites de descarga en todas las localidades, por lo cual podría requerirse desinfección subsiguiente. Esta situación puede complicarse más debido a que las aves silvestres producen coliformes fecales

³⁴ EPA, 2000.

2.5.3 Costos

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 costos 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 ganancias del contratista. El recubrimiento puede ser el elemento más costoso. Por ejemplo, una membrana lineal se podría acercar a un 40% de los costos de construcción. En muchos de los casos la compactación de los suelos nativos “in-situ” proveen una barrera suficiente para la contaminación subterránea.

Tabla 13. Costo de inversión y de O/M para Humedal FLS con una capacidad de 100,000 galones por día³⁵

Elemento	costo, \$*	
	Recubrimiento de suelo natural	Recubrimiento de membrana plástica
Costo del terreno	\$16,000	\$16,000
Evaluación del sitio	3600	3600
Limpieza del sitio	6600	6600
Movimiento de tierra	33000	33000
Recubrimiento	0	66000
Suelo para siembra	10600	10600
Plantas	5000	5000
Sembrado	6600	6600
Estructura de entrada y descarga	16600	16600
Subtotal	\$98,000	\$164,000
Costos de Ingeniería, legales, etc.	\$53,800	\$95,100
Costo total de inversión	\$154,800	\$259,100
Costos de O/M, \$/año	\$6,000	\$6,000

*El factor del valor presente es de 10.594 con base en n periodo de 20 años y 7 por ciento de interés

³⁵ EPA, 2000.

La tabla 13 presenta los costos para la construcción de un humedal FLS hipotético de 378,500 L/d (100,000 galones/d) para lograr una concentración de 2 mg/L de amoníaco en el efluente. Otros supuestos de cálculo son los siguientes: NH_3 afluente = 25 mg/L; temperatura del agua 20°C; profundidad del agua = 0.46 m; porosidad = 0.75; área de tratamiento = 1.3 hectáreas; y costo del terreno = \$12,355/hectárea.

2.5.4 Humedales artificiales en México

Hasta el 2009 la CONAGUA reporta que el número (total nacional) de PTAR que usan como proceso de tratamiento los Humedales artificiales o wetlands son 160.

Como ejemplos de humedales artificiales en México podemos mencionar los ubicados en la planta de la colonia XIII Ayuntamiento, en Tecate BC (Fig. 17). El objetivo principal de dichos humedales es la restauración del Río Tecate, permitiendo que se conviertan en zonas de recarga de mantos acuíferos, filtren el agua y mejoren la calidad su calidad.

También destaca La PTAR "Las Arenitas" en Mexicali, BC. (Fig. 18), fue diseñada para descargar aguas residuales tratadas a un dren agrícola, que fluye hacia el sur hasta el Río Hardy y, finalmente, hasta el Delta del Río Colorado en Golfo de California. El efluente de la PTAR frecuentemente excedía los límites permisibles, lo cual afectaba negativamente la calidad del agua del río y las industrias pesquera y turística de la zona. En respuesta, el Sonoran Institute, con la asistencia del proveedor de servicios de agua del Estado de Baja California, (CESPM) y el programa Frontera 2012, diseñó una serie de humedales artificiales con el propósito de mejorar la calidad del efluente.



Figura 17. Humedal en Tecate, BC.

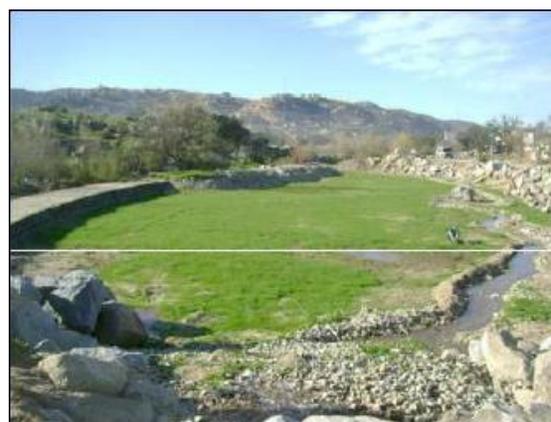


Figura 18. Humedal en Mexicali, BC.

- **Humedal artificial en San Juan de Aragón**

Un ejemplo en nuestro país de estos es el humedal artificial que diseñó la Facultad de Química (FQ) de la UNAM, para el mejoramiento de la calidad del agua del Lago de San Juan de Aragón, que permitirá producir diariamente más de 2 mil 500 metros cúbicos de agua de alta calidad, y cuenta con una superficie de 8 mil 130 metros cuadrados.

Esta obra permitirá preservar y recuperar la permanencia de las diversas especies propias de la flora y fauna de la región.

Este humedal tiene la finalidad de mejorar la calidad del agua del lago de manera natural, mediante el filtrado y tratamiento biológico a través de vegetación acuática, superficial y sumergida del agua, que proviene de la planta de Tlacos, del Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

Este proyecto consta de un sistema de conducción de agua, un tanque sedimentador, un humedal terrestre y uno acuático que permite proveer una calidad de agua propia para el contacto humano y además representa un hábitat adecuado para la fauna.

El costo de este sistema de tratamiento de agua fue alrededor de 13 millones de pesos.

Las ventajas de este humedal sobre otras tecnologías de tratamiento son: que es económico; estético; reservorio de flora y fauna de la zona; no genera lodo, ruido ni malos olores; no requiere de un alto consumo de energía eléctrica y su tiempo de vida útil es largo.

Además el sistema es compatible con el entorno ya que emplea sistemas de bases de filtros de plantas y microorganismos que eliminan los contaminantes por medio de procesos naturales, los cuales logran depurar el agua hasta alcanzar el nivel de calidad requerido para actividades recreativas.

La propuesta del humedal artificial fue planteada por Víctor Manuel Luna Pabello (adscrito al Laboratorio de Microbiología Experimental del Departamento de Biología de la FQ y coordinador general de este proyecto), quien cuenta con gran experiencia en el diseño, construcción y operación de humedales artificiales (también desarrollo un sistema similar en Los canales de Cuemanco).

2.6 Electroquímica

La electroquímica es una ciencia que nace a finales del siglo XVIII con los trabajos de Galvani y Volta, y ha tenido desarrollo y aplicaciones en múltiples áreas. Podemos mencionar su uso en el arranque de los motores de los automóviles, en procesos de síntesis química y métodos para eliminación de la contaminación.

La electrocoagulación ha sido una tecnología emergente desde 1906, con la primera patente concedida en Estados Unidos. Problemas de tipo financiero o de regulación de incentivos generaron tropiezo para que la industria adoptara esta técnica.

En 1893; Wolff electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y sosa cáustica, que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster, NY.

En 1896 se usó en Louisville , Kenucky, una modificación del proceso de Webster para coagular agua cenagosa de río Ohio, proceso en el que se utilizaron ánodos de hierro y aluminio. En 1908 el proceso de Webster se utilizó en Santa Mónica, con reducciones de 40% de materia orgánica.

En 1914 se utilizó en New York una modificación del proceso de WEBster llamado Landreth. En este se añade cal para mejorar la conductividad del electrolito. En 1932 fue utilizada la electrocoagulación en Alemania, con eficiencias del 50% en reducción de DBO de aguas residuales. La falla de estos procesos se dio por el alto costo de energía y la necesidad de recambiar los electrodos.

En 1947, en la URSS, se utilizó el proceso con electrodos de hierro para formar hidróxido ferroso, obteniendo remociones del 70% al 80% para la DBO. Unos años más tarde, en 1958, el profesor Mendía, de la Universidad de Nápoles, utilizó esta técnica para desinfectar las aguas negras de ciudades costeras. En este proceso se mezcló 25% al 30% en volumen de agua de mar antes de la electrólisis.

Durante las dos últimas décadas se han reportado trabajos en donde se utiliza el proceso para remover partículas dispersas de aceite, grasa y petróleo en el tratamiento de aguas residuales provenientes de procesos de electroplateado, textiles y en procesos de potabilización del agua misma, entre otros.

2.6.1 Electrocoagulación

La electrocoagulación es una tecnología limpia emergente que se conoce desde principios del siglo XX y ha sido aplicada en el tratamiento de diversas aguas residuales. Pese a ello, esta tecnología no se ha desarrollado ampliamente y aun falta mucho por investigar sobre sus procesos y mecanismos.

Esta técnica ha logrado alcanzar un aprovechamiento comercial importante en el tratamiento puntual de algunos contaminantes, ubicándose como una técnica con mayores ventajas comparativas con respecto a las tecnologías tradicionales de

tratamiento. Por esta razón en los últimos años ha cobrado interés científico, pues necesita entender a fondo el proceso y sus mecanismos.

La electrocoagulación es una técnica utilizada para el tratamiento de las aguas residuales. Los contaminantes de muy diversos efluentes son removidos aplicando el principio de coagulación, pero en este caso no se hace uso de un coagulante químico (dicha función es llevada a cabo por corriente eléctrica que es aplicada al medio líquido contaminado). Por lo anterior podemos definir la electrocoagulación como un proceso en el cual son desestabilizadas las partículas de contaminantes que se encuentran suspendidas, emulsionadas o disueltas en un medio acuoso, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados (Fig. 19).

La corriente eléctrica proporciona la fuerza electromotriz que provoca una serie de reacciones químicas, cuyo resultado final es la estabilidad de las moléculas contaminantes. Por lo general este estado estable produce partículas sólidas menos coloidales y menos emulsionadas o solubles. Cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario. Los iones metálicos se liberan y dispersan en el medio líquido y tienden a formar óxidos metálicos que atraen eléctricamente a los contaminantes que han sido desestabilizados.

Se ha aplicado la electrocoagulación para la remoción de diversas aguas residuales.

En muchos casos se hace una combinación de esta técnica con flotación promovida también por electrólisis (electroflotación), cuya finalidad es aumentar la eficiencia de remoción del contaminante. Esto se realiza en un proceso en la misma celda, o en celdas consecutivas.

Ha sido probada en el tratamiento de aguas residuales de uso doméstico cuyos contaminantes son materia orgánica, como DBO.

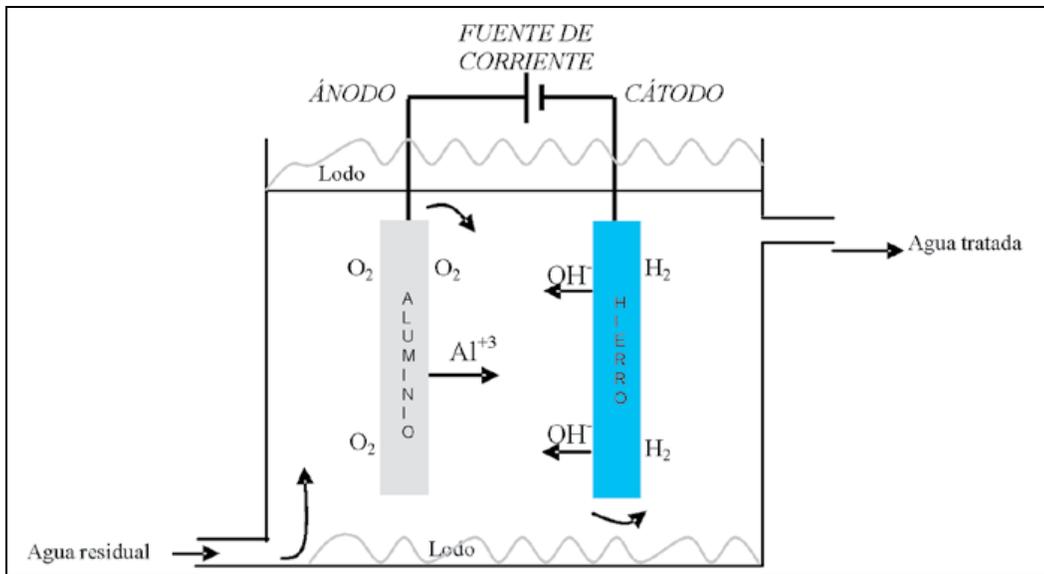


Figura 19. Sistema de electrocoagulación con ánodo de aluminio y cátodo de hierro³⁶.

