



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y
SELECCIÓN DE TECNOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES MUNICIPALES, CONSIDERANDO ASPECTOS
TECNOLÓGICOS, AMBIENTALES Y ECONÓMICOS.**

TESIS

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

PRESENTA

ROCÍO VÉLEZ GARCÍA



MÉXICO, D.F.

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ
VOCAL: ALFONSO DURÁN MORENO
SECRETARIO: ALEJANDRO ZANELLI TREJO
1er. SUPLENTE: JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO
2do. SUPLENTE: DULCE MERARI CID LEÓN

Sitio donde se desarrolló el tema:

3er. Piso, Ala Sur Torre de Ingeniería, Ciudad Universitaria

ASESOR DEL TEMA:

Dr. Alfonso Durán Moreno

SUSTENTANTE:

Rocío Vélez García



AGRADECIMIENTOS

A mis padres por su apoyo incondicional, por instruirme en la vida y demostrarme que los sueños y la libertad se logran a través del trabajo y esfuerzo día con día.

A mis hermanos por que siempre han estado cerca de mí enseñándome a vivir y por mostrarme que la sabiduría y las ganas de vivir convierten lo imposible en una realidad.

Al Dr. Alfonso Durán que no solo compartió sus conocimientos y tiempo para finalizar un ciclo más en mi vida, también me enseñó a enfrentar los retos personales y profesionales con coraje y honor.

A la Mtra. Viridiana Vargas porque además de ser una excelente amiga me motivo y apoyo durante el desarrollo del presente trabajo.

A mis sinodales que fueron y serán siempre mis maestros, gracias por compartir sus conocimientos y tiempo en el desarrollo de esta tesis.

A mí querida Universidad Nacional Autónoma de México por todas las noches de desvelo y por ser mi casa más de 4 años, por dejarme conocer a las personas que siempre llevaré en mi corazón.

A mis amigos de la ENP No. 9, Osiris, Cintia, Tania, Alan, Estefanía, Agustín por que al día de hoy siguen estando cerca y formando parte de mi vida.



A mis amigos de la Facultad de Química, Ahiram, Chío, Naye, Tetzin, Eve, Karina, Alberto, Fernando, Jorge, y a todos los “Vagos de las rejas”, por ser inolvidables compañeros, mejor aun por dejarme conocerlos.

A mis amigos y compañeros de la Torre de Ingeniería, Akemi, Ara, Vianey, Pako, Rafa, “El Maestro” Isra, Abril, Iván, Daph, Dafne, Lulú, Manuel, Samantha, Jesús, Edna, Diana, Chucho, Pavel, Ene, Javi y a todos los integrantes de este equipo, por expresarme su cariño, apoyo y dejarme ver que la tolerancia puede unir grupos.

Y a todos aquellos que saben que los considero mis amigos, que desde lejos siguieron apoyándome hasta el día de hoy y que me comprendieron en todo momento.

Las cadenas de la esclavitud solamente atan las manos: es la mente lo que hace al hombre libre o esclavo.....