- **Ventajas**

Algunas de las ventajas de la electrocoagulación son:

- ✓ Los costos de operación son menores comparativamente con los de procesos convencionales usando polímeros
- ✓ Requiere de equipos simples y de fácil operación
- ✓ Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos
- ✓ Genera lodos más compactos y en menor cantidad, lo que involucra menor problemática de disposición de lodos
- ✓ Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada
- ✓ Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes
- ✓ Purifica el agua y permite su reciclaje
- ✓ El paso de la corriente eléctrica favorece el movimiento de las partículas de contaminante más pequeñas, incrementando la coagulación
- ✓ Reduce la contaminación en los cuerpos de agua

³⁶ Restrepo, Arango, 2006.

- ✓ El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados
- ✓ Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras
- ✓ Los contaminantes son arrastrados por las burbujas a la superficie del agua tratada, donde pueden ser removidos con mayor facilidad

- **Desventajas**

Las principales desventajas son:

- ✓ Es necesario reponer los electrodos de sacrificio
- ✓ Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo de sacrificio utilizado
- ✓ Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía sea alto
- ✓ El óxido formado en el ánodo puede, en muchos casos, formar una capa que impide el paso de la corriente eléctrica, disminuyendo de esta forma la eficiencia del proceso

El proceso de electrocoagulación permite la remoción de una alta cantidad de contaminante en una sola operación, situación que convierte a esta tecnología en una opción económica y ambiental para el tratamiento de las aguas residuales de muchas industrias. El capital y los costos de operación son mucho menores comparativamente con un tratamiento por coagulación química, incluso se puede llegar a recuperar los costos de capital en menos de un año. Estos costos dependen del caudal a tratar, de la naturaleza del agua residual, de los contaminantes a ser removidos y de la región o localidad en la que se desea realizar el tratamiento.

- **Costos**

Se ha estimado que los costos de operación para tratar por electrocoagulación 1'500.000 GPA (5 GPM) de agua residual con contenidos de SST, grasas y aceites, y algunos metales como níquel y zinc, es de US\$ 1.500, mientras que los costos para tratar la misma agua residual por medio de coagulación química es del orden de US\$ 45.000, para un ahorro anual del orden de US\$ 43.500 cuando se aplica electrocoagulación en lugar de coagulación química. Estos costos no incluyen transporte y disposición de lodos ni mano de obra.

Capítulo 3

PROCESOS DE TRATAMIENTO UTILIZADOS EN LA ACTUALIDAD Y PROPUESTA DE MEJORAS APLICANDO LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS

3.1 Introducción

“El agua es fundamental para la vida y la salud. El derecho del ser humano al agua es indispensable para llevar una vida sana con dignidad humana. Se trata de un requisito previo a la realización de todos los demás derechos humanos”. (Comité de las Naciones Unidas de derechos económicos y sociales).

En la antigüedad, la disposición del agua era efectuada sobre el suelo y el manejo de las excretas era en forma de basura, como residuos sólidos. La invención del excusado, en el siglo XIX, cambio drásticamente esta situación y originó que el agua residual se transportara en forma conjunta con el agua pluvial. Era común el empleo combinado de los drenajes que transportaban en forma directa agua sucia y agua de lluvia a los cuerpos de agua, creando problemas de contaminación y de salud.

La depuración de estas aguas se inicio a finales del siglo XIX con bases empíricas y ya en 1930 se inicia un desarrollo metódico. Actualmente, la necesidad de reúso es la que motiva los mayores avances científicos y tecnológicos.

Un sistema de depuración se compone de la combinación de procesos y operaciones unitarias que tienen por objeto reducir determinados compuestos hasta un nivel predeterminado. Las operaciones son sistemas en donde intervienen fuerzas físicas o de separación, en tanto que los procesos involucran cambios de estado de materiales por medios químicos o biológicos.

3.2 Composición del agua residual municipal

En la tabla 14 se observan las principales características de las aguas residuales de origen municipal.

Tabla 14. Composición característica de aguas residuales domésticas sin tratamiento³⁷

Constituyentes de contaminación.		contenido (mg/L)		
		Fuerte	Intermedio	Débil
Físicos	sólidos totales	1200	700	350
	sólidos suspendidos	350	220	100
Químicos	sólidos disueltos	850	500	250
	DBO ₅	400	220	110
	DQO	1000	500	250
	Nitrógeno total	85	40	20
	Nitrógeno de Nitratos	0	0	0
	Nitrógeno de Amonio	50	25	12
	Fósforo total	15	8	4
	Cloruros	100	50	30
	Alcalinidad (CO ₃ Ca)	200	100	50
Biológicos	Bacterias Coliformes (NMP/100mL)	10 ⁹	10 ⁶	-

Con respecto a la carga de organismos patógenos que están presentes en las aguas residuales municipales en la tabla 15 se mencionan los principales, según datos de la EPA (United States Environment Protection Agency).

³⁷ Adaptado de: Metcalf y Eddy, 1996

Tabla 15. Principales microorganismos patógenos en agua residual doméstica y sus lodos³⁸

Organismos		Enfermedades/síntomas	
Virus Entéricos	<i>Hepatitis A virus</i>	Hepatitis infecciosa	
	<i>Norwalk y tipo Norwalk</i>	Gastroenteritis epidémica con diarrea severa.	
	<i>Rotavirus</i>		
	<i>Enterovirus</i>	<i>Poliovirus</i>	Poliomerítis.
		<i>Coxsackievirus</i>	Meningitis, neumonía, hepatitis, fiebre, etc.
		<i>Echovirus</i>	Meningitis, encefalitis, síntomas de catarro, diarrea, etc.
	<i>Reovirus</i>	Infecciones respiratorias, gastroenteritis.	
<i>Calicivirus</i>	Gastroenteritis epidémica.		
Bacterias	<i>Salmonella sp</i>	Salmonelosis y fiebre tifoidea.	
	<i>Shigella sp</i>	Disenteria bacilar.	
	<i>Yersinia sp</i>	Gastroenteritis aguda (con diarrea y dolor abdominal).	
	<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera.	
	<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenteritis.	
	<i>Escherichia coli (cepas patógenas)</i>	Gastroenteritis.	
Protozoarios	<i>Criptosporidium</i>	Gastroenteritis epidémica con diarrea severa.	
	<i>Entamoeba histolítica</i>	Enteritis aguda.	
	<i>Giardia lamblia</i>	Giardiasis (diarrea, calambres abdominales, pérdida de peso).	
	<i>Balantidium coli</i>	Diarrea y disentería.	
	<i>Toxoplasma gandii</i>	Toxoplasmosis.	
Helmintos	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Alteraciones digestivas y nutritivas, dolor abdominal, vómito.	
	<i>Ascaris suun</i>	Tos probable, dolor de pecho y fiebre.	
	<i>Trichuris trichiura</i>	Dolor abdominal, diarrea, anemia y pérdida de peso.	
	<i>Taenia saginata</i>	Nerviosismo, insomnio, anorexia, dolor abdominal, perturbaciones digestivas.	
	<i>Necator americanus</i>	Anquilostomias.	
	<i>Hymenolepis nana</i>	Teniasis.	

³⁸ EPA, 1992.

3.3 Tratamientos convencionales utilizados en México

La selección de los procesos y operaciones que conforman un sistema de tratamiento dependen de:

- La composición del agua residual
- El caudal
- El uso del efluente tratado o del requerimiento legislativo (determina la calidad de salida y la eficiencia de la remoción)
- La compatibilidad entre los diferentes procesos y operaciones
- La disponibilidad de energía y del terreno
- La factibilidad económica de las diferentes combinaciones (construcción, operación y mantenimiento)

De acuerdo a cifras de CONAGUA en el 2009 podemos observar que los tratamientos más usados en nuestro país son los que se muestran en la tabla 16

Tabla 16. Procesos de tratamiento utilizados en un mayor número de plantas de tratamiento de aguas residuales en operación

Nombre del tratamiento	Número de plantas (total nacional)	Caudal (L/s)
Lagunas de estabilización	707	13738.1
Lodos activados	546	40919.7
Humedales artificiales	160	597.38
Reactor anaerobio de flujo ascendente	129	1125.7

*“La cantidad de agua dulce disponible para uso humanos es inferior al 0.08% de toda el agua en el planeta... sólo la innovación institucional y tecnológica rápida e imaginativa puede evitar la crisis”.*³⁹

³⁹ BBC News/GES.

La evolución histórica ha hecho que se distingan diferentes etapas de tratamiento que corresponden al nivel de pretratamiento, primario, secundario o biológico y terciario o avanzado.

Actualmente, es posible encontrar esquemas donde no se distinguen en forma clara las etapas, debido al desarrollo de sistemas compactos de menor costo, pero la costumbre hace que se continúen clasificando los sistemas bajo este patrón.

Adicionalmente, existen los procesos complementarios que sirven para apoyar el proceso principal de eliminación y que se aplica en cualquier nivel de tratamiento.

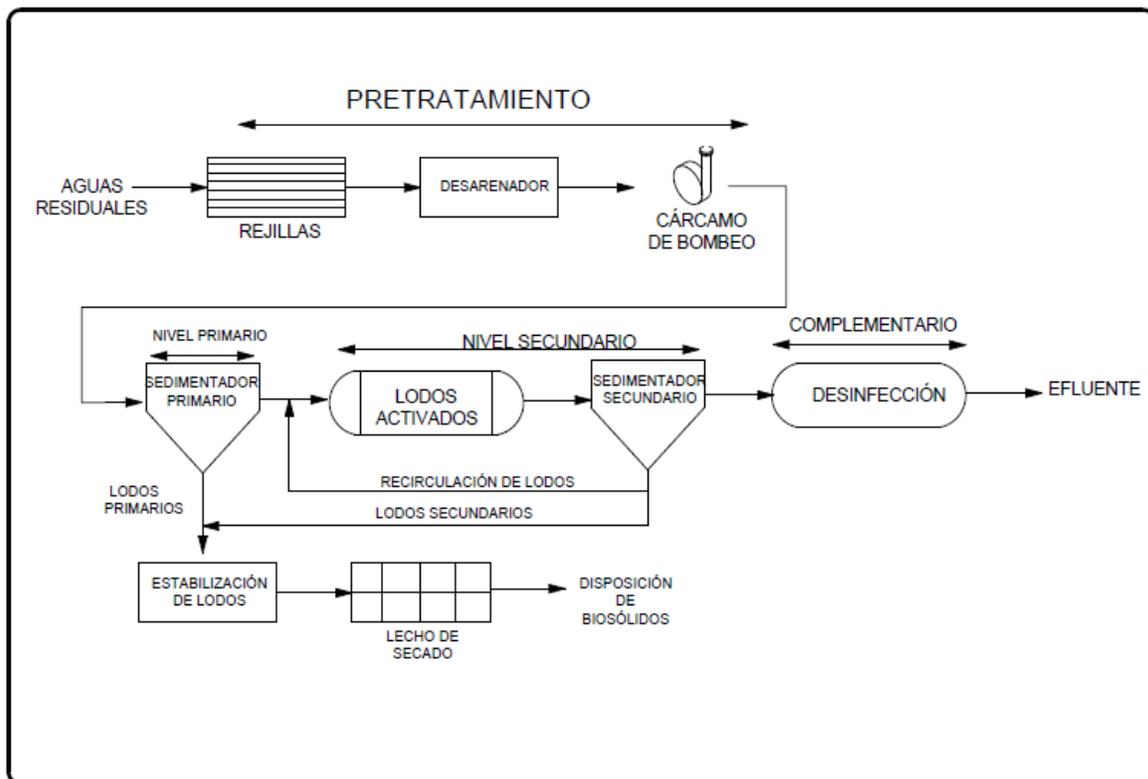


Figura 20. Tratamiento en una planta convencional de agua residual doméstica

En la figura 20 se presenta la secuencia de operaciones y procesos unitarios en una planta convencional de tratamiento de agua residual doméstica.

3.4 Escenarios aplicando las diferentes tecnologías

En este punto se presentarán alternativas de tratamiento de aguas residuales diferentes a las convencionales, aplicando las nuevas tecnologías, mencionadas en el capítulo anterior, comparando los beneficios y desventajas que presentarían dichos tratamientos.

3.4.1 Tratamiento utilizando un MBR

Si se considera un sistema MBR con el tratamiento de lodos activados, el ahorro de espacio que proporciona el utilizar un MBR es considerable.

Para este escenario se considera reemplazar el tratamiento primario, lodos activados, sedimentador secundario y el tratamiento terciario por un reactor de membrana.

- Nueva PTAR con un MBR

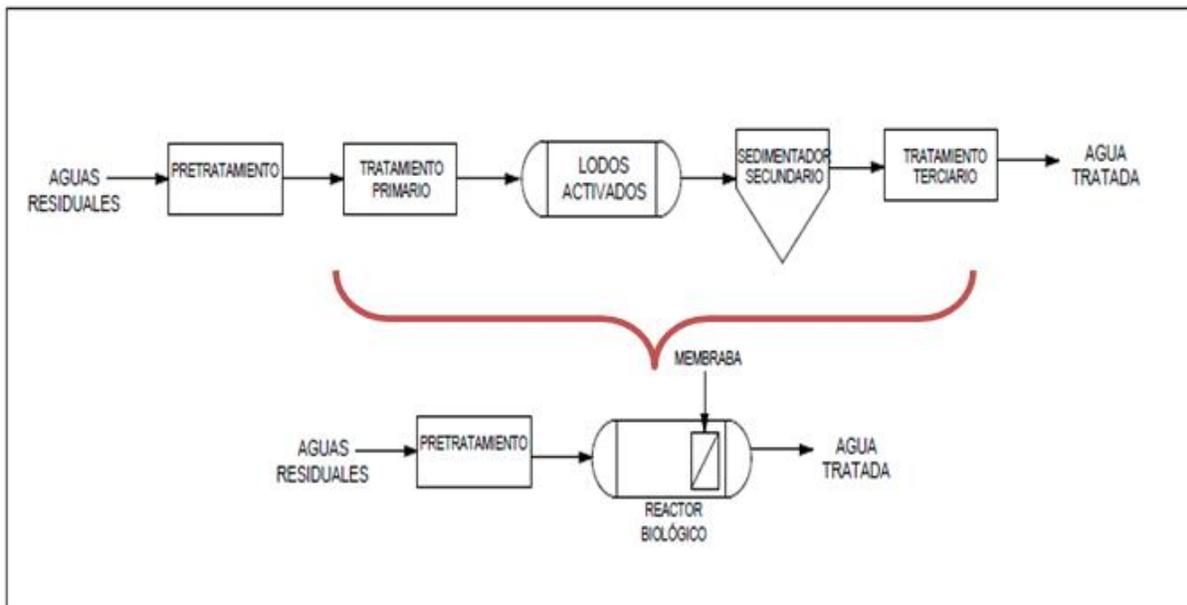


Figura 21. Comparación entre un tratamiento convencional y un MBR

En la figura 21 se muestra un esquema comparativo entre un tratamiento mediante lodos activados y un sistema de MBR (membrana sumergida).

Además de la reducción considerable de área de ocupación de este sistema de tratamiento, su eficiencia en comparación con las aguas producidas por un sistema convencional de lodos activados es muy superior.

En la tabla 17 se muestra la comparación entre un proceso convencional de lodos activados y un Biorreactor de Membrana (MBR).

Tabla 17. Comparación de calidad de efluente de un sistema de lodos activados y un MBR⁴¹

Parámetros	Influyente	Sistema convencional		MBR	
		Efluente	Eficiencia %	Efluente	Eficiencia %
DQO (mg/L)	520	75	85.6	10	98
SST (mg/L)	110	40	63.6	0	100
Turbidez (NTU)	38	15	60.5	0	100
NTK (mg/L)	48.3	30.2	37.5	3.4	93
Coliformes totales (UFC/100mL)		10 ⁴		10 ³ -10 ²	

⁴¹ González L. 2006, pág. 62

3.4.2 Tratamiento utilizando biomasa en suspensión con soportes

Utilizaremos como referencia la tecnología de AGAR (Attached Growth Airlift Reactor/ Patrón de Aireación del biodigestor y crecimiento adherido), puesto que es una tecnología novedosa, que se puede implementar en una planta de tratamiento ya existente, permitiendo aumentar su capacidad y eliminar nutrientes, sin necesidad de construir tanques adicionales.

El proceso de AGAR se puede implementar tanto en procesos tipo "IFAS" (procesos de lodos activados combinados con portadores de biomasa), como para procesos que solamente consideran la presencia de portadores de biomasa sin recirculación de fangos activados.

A continuación se indicarán dos propuestas diferentes en donde se puede utilizar esta tecnología, estas son:

- ✓ La construcción de una nueva PTAR implementando dicha AGAR IFAS-DBO
- ✓ La adición de la tecnología de AGAR en las PTAR existentes

- **Nueva PTAR con Tecnología AGAR IFAS-DBO**

En específico podemos decir que el más conveniente para este primer punto es el proceso IFAS- DBO de AGAR.

Esta configuración del proceso AGAR se desarrolló para tratar y eliminar de manera intensiva la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), considerando un tiempo de retención hidráulica (TRH) muy corto.

Esta solución es apropiada cuando, se desea aumentar la capacidad de tratamiento y eliminación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) en plantas existentes. Así

mismo para diseñar plantas compactas para la eliminación de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO).

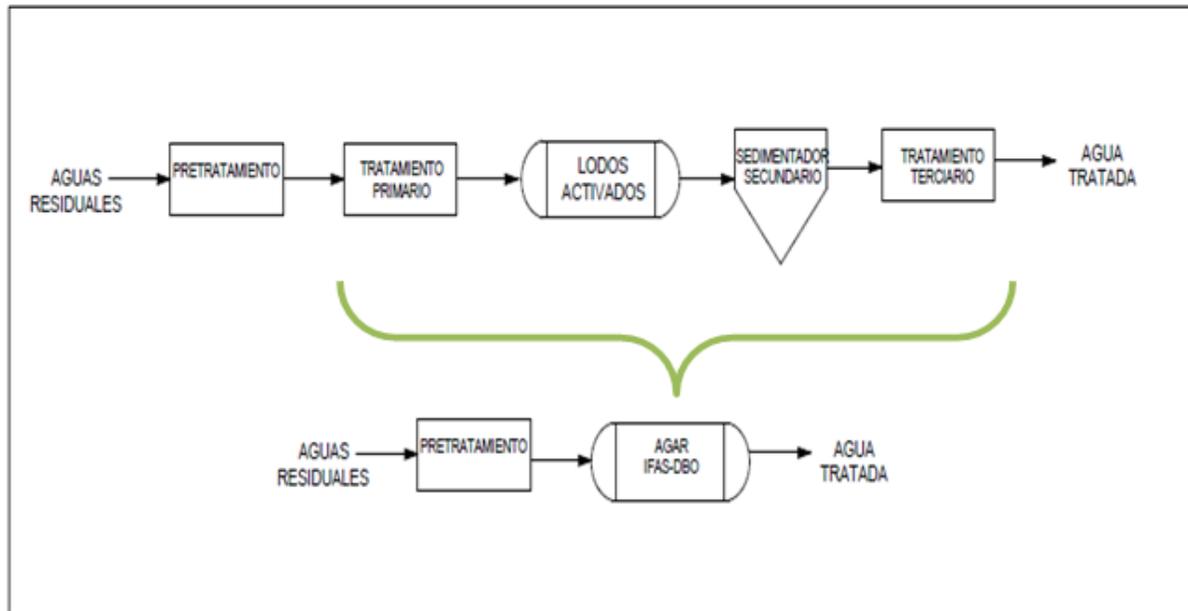


Figura 22. Comparación entre un tratamiento convencional y tecnología AGAR

En la figura 22 se muestra un esquema comparativo entre un tratamiento mediante lodos activados (convencional) y un sistema AGAR IFAS-DBO. En esta propuesta se reemplaza el tratamiento primario, lodos activados, sedimentador secundario y el tratamiento terciario por el AGAR IFAS-DBO.

En la figura 23 se observa las etapas presentes en el reactor IFAS AGAR, generalmente este reactor se divide en una serie de etapas de proceso, que incluyen volúmenes aeróbicos, anóxicos y anaeróbicos, de una manera que es similar a una configuración de eliminación de nutrientes biológicos o BNR (por sus siglas en inglés Biological Nutrient Removal). En IFAS AGAR se añaden los portadores de biomasa en las etapas aeróbicas. Los soportes son retenidos por mallas situadas en los extremos al final de cada etapa del proceso.

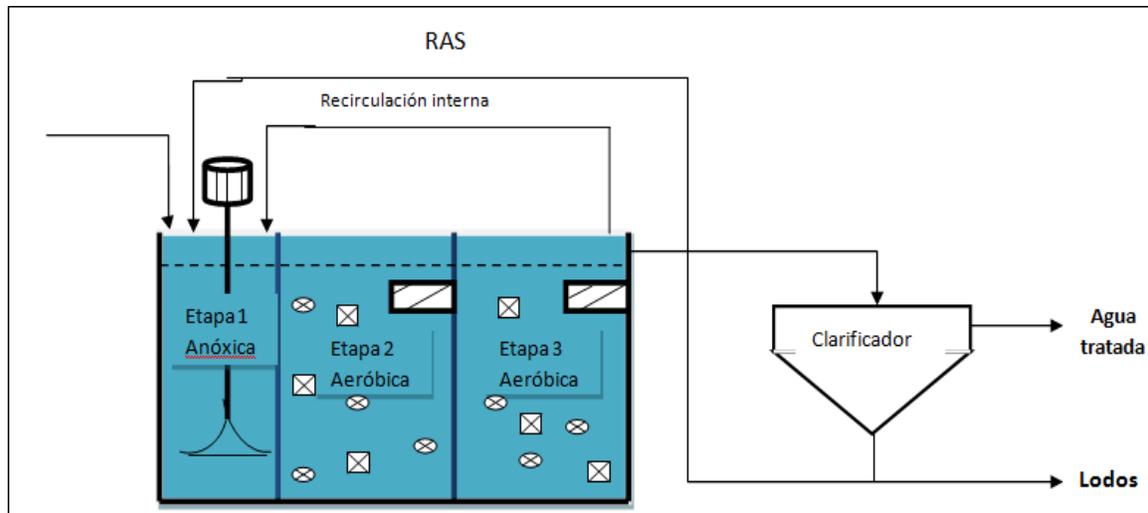


Figura 23. Reactor IFAS AGAR

- **Adición de AGAR a las PTAR existentes**

El proceso de lecho móvil de AGAR es una combinación de la tecnología de lodos activados y los procesos de biopelícula. A menudo se implementa en plantas de tratamiento de aguas residuales ya existentes, en particular, para ahorrar espacio o para evitar difíciles obras de construcción. El AGAR Process es implementado con éxito tanto para la materia orgánica disuelta y para la eliminación de nitrógeno.

Este proceso implica miles de portadores de biomasa producidos a partir de polietileno. Puesto que la densidad de estos portadores es similar a la del agua, flotan en el líquido dentro del reactor de lodos activados. La superficie activa de los soportes de biomasa superior a $650 \text{ m}^2/\text{m}^3$ biofiltro está protegida contra la abrasión y al corte. Cada cm^2 de esta superficie activa está cubierto por un biopelícula de bacterias heterótrofas y autótrofas llenando así los poros de los portadores. Los portadores de biomasa ABC AGAR generalmente ocupan del 10% al 70% del volumen del tanque de los lodos activados. La aireación de burbuja fina que utiliza los difusores altamente eficientes o de aireación de burbuja medio utilizando el sistema de la IAS suministran la cantidad necesaria de aire, que permite una mezcla completa y previene la formación de la capa de lecho inactiva.

La alta eficacia del tratamiento está garantizada por la elevada densidad de la población de microorganismos que cubren los portadores de biomasa. La edad del proceso convencional de lodos activados es mayor, pero la velocidad de carga es menor en el AGAR Process.

Para evitar que los soportes de biomasa escapen del depósito de lodos activados se colocan unas mallas. Dado que el proceso no implica ningún equipo no estándar que no sólo se puede instalar en las nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales, pero puede adaptarse a la mayoría de las instalaciones existentes, sin desarrollo de la infraestructura necesaria para tanques de almacenamiento adicional como se muestra en la figura 24.

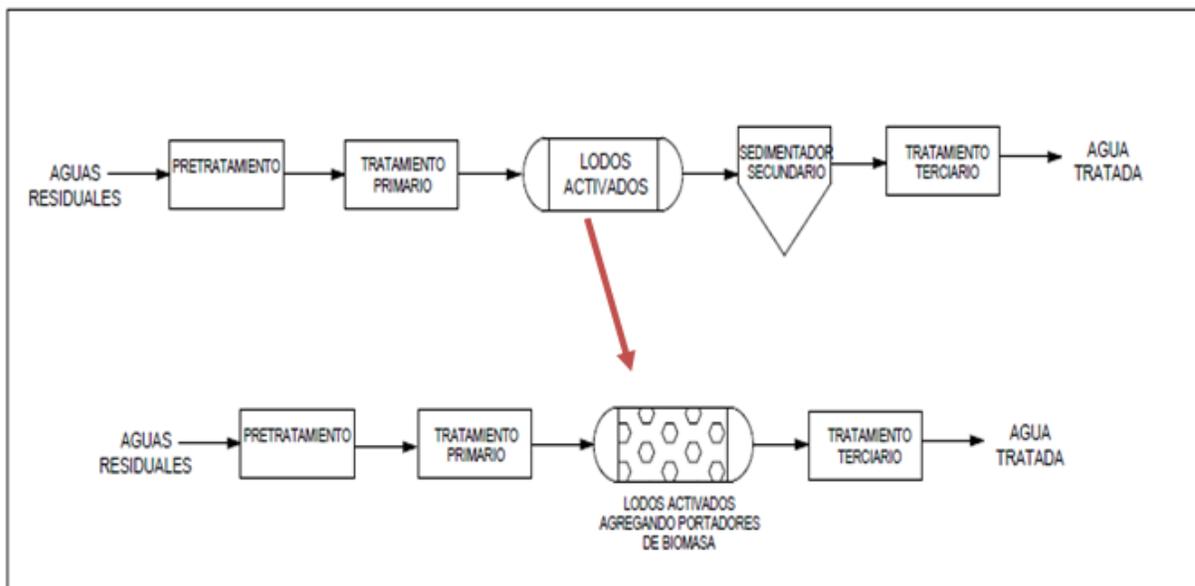


Figura 24. Adición de Tecnología AGAR en PTAR ya existente con Lodos activados

3.4.3 Tratamiento utilizando humedales artificiales de flujo libre superficial

Las funciones principales de los humedales artificiales son: mayor almacenamiento de agua y la mejora de la calidad del agua. Algunos humedales están diseñados para recarga de agua subterránea.

Algunas funciones auxiliares incluyen la producción primaria de carbón orgánico por las plantas, la producción de oxígeno a través de la fotosíntesis, albergar a especies herbívoras (de humedales) y depredadoras, así como la creación de valores culturales en términos de recursos educativos y recreativos para la sociedad.

Sin embargo los humedales FLS requieren de un área relativamente extensa. El tratamiento es efectivo y requiere muy poco en cuanto a equipos mecánicos, electricidad la atención de operadores adiestrados. Los sistemas de humedales pueden ser los más favorables desde el punto de vista económico cuando el terreno está disponible a un costo bajo. Los requerimientos del terreno y los costos tienden a favorecer la aplicación de la tecnología de estos humedales en zonas rurales.

Es rutinario el proporcionar algún tipo de tratamiento preliminar antes del humedal FLS (tratamiento primario).

En los climas más fríos o donde no es posible contar con extensas áreas de terreno se pueden diseñar sistemas de humedales más pequeños para la remoción de DBO/SST. La remoción de nitrógeno puede lograrse con un proceso separado, por ejemplo se han integrado con éxito filtros percoladores de grava para la nitrificación del amoníaco en el agua residual.

Un humedal FLS con una carga moderada puede lograr los niveles de efluente “naturales” como se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. . Concentraciones “naturales” en Humedales FLS⁴²

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

Tabla 19. Resumen del desempeño de 27 sistemas de Humedales FLS

Constituyente	Promedio en el afluente (mg/L)	Promedio en el efluente (mg/L)
DBO ₅	70	15
SST	69	15
Nitrógeno como NTK	18	11
Nitrógeno como NH ₃ /NH ₄	9	7
Nitrógeno como NO ₃	3	1
Nitrógeno total	12	4
Fósforo total	4	2
Fósforo disuelto	3	2
Coliformes fecales (#/100mL)	73,000	1,320

⁴² EPA, Humedales FLS. 2000

En general, los humedales artificiales FLS se diseñan para producir una calidad dada de efluente.

En la tabla 19 se resume el desempeño real de 27 sistemas de humedales FLS incluidos en una Evaluación de tecnología publicada en el 2000⁴³.

Por lo antes mencionado en este caso, el escenario consistirá en dos propuestas:

- La construcción de nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales municipales que utilicen el tratamiento de humedales artificiales FLS
- La implementación de humedales artificiales el PTAR ya existentes

- **Nueva PTAR con Humedal Artificial FLS**

En la figura 25 se puede observar la comparación entre un sistema convencional y uno utilizando humedales FLS.

Como ya se menciona anteriormente este tratamiento requiere de una extensión de terreno grande, no son recomendables de utilizar en climas muy fríos o con cambios drásticos de temperatura, por citar algunos puntos que se desarrollan mejor en el capítulo dos.

⁴³ EPA, 2000

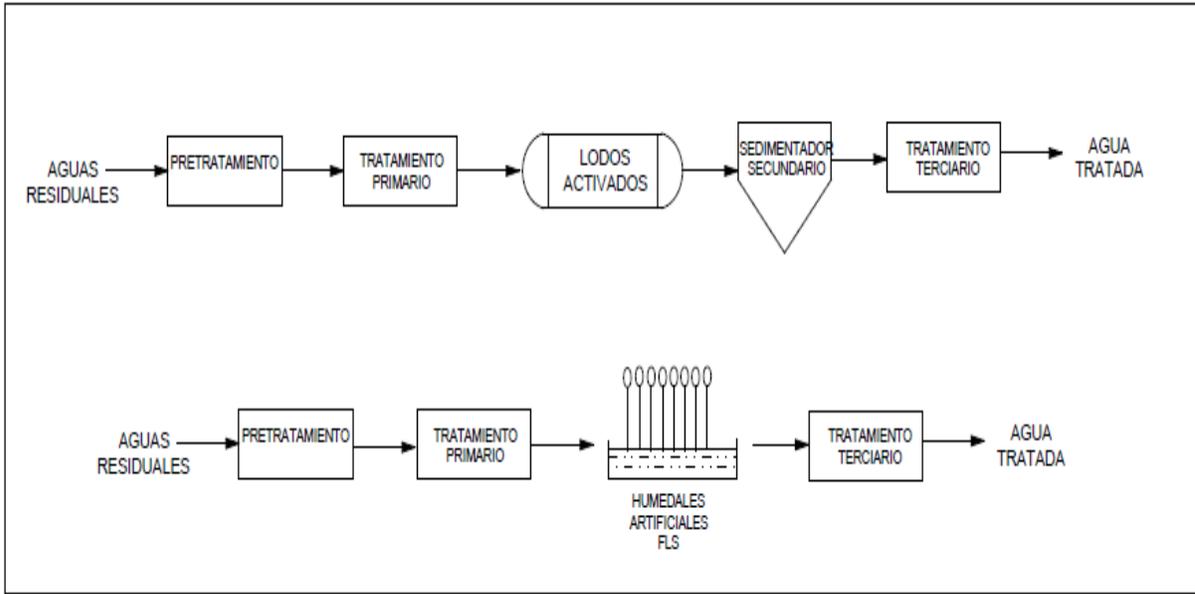


Figura 25. Comparación entre tratamiento convencional y humedales artificiales

- **Adición de Humedales FLS a las PTAR existentes**

Los humedales FLS han sido también utilizados como continuación de otros sistemas de tratamiento, como en el caso de algunos FLS de mayor tamaño en Florida y Nevada (E.U) que fueron diseñados para perfeccionar el efluente terciario avanzado.

Sin embargo estos casos son más particulares, ya que dependerán de la calidad de agua que se requiera, por ello no se colocara un diagrama de bloques como en los escenarios anteriores.

Se debe tener en cuenta que la planta ya existente, donde se desea adicionar los humedales artificiales FLS cuente con un espacio extra suficientemente amplio para su construcción, así mismo de tomar en cuenta la calidad de agua tratada que este sistema pueda llegar a perfeccionar.

3.4.4 Tratamiento utilizando electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso que aplica los principios de la coagulación–floculación en un reactor electrolítico. Este es un recipiente dotado de una fuente de corriente y varios electrodos encargados de aportar los iones desestabilizadores de partículas coloidales que reemplazan las funciones de los compuestos químicos que se utilizan en el tratamiento convencional. En este proceso se genera una elevada carga de cationes que desestabilizan los contaminantes del agua residual, se forman hidróxidos complejos, estos tienen capacidad de adsorción produciendo agregados (flóculos) con los contaminantes. Por otro lado, debido a la acción del gas formado se genera turbulencia y se empuja hacia la superficie los flóculos producidos.

Otro fenómeno beneficioso del proceso de electrocoagulación es la oxidación química que permite oxidar los metales y contaminante a especies no tóxicas y degradar la DQO/DBO de forma sustancial.

Para este escenario se realiza lo siguiente:

- **Nueva PTAR con Electrocoagulación**

Es una de las soluciones innovadoras utilizadas en Israel debido a que es un tratamiento ahorrador que puede utilizarse para tratar aguas residuales municipales e industriales.

En esta propuesta se remplazara el tratamiento primario, lodos activados y sedimentador secundario por una celda de electrocoagulación, como se ejemplifica en la figura 26.

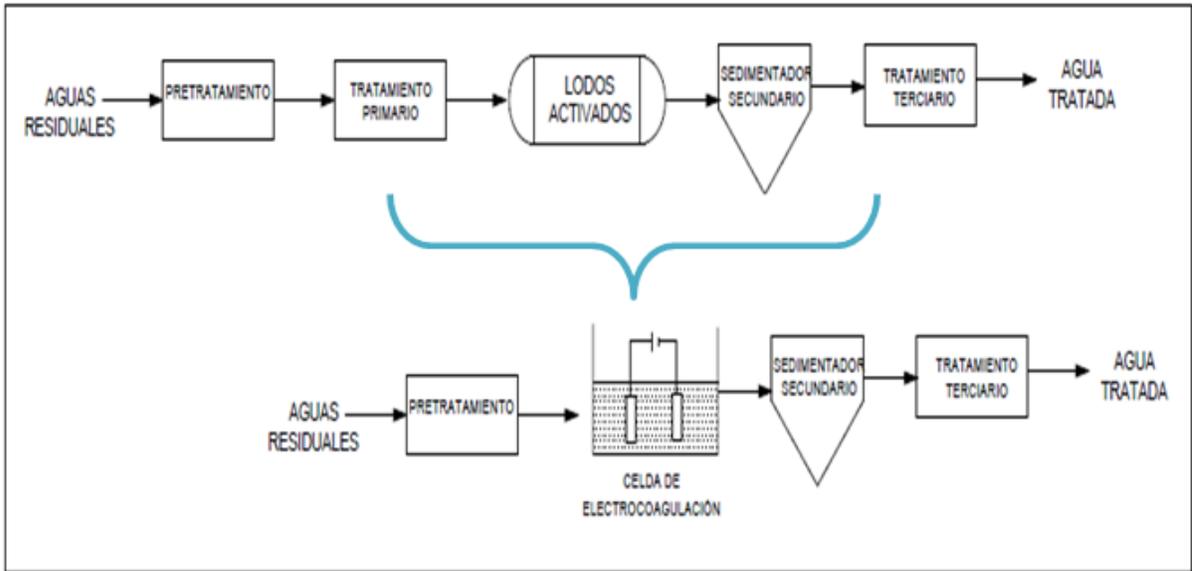


Figura 26. Comparación entre tratamiento convencional y electrocoagulación

Capítulo 4

PERSPECTIVAS Y PROYECCIÓN AL IMPLEMENTAR LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS

“El agua de gran calidad es más que el sueño de los conservacionistas, más que un eslogan político; el agua de gran calidad, en la cantidad adecuada en el lugar correcto, en el momento apropiado, es esencial para la salud, la recreación y el crecimiento económico” (Edmund S. Muskie, ex secretario de EE.UU./GES)

Una vez establecidos los escenarios en el capítulo anterior, comenzaremos este planteando la problemática a la que se enfrentará México de escasez de agua debido al crecimiento de la población (perspectiva al 2030). Posteriormente hablaremos de las estrategias que se pueden llevar a cabo para evitar este problema, utilizando las aguas residuales tratadas.

En la tabla 20 se presentan las propuestas y escenarios.

Tabla 20. Propuestas y escenarios aplicando la nuevas tecnologías

Tratamiento utilizando un MBR	Nueva PTAR con un MBR
Tratamiento utilizando biomasa en suspensión con soportes	Nueva PTAR con tecnología AGAR IFAS-DBO
	Adición de AGAR a las PTARs ya existentes
Tratamiento utilizando Humedales Artificiales de flujo libre	Nueva PTAR con Humedales Artificiales FLS
	Adición de Humedales Artificiales FLS a PTARs ya existentes
Tratamiento utilizando Electrocoagulación	Nueva PTAR con Electrocoagulación

4.1 Problemática

A continuación se plantean algunos de los retos y problemas a los que se enfrentan las plantas de tratamiento de aguas residuales:

- ✓ La rápida urbanización e impredecible crecimiento de la población a nivel mundial (Fig. 27) imponen una carga adicional sobre los sistemas de tratamiento actuales, debido al inesperado incremento de la cantidad de aguas residuales que requieren tratamiento

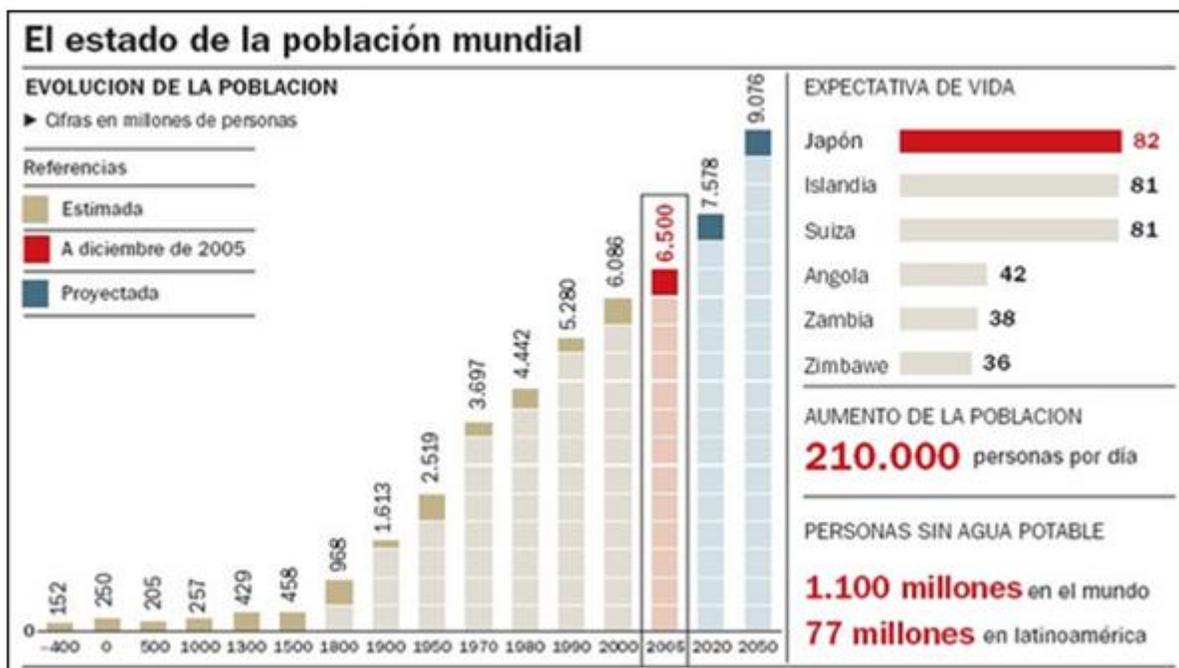


Figura 27. Estado de la población mundial⁴⁴

- ✓ Los estándares cada vez más estrictos sobre la calidad de efluentes requieren que las plantas eliminen contaminantes, especialmente nutrientes, que no estaban contemplados en el diseño original de las plantas actuales
- ✓ En muchos casos, los sistemas de tratamiento existentes en una ciudad cuentan con equipos inadecuados y obsoletos.

⁴⁴ Instituto Demográfico de Francia/ ONU

A continuación abordaremos el problema del crecimiento de la población que como consecuencia aumentará la demanda de agua potable y el caudal de las aguas residuales a tratar.

4.1.1 Crecimiento de la población

Un aspecto de suma importancia que se tiene que considerar, en los escenarios futuros de nuestro país, es el incremento de la población.

De acuerdo con las estimaciones de la CONAPO, entre el 2010-2030 la población del país se incrementará en 12.3 millones de personas (aprox. 127.3 millones de personas en el país en el 2030 según CONAPO), aunque las tasas de crecimiento tenderán a reducirse (Fig. 28).

Además, para el 2030 aproximadamente el 81% de la población total se asentará en localidades urbanas.

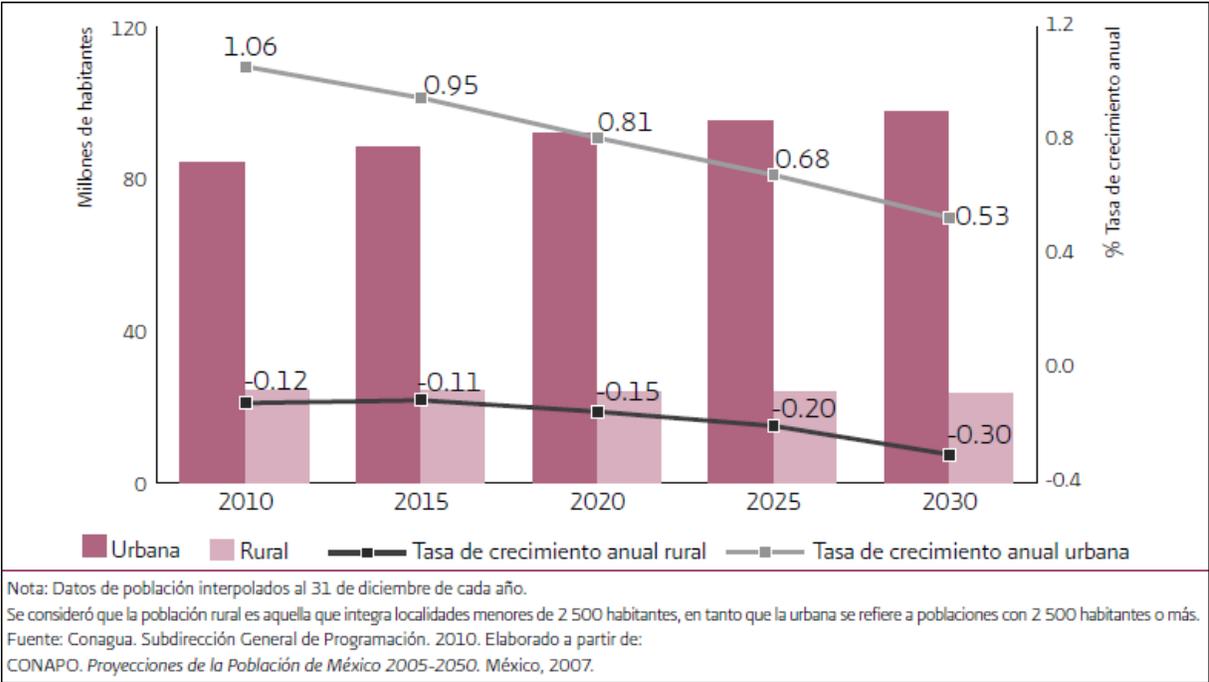


Figura 28. Proyección de crecimiento de la población urbana y rural en México, 2010-2030

Se calcula que para el 2030, el 70% del crecimiento poblacional ocurrirá en las regiones hidrológico-administrativas (RHA) VIII Lerma-Santiago-Pacífico, XIII Aguas del Valle de México, VI Río Bravo y I Península de Baja California. En cambio, las regiones III Pacífico Norte y V Pacífico Sur experimentarán una disminución de su población.

Tabla 21. Población en los años 2010 y 2030, por RHA (miles de habitantes)⁴⁵

RHA		Población		Incremento de población esperado	Clasificación del grado de presión en 2009
		2010	2030		
I	Península de Baja California	3882	5915	2033	Alto
II	Noreste	2635	2910	275	Alto
III	Pacífico Norte	3959	3795	-164	Alto
IV	Balsas	10666	11127	461	Alto
V	Pacífico Sur	4131	4022	-109	Sin estrés
VI	Río Bravo	11117	13252	2135	Alto
VII	Cuencas Centrales del Norte	4217	4568	351	Alto
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	21141	23512	2371	Alto
IX	Golfo Norte	4981	5099	118	Bajo
X	Golfo Centro	9677	9925	248	Sin estrés
XI	Frontera Sur	6674	7498	824	Sin estrés
XII	Península de Yucatán	4145	5807	1662	Sin estrés
XIII	Aguas del Valle de México	21582	23673	2091	Muy alto
Total		108808	121104	12296	

Como se observa en la tabla 21, algunas de la RHA para las que se espera mayor crecimiento población son al mismo tiempo aquellas donde ya existe un alto grado de presión hídrica. En contraste, en algunas RHA con menor grado de presión (V Pacífico Sur, IX Golfo Norte y X Golfo Centro) se espera un crecimiento menor.

El incremento de la población ocasionará la disminución del agua renovable *per cápita* a nivel nacional como se observa en la tabla 22.

⁴⁵ CONAGUA, Estadística de Agua en México, edición 2011.

Tabla 22. Agua renovable per cápita por RHA, 2010 y 2030⁴⁶

Región Hidrológico Administrativa		Agua renovable (hm ³ /año)	Población a diciembre de 2010 Mill. Hab	Agua renovable per cápita 2010 (m ³ /hab/año)	Agua renovable per cápita 2030 (m ³ /hab/año)
I	Península de Baja California	4 667	3.78	1 234	789
II	Noroeste	8 499	2.62	3 250	2920
III	Pacífico Norte	25 630	3.96	6 473	6754
IV	Balsas	21 680	10.62	2 040	1948
V	Pacífico Sur	32 824	4.13	7 952	8162
VI	Río Bravo	12 163	10.98	1 107	918
VII	Cuencas Centrales del Norte	7 898	4.19	1 887	1729
VIII	Lerma-Santiago-Pacífico	34 533	20.97	1 646	1469
IX	Golfo Norte	25 564	4.97	5 145	5013
X	Golfo Centro	95 866	9.65	9 937	9659
XI	Frontera Sur	157 754	6.62	23 835	21041
XII	Península de Yucatán	29 645	4.06	7 294	5105
XIII	Aguas del Valle de México	3 513	21.42	164	148
Total Nacional		460 237	107.97	4 263	3800

En México llueve una media de 1,489 km³ al año, de los cuales se evaporan el 73.1% regresando a la atmósfera, el 22.1% escurre por ríos y arroyos, y el 4.8% restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos. Tomando en cuenta las exportaciones e importaciones de agua con países vecinos, así como la recarga incidental (consecuencia de la actividad humana, sin estructura específica para recarga artificial), anualmente el país cuenta con 460 mil millones de metros cúbicos de agua dulce renovable. Dividiendo este valor entre la población se tiene el agua renovable per cápita. En algunas RHA el valor de agua renovable per cápita es preocupantemente bajo.

⁴⁶ CONAGUA. Estadísticas del Agua en México, edición 2011.

4.1.2 Demanda de agua a nivel nacional

La demanda de agua a nivel Nacional es del orden de 78.4 km³ (miles de millones de metros cúbico) en el 2010 (periodo de 1 año). Para satisfacerla se extraen de fuentes superficiales y subterráneas un volumen sustentable de 66.9 km³: y se complementa la demanda Nacional con un volumen no sustentable de 11.5 km³ de los cuales 6.3 km³ provienen de acuíferos sobreexplotados. La mayor parte de esta demanda se concentra en el sector agrícola (Fig. 29).

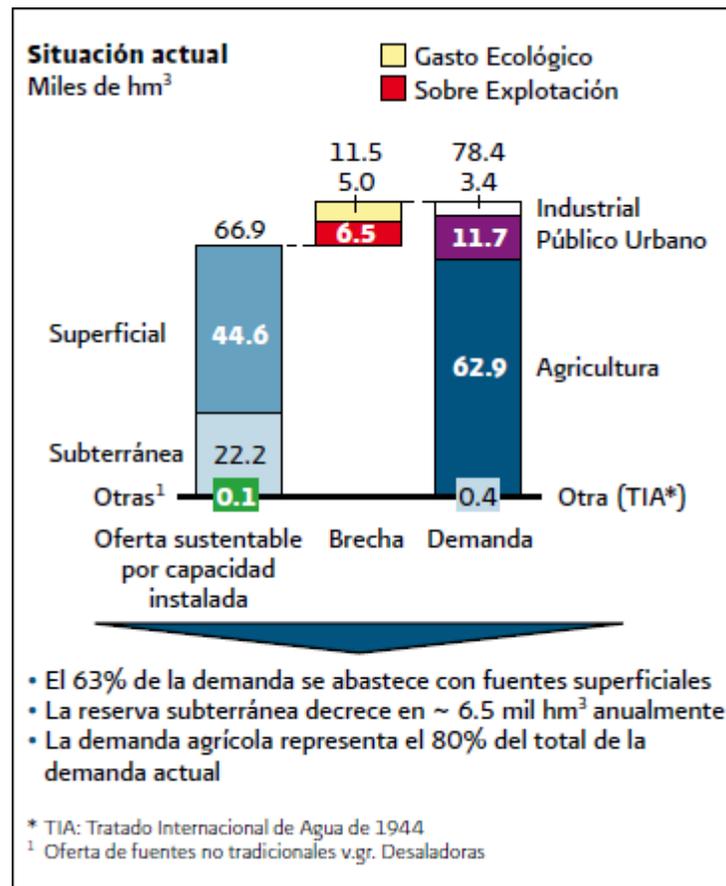


Figura 29. Situación de oferta y demanda de agua en el 2010

Se estima que en 2030, la demanda se incrementará a 91.2 miles de millones de metros cúbicos debido al incremento en las actividades productivas y del crecimiento de la población. Al considerar que se construirán los proyectos de infraestructura registrados en la Cartera de Proyectos de la Secretaría de Hacienda y Crédito

Público, la oferta se incrementará en 1.3 miles de millones de metros cúbicos para llegar a un total de 68.2 miles de millones de metros cúbicos, lo que significa que la brecha estimada entre oferta y demanda al 2030 será de 23 mil millones de metros cúbicos (Fig 30).

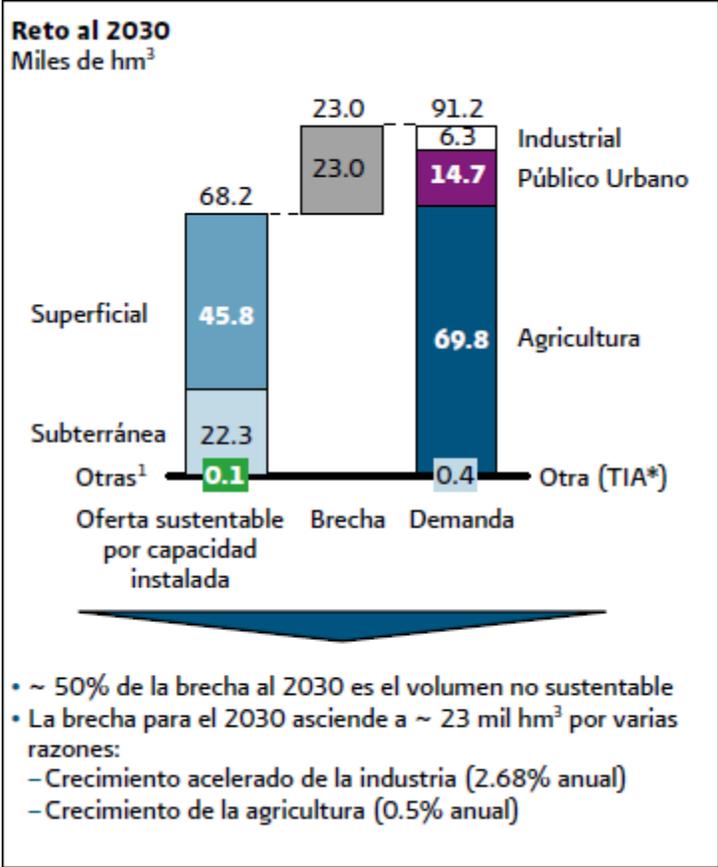


Figura 30. situación de oferta y demanda de agua prevista para el 2030

Todos estos datos son reportados en la Agenda del Agua 2030.

4.1.3 Brecha de tratamiento de agua residual de origen municipal

Como ya mencionó en el capítulo 1, en el lo que corresponde a la Agenda del Agua 2030.

En el 2010 se trataron 2.857 km³ anuales de aguas residuales, que equivalen al 43% de las aguas residuales recolectadas.

Y para el 2030 el estimado según la AA2030, es que se tendrán 7.157 km³ de agua residual colectada, por ello hay una brecha de 4.3 km³.

brecha = estimado de agua residual en el 2030 – agua tratada en el 2010

$$brecha = 7.157 \text{ km}^3 - 2.857 \text{ km}^3 = 4.3 \text{ km}^3$$

Asimismo, al año 2030 se estima que la actividad industrial generará un volumen de agua residual cercano a 2.1 millones de metros cúbico (la brecha de tratamiento será del orden de 1.8 millones de metros cúbico).

4.2 Reúso

El principal objetivo de este trabajo es la consideración sobre el reúso de las aguas residuales tratadas, en este inciso se visualizarán los posibles usos de estas, una vez que ya pasaron por el respectivo proceso de tratamiento.

Frente a la escasez de agua potable (agua limpia), las aguas residuales representan un recurso cada vez más apreciado.

Un obstáculo a la creación de ciclos de reúso, ha sido el costo y complejidad de las plantas de tratamiento. Por suerte, las técnicas o tecnologías de tratamiento han avanzado y prometen ayudar a superar este problema (como se plantea en el capítulo 2).

Se entiende por reúso la práctica de recuperar aguas degradadas para emplearlas nuevamente, después de aplicarles un adecuado tratamiento, que dependerá de las exigencias de calidad requerida para los diferentes propósitos para los cuales se desee usarlas.

Las principales ventajas del reúso de aguas tratadas son:

- Conservar las fuentes de agua e incrementar la disponibilidad
- Preservar la integridad de cuerpos de agua, humedales y flora y fauna
- Reciclar compuestos (nutrientes)
- Hacer rentable el costo de saneamiento

Algunos factores que favorecen el reúso son:

- Interés público: Mayor conciencia
- Conciencia sobre los costos ambientales y económicos por el manejo convencional (almacenar el agua en presas, reservorios y usar cursos de agua para autodepuración)
- Estándares de calidad cada vez más estrictos
- Sequías, escasez de agua, prevención de la intrusión salina, dificultad para descargar agua tratada, incentivos económicos, políticos y suficiencia tecnológica

El reúso se puede “clasificar” en dos tipos según el camino que se elija para llegar a su destino.

- Directo: del tratamiento al nuevo uso
 - ✓ Consumo humano: con dilución en red de suministro
 - ✓ Agricultura.- Sin dilución
- Indirecto: pasa a un cuerpo de agua donde hay siempre dilución
 - ✓ Consumo humano
 - ✓ Agricultura

El reúso en países desarrollados se da como resultado de las estrategias de saneamiento implantadas, es decir, está controlado, sin embargo en países en desarrollo como es el caso de nuestro país es el resultado de la falta de saneamiento y/o falta de agua (no planeado).

A continuación se muestran las aéreas de uso potencial en donde pueden ser aprovechadas las aguas residuales para así disminuir las problemáticas de escasez de agua en, contaminación de acuíferos, ayudar a la recarga de acuíferos, etc. en México. Cada uno de estos con calidad variable, se debe definir en cada caso.

4.2.1 Reúso agrícola

Según estadísticas de la UN (2003), la agricultura emplea el 76% del agua en el mundo

El reúso agrícola tiene beneficios como: Cada litro reutilizado reemplaza la necesidad de importar agua ó sobreexplotar los acuíferos, incrementa la producción agrícola en cantidad y calidad, evita la contaminación del agua superficial.

Además podemos separarlo en dos tipos, según la calidad de agua tratada que requieren.

Por un lado un reúso restringido, que se refiere al destinado a los cultivos para consumo humano y un reúso no restringido , que incluye a los cultivos forrajeros, fibras, flores, pastizales, invernaderos comerciales, granjas de pasto.

El principal riesgo que presenta este tipo de reúso son problemas a salud debido a patógenos y parásitos, sin embargo con un adecuado tratamiento que asegure una calidad de efluente adecuada, esto no representaría un problema.

4.2.2 Reúso Industrial

La Industria emplea el 20 % del agua en este caso el reúso potencial es importante puesto que la demanda incrementará en 50%⁴⁷.

⁴⁷ Shiklomanov, 1999.

Algunas ventajas son:

- Disminuye el costo de producción por la recuperación de subproductos y la reducción del consumo de agua
- Recupera calor
- Disminuye el costo de tratamiento del agua así como el de su descarga.

Los usos más comunes son:

- Enfriamiento (más común), este uso posee una demanda elevada de agua (20-50% en una industria), no requiere de una calidad muy alta (dependiendo de los equipos), y presenta facilidad para implementarse utilizando agua tratada
- En generación de energía, consume el 70% del agua industrial, la calidad que requiere es de un tratamiento secundario y en ocasiones adicionalmente necesita de filtración o ablandamiento.

Sin embargo en este caso lo más adecuado es el reúso del agua residual proveniente de la misma industria (primero se recicla y luego se reúso), así que solo se menciona ya que es una aplicación de reúso importante pero no incumbe a esta propuesta por no tratarse de aguas residuales municipales.

4.2.3 Reúso municipal

En 20 años, el 60% de la población mundial vivirá en ciudades (12% más que en la actualidad, según estadísticas de las Naciones Unidas, esto provocara una mayor demanda de agua municipal, y por consecuencia mayor producción de agua residual.

En este caso los tipos de reúso urbano o municipal son:

- Baja calidad: aquí se incluye el riego de áreas con acceso poco frecuente y controlado, limpieza de calles y transportes, limpieza de excusados, aire acondicionado

- Calidad media: Control incendios, construcción, llenado lagos recreativos
- Calidad buena: Riego de áreas verdes, parques de juego, jardines escolares, campos de golf, cementerios, llenado de lagos recreativos con contacto directo, áreas verdes residenciales, cinturones verdes y derretido de nieve
- Alta calidad: que comprende el consumo humano.

4.2.4 Reúso potable directo

Se identificó como posibilidad o incluso como una necesidad en 1954 y se iniciaron los estudios piloto a inicio de la década de los 60.

Las barreras que hay que vencer para poder hacer un reúso responsable en este caso son:

La segregación de efluentes, se requiere de un tratamiento avanzado que ofrezca una alta calidad de efluente, evitar el mezclado de agua con otras fuentes de suministro, parámetros estéticos y tener un control riguroso de la calidad del agua cruda y renovada.

4.2.5 Reúso para el mejoramiento ambiental

En este caso lo que se pretende es el aumento de flujos o creación de corrientes, lagos, fuentes, humedales, etc (Fig. 31).

Los beneficios de este tipo de reúso son principalmente el incremento de la cantidad y calidad de las reservas de agua, su uso con fines estéticos, recreativos o recuperación de ecosistemas (se logra reponer la vida acuática de peces, insectos, moluscos) y de espacios y escenarios naturales, y se crean corredores ecológicos en áreas urbanas.

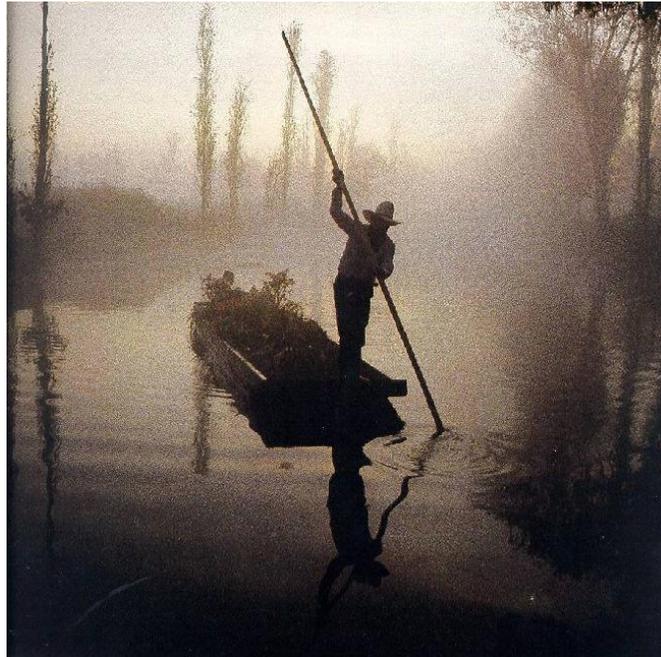


Figura 31. Llenado del Lago de Xochimilco, Ciudad de México hace 30 años.

4.2.6 Recarga de acuíferos

El problema de la sobreexplotación de acuíferos es evidente en la Cuenca de México donde el 77% del agua utilizada proviene de fuentes subterráneas, y dos de cada tres metros cúbicos extraídos, provienen de la sobreexplotación. El hundimiento y el agrietamiento de la capa protectora de sus acuíferos (lo cual pone en riesgo la calidad del agua en el acuífero, y la integridad de viviendas en su superficie) son señales de la necesidad de reducir los volúmenes extraídos.

Los acuíferos sirven para almacenar y transmitir agua, dar tratamiento natural al agua de alta calidad, conservar el agua (muy poca evaporación), poca contaminación secundaria por animales, lluvias, no hay riesgo de crecimiento de malezas, es menos costoso pues no se requieren construir tuberías

Los acuíferos se pueden clasificar según su uso en:

- Restringido: Uso para suministro potable
- No restringido: Control de la intrusión salina o de hundimiento.

Algunas formas para la recarga de acuíferos son:

- ***Estanques de recarga***

Estos requieren áreas grandes con suelo permeable, acuíferos no confinados con alta transmisividad, suelo no saturado (o zona vadosa) sin capas que limiten.

La zona no saturada actúa como un filtro natural para remover los sólidos suspendidos, las sustancias orgánicas, bacterias, virus y otros organismos, también Remueve N, P y metales pesados. Se conoce como tratamiento de suelo/acuífero (SAT).

Sus ventajas son; Bajo costo, facilidad de operación, compagina con la agricultura.

- ***Inyección directa***

Los requerimientos en este caso son; Emplea agua tratada (con un tratamiento avanzado con fuerte desinfección), se emplea para acuíferos profundos o que se encuentran bajo capas impermeables y son de mayor costo de construcción y operación.

Las ventajas que presenta son: se llega a acuíferos profundos al introducir agua directamente en pozos, requiere de una extensión de terreno menor.

Como desventajas se puede mencionar que las paredes del pozo se pueden taponar con SS, puede haber crecimiento biológico o precipitados químicos, no se observa actividad depuradora por el suelo.

4.3 Plan estratégico para disminuir la escasez de agua potable

Tomando en cuenta los seis escenarios (aplicación de las nuevas tecnologías) y las áreas potenciales de reúso del agua se puede realizar un plan que ayude a disminuir la presión y contaminación a la que están sometidos los cuerpos de agua, con el fin de reducir la escasez de agua potable en un futuro (2030).

Cabe mencionar que para propiciar el reúso, el gobierno debe desarrollar criterios estrictos de descarga de aguas residuales. Además de cobrar el precio “real” del agua, es decir, que incluya los costos de: disponibilidad, extracción, potabilización, transporte, drenaje, distribución, tratamiento y disposición. Y de esta manera modificar la actitud de la población, cambiar la indiferencia hacia un uso responsable del agua, que permita su preservación. Fomentar una cultura de ahorro de agua en la población, y apoyar el desarrollo y la investigación en nuestro país

También es importante señalar que el organismo operador de la PTAR tiene un papel vital en la promoción de ciclos de reciclaje. Por un lado, está en posición para identificar nuevos volúmenes a captar y tratar, y puede detectar la presencia de contaminantes de manejo difícil, y generar estrategias para su eliminación en fuente. Por el otro lado, el organismo de la PTAR puede buscar usuarios para las aguas tratadas que está generando, y así desarrollar estrategias para financiar el proceso de tratamiento.

Cabe señalar que incluso tratando toda el agua residual municipal e industrial (2030) y reutilizandola en diferentes áreas esto no cubriría en su totalidad la brecha prevista para el 2030, aun faltaría cubrir 14 miles de millones de metros cúbicos (Tabla 23).

Tabla 23. Brecha restante si se tratara toda el agua residual en el 2030

Agua que podría reusarse		Brecha (total en el 2030)	Brecha restante ya reutilizando el agua tratada
Agua residual municipal 2030	7.157 miles de millones de metros cúbico	23 miles de millones de metros cúbicos	13.743 miles de millones de metros cúbicos
Agua residual industrial 2030	2.1 millones de metros cúbicos		
Total de agua residual	9.257 miles de millones de metros cúbicos		

- **Reúso municipal**

En este caso se deberán distinguir dos niveles de calidad: el que requiere de una muy buena calidad (consumo humano) y el segundo que requiere una calidad de bajo nivel, en este caso podemos aprovechar el agua residual para:

- El riego de áreas verdes, como parques, terrenos de golf, y el riego de jardines tanto públicos como privados. El principal factor de control es la prevención del contacto humano durante la etapa de riego
- Control de incendios, esta es una opción sencilla de reúso, ya que incluso se podría utilizar el agua residual sin tratar, sin embargo lo que concierne al sistema de distribución y almacenamiento representaría problemas por el taponamiento. Una opción sería tratar el agua y distribuirla en tanques-cisterna

- Lavado de autos y camiones recolectores de basura
- Consumo humano. Solo si es posible garantizar una calidad elevada del agua (potable).
- **Recarga de acuíferos con agua tratada**

Para poder llevar a cabo un proyectos de recarga de acuíferos, es necesario hacer un estudio detallado del suelo dependiendo de cada zona del país. En la figura 32 se muestra la ubicación de las delegaciones y municipios en relación con las unidades geológicas de la Cuenca de México y la tabla 24 describe las formaciones geológicas (de la cuenca de México), las cuales son de especial interés para el diseño de estrategias para la recarga intencional.

Tabla 24. Unidades hidrogeológicas del acuitardo superior y el acuífero superior, con sus características y potencial para la recarga⁴⁸

Clasificación hidrogeológica	Litología	Características	Potencial p/recarga (Porosidad eficaz) Tasa de extracción
Acuitardo superior	Arcilla lacustre.	Antiguo lecho lacustre. Profundidad entre 5-40 metros. En proceso de compactación y agrietamiento por desecación. La infiltración puede tardar 100 años	Baja (3%)
Acuífero superior: Principal fuente de agua subterránea en la Cuenca	Depósitos aluviales (del Cuaternario): Aflora en los suelos agrícolas de la planicie y subyace la capa de arcilla ocupada por la zona urbana.	Compuesto de arenas y gravas, intercaladas con lavas y piedras arrojadas por las emisiones volcánicas. Flujo simple entre materiales granulares. Gran parte de los pozos metropolitanos extraen de esta unidad, la cual sufre de un severo abatimiento, excepto en la zona de las presas. El agua recargada en esta zona puede ser recuperada con relativa rapidez, con poca mineralización	Alta (22%) Tasa de extracción: 30-60 lps Recarga local
	Vulcanitas del Cuaternario sierras Chichinautzin, Santa Catarina, y cerros como Chapultepec	Compuesto de piroclastos y lavas; permeabilidad por fracturas. Los pozos extraen del pie de monte bajo y la planicie aluvial. El agua recargada puede ser recuperada rápidamente, sin mineralización	Muy alta (35%) Tasa de extracción: 50-140 lps Recarga local
	Formación Tarango Pie de monte de las sierras Nevada y Las Cruces	Depósitos en pendiente compuestos de pómez, lahares, cenizas, suelos, gravas, arena, al pie de las sierras. Flujo simple, entre materiales granulares. El agua recargada puede ser recuperada con relativa rapidez, con poca mineralización	Alta (18%) Tasa de extracción: 12-30 lps Recarga local
	Rocas ígneas del Cuaternario sierras Nevada, Río Frío, Las Cruces	Transmiten agua hacia la planicie a través de fracturas. El agua recargada sólo es recuperada en décadas ó siglos, con altos contenidos de minerales	Muy alta (35%) Recarga regional
	Vulcanitas del Plioceno Sierra de Xochitepec y la base de Sierra de Guadalupe	Porosidad por fracturas. El agua recargada sólo es recuperada años después, con moderada mineralización	Alta (30%) Recarga subregional
Acuitardo medio	Depósitos lacustres del Plioceno	Arcillas intercaladas con lavas; Espesor máx. 300 m; Por compresión, son más impermeables que arcillas superficiales	Muy baja

⁴⁸ Adaptado de Custodio y Llamas, 1983/ Repensar la Cuenca

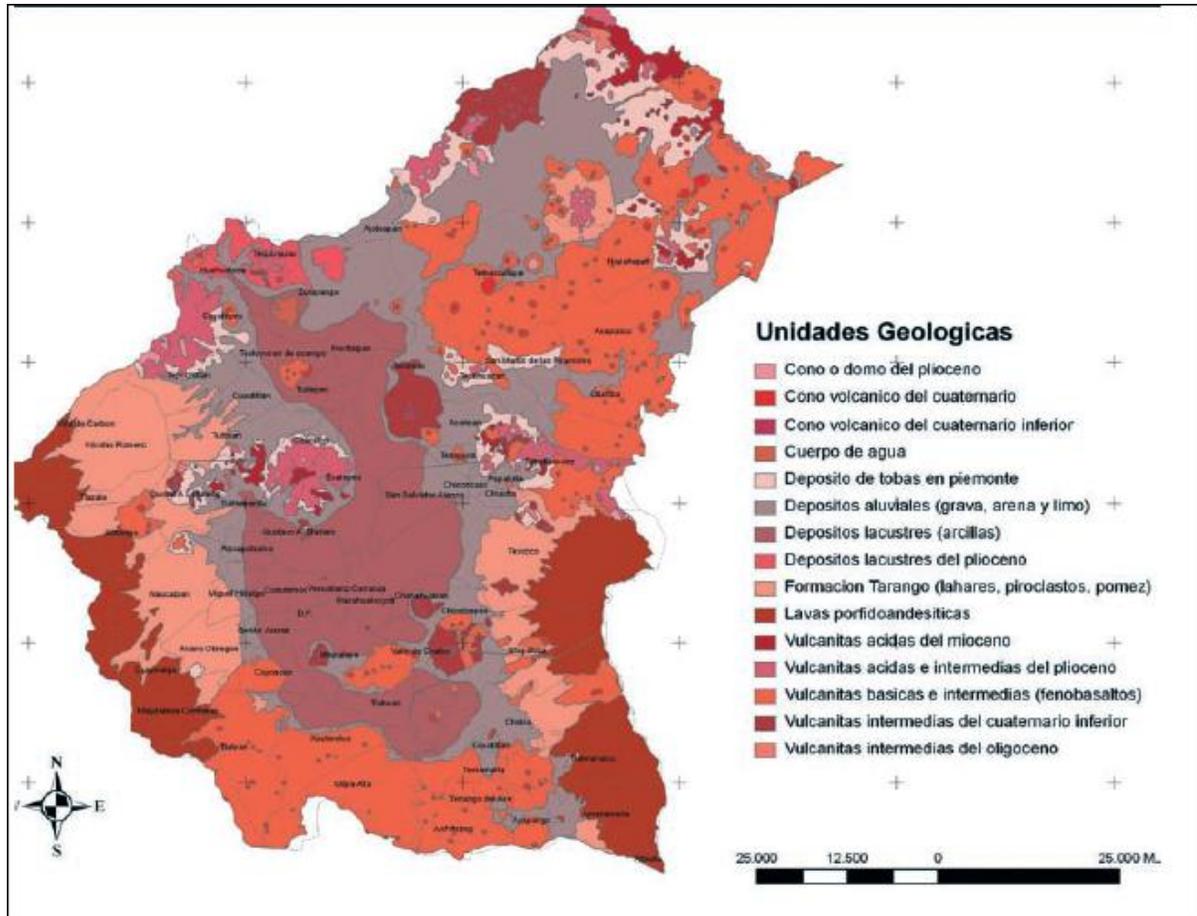


Figura 32. Ubicación de municipios y delegaciones en relación con las unidades geológicas de la Cuenca de México⁴⁹

También es importante tener claro que los retos para el éxito de estas estrategias depende de la capacidad técnica de garantizar la calidad del agua a ser manejada (Cualquier daño a la calidad del agua del acuífero sería prácticamente irreversible), y la capacidad social de lograr la aceptación por parte del público.

Algunas estrategias que ayudarían a la recuperación de los acuíferos podrían ser:

- Recarga mediante riego agrícola

⁴⁹ Monroy, 2009.

- Sustitución de agua subterránea, con aguas tratadas, para usos agrícolas
 - Sustituir el uso de agua no tratada con aguas tratadas
 - Lagunas de infiltración con aguas tratadas
 - Recarga vía inyección de aguas tratadas
-
- **Reúso de agua tratada en la agricultura**

Esta práctica no es nueva en nuestro país, pero, debe tomarse en cuenta que el agua tenga una calidad adecuada para los diferentes tipos de cultivos, es decir, si son cosechas de consumo humano o de ornamento. En el 2010 se registran que México tiene una superficie de riego agrícola de 6.5 millones de hectáreas.

En la tabla 25 se relaciona el nivel de tratamiento requerido para diferentes tipos de cosechas donde se puede emplear el efluente.

Tabla 25. Tratamiento requerido para diferentes tipos de cultivo⁵⁰

Cultivo	California	Israel	África del Sur	Alemania	Perú
Huertos y viñedos	El efluente primario no se usa para riego por aspersión. Las frutas que caigan al suelo no pueden ser consumidas	Efluente secundario	Efluente terciario sumamente clorado. No se usa para riego por aspersión	No se usa en riego por aspersión	No tratada. Hay un periodo de 20 días entre el último riego y la recolección de la cosecha
Cosecha de granos y forraje	Efluente primario para riego por aspersión	No se permite el uso de efluentes secundarios. No es para riego de vegetales o plantas cuyos granos sean para consumo de humanos	Efluente terciario	Pretratamiento con filtración y tanques sedimentadores. Para después del riego, tratamiento biológico y cloración	Tanto para huertos y viñedos como para cosechas industriales (algodón, maíz, caña de azúcar), el efluente secundario es usado para riego de forraje pero no para pasto
Cosecha de consumo humano que son procesadas para eliminar patógenos	Para riego, por superficie, efluente primario. Para riego, el efluente es desinfectado (no más de 23 coliformes/100 mL)	Los vegetales para consumo humano no se riegan con agua tratada si no ha sido desinfectada apropiadamente (1000 coliformes / 100 mL en el 80% de las muestras)	Efluente terciario	Se permite el riego hasta cuatro semanas antes de sembrar	
Cosechas para consumo humano		Para áreas de riego no más de 2.2 coliformes/100 mL. Para riego por rocío el agua residual es filtrada y desinfectada con 10 unidades de turbiedad	Se riega con agua residual sólo las frutas que se pelan antes de comer		Papas y cereales; riego permitido en la etapa de floración

⁵⁰ Jiménez, 2001.

- **Reúso para el mejoramiento ambiental**

- Rellenar lagos y canales que tengan un propósito estético y recreativo en todo el país (tratamiento de agua seguro, dependiendo el contacto que tenga el usuario con el agua). Un ejemplo de esto es el llenado de canales y lagos en Xochimilco, Tláhuac, Chapultepec en la ciudad de México, y el actual “rescate” del Bosque de Aragón

- Rellenar fuentes de ornato

- **Cultura**

Es importante fomentar una mentalidad de ahorro de agua en la población.

Apoyar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales, (cultura emprendedora en la comunidad intelectual).

En la figura 33 se presenta un ciclo de reciclaje esperado en el futuro para poder reducir la presión en algunos acuíferos.

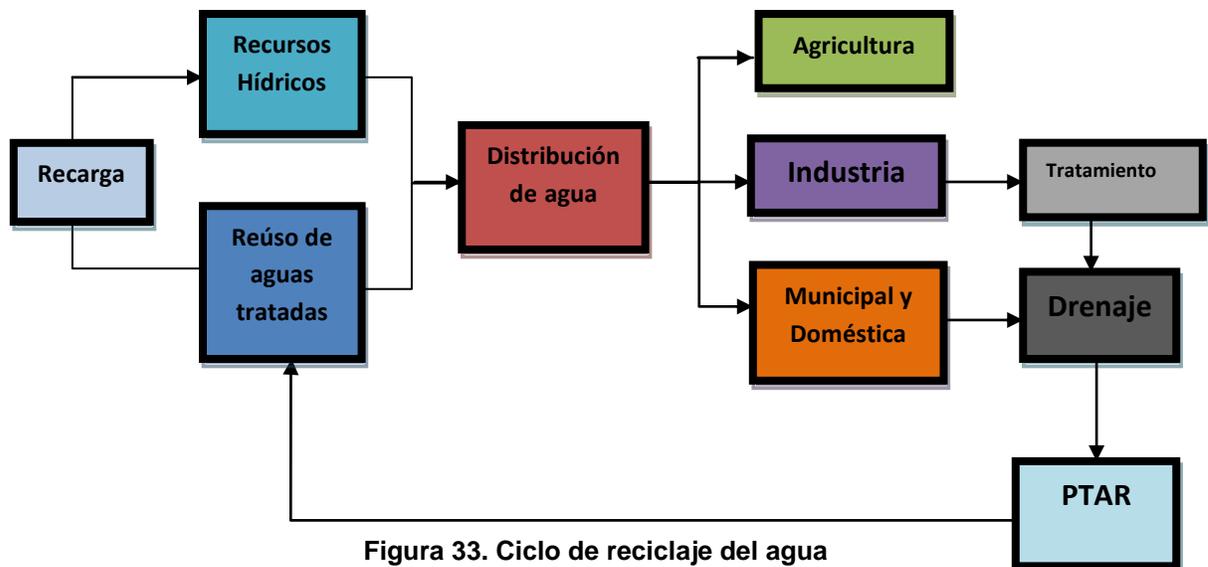


Figura 33. Ciclo de reciclaje del agua

CONCLUSIONES

Actualmente en México hay una sobreexplotación de acuíferos, de seguir así en el futuro no muy lejano (2030) tendremos un escenario de escasez de agua, puesto que la demanda de agua será mayor, debido al incremento de la población.

En el país se trata el 40% de las aguas residuales municipales por ello es necesario prestar atención a las necesidades de las plantas de tratamiento ya existentes, así como planear que las PTAR que se construyan operen de una manera eficiente, que garantice que la calidad de sus efluentes (cumplan las normas respectivas).

Es de suma importancia considerar la implementación de nuevas tecnologías de tratamiento de aguas residuales de origen doméstico que ya hayan sido probadas en otros países con resultados favorables, que nos permitan aumentar el volumen de agua tratada asegurando una buena calidad de dicha agua en nuestro país.

Se tienen que enfocar esfuerzos hacia un manejo adecuado del agua que pueda garantizar su sustentabilidad a largo plazo. Por ello una alternativa que ayudará a reducir la escasez de agua es el reúso de aguas tratadas en diferentes áreas como:

- Reúso en la agricultura.
- La inyección directa de agua tratada en los acuíferos.
- Utilización de agua tratada para regar parques y áreas verdes, como agua para las fuentes de propósito meramente decorativo.
- Reúso para el mejoramiento ambiental.

Se debe crear una conciencia de ahorro y cuidado de agua potable en la población mexicana, y desarrollar programas que fomenten la investigación en tecnologías sustentables del agua, tomando como referencia algunas estrategias empleadas por países como Israel y Alemania, que mantienen un alto porcentaje de tratamiento y reúso de aguas tratadas.

Cabe destacar que ésta propuesta enfocada al reúso las aguas residuales tratadas (tanto municipales como de origen industrial) no cubrirá del todo la brecha visualizada para el año 2030 (aún faltara por cubrir 14 miles de millones de metros cúbicos aproximadamente), será necesario la inversión enfocada a la construcción nueva infraestructura hídrica en el país.

Debe haber más propuestas que nos permitan disminuir la escasez de agua en nuestro país, sea cual sea la estrategia usada debe de implementarse cuanto antes, de otra manera las consecuencias de no actuar serán muy graves.

BIBLIOGRAFÍA.

- Comisión Nacional del Agua. 2011. *Estadísticas del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, editor. DF, México.
- Comisión Nacional del Agua. Subdirección General Técnica. “*Descarga de aguas residuales municipales y no municipales*”. (Libro de Excel). 2009. <http://www.conagua.gob.mx>.
8 de Octubre de 2012.
- Comisión Nacional del Agua. 2011. *Agenda del Agua 2030*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, editor. DF, México.
- Global Environmental Solution Ltd. “*Agua Dejémosla Limpia*” (PDF). 2009. <http://www.ges.co.il> .
12 Octubre 2012.
- AqWise Water Technologies. “*Diseño y ampliación de estaciones depuradoras de Aguas Residuales*” (PDF). 2006.
 - <http://www.aqwise.com>
 - 30 Febrero 2013.
- Poyaros, J. Marzo 2007. *Biorreactores de Membranas aplicados al tratamiento de aguas residuales Urbanas y su influencia en la calidad de agua tratada*. Tesis doctoral, Universidad de granada. España.
- United States Enviromental Protetion Agency. Septiembre 2000. *Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo libre superficial*. Autor. Washinngton D.C, USA.

- Metcalf y Eddy. 1996. *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento y reutilización*. McGraw Hill. México.
- United States Environmental Protection Agency. USA. <http://www.epa.gov>
 - 30 Febrero 2013.
- González, L. Septiembre 2006. *Estudio Comparativo de un proceso Biológico Convencional y un proceso mediante Biomembranas para el tratamiento de aguas residuales Urbanas. Proyecto de Fin de Carrera*. Universidad de Cádiz, España.
- Fondo de Población de las Naciones Unidas. “*Estado de la Población Mundial 2011*”. 2011. <http://www.unfpa.org>
 - 12 Mayo 2013.
- Monroy Hermosillo Oscar, et al. 2009. *Repensar la Cuenca, La Gestión de Ciclos del Agua en el Valle de México*. Universidad Autónoma Metropolitana. D.F, México.
- Jiménez Cisneros, Blanca E. 2001. *La contaminación ambiental en México: causas efectos y tecnología apropiada*. LIMUSA, Colegio de Ingeniería Ambiental de México A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA. México
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.2003. *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*. México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.2003. *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. México

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.2003. *Norma Oficial Mexicana NOM-003-SEMARNAT-1997, que establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas tratadas que se reusen en servicios al público. México*
- Flores Valverde, Erasmo; Breña P, Agustín, Pomarez O, Juan Manuel. 2006. *Tratar el Agua: una necesidad. Universidad Autónoma Metropolitana. DF, México.*
- Coordinación de Proyectos del Valle de México. Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. *“Programa de Sustentabilidad Hídrica de la Cuenca del Valle de México PTAR Atotonilco”.* (PDF). 2009. <http://academiadeingenieriademexico.mx>.
8 de Octubre de 2012.
- Herrera Robledo, *et al.* *Tratamiento de Agua Residual Municipal con Bio-reactores UASB de membrana: efectividad y taponeamiento.* Coordinación de Bioprocesos Ambientales, Instituto de Ingeniería, UNAM. D.F, México.
- González Braceló Óscar, González Martínez Simón y Maldonado Orozco Luis. *Tratamiento de Agua Residual Municipal utilizando Bioepelículas en suspensión.* Instituto de Ingeniería, UNAM. D.F, México.
- Restrepo Mejía Ana P, Arango Ruiz Álvaro, Gárces Giraldo Luis Fernando. 2006. *La Electrocoagulación: retos y oportunidades en el tratamiento de aguas.* Corporación Universitaria Lasallista.

- United States Environmental Protection Agency. Septiembre 2007. *Wastewater Management Fact Sheet Membrane Bioreactors*. Autor. Washington D.C, USA.
- Rosa María Arredondo Rivera, José Martín Juárez Sánchez. 2013. “*En marcha, el Humedal Artificial diseñado por la FQ*”. Gaceta Facultad de química. Enero. VIII época. D.F, México.
- Orest Zacerkowny (Noviembre de 2007). “*Membrane Technology’s 25 year evolution*”. Siemens Water Technologies.
- Degremont, 1979. *Water Treatment Handbook*. 5° edición. Halsted Press. Francia.
- Hilleboe E., Herman. 1996. *Manual de tratamiento de aguas, publicado por el Departamento de Sanidad del estado de Nueva York*. Dirección de Saneamiento del Medio Ambiente y oficina de entrenamiento profesional. LIMUSA. México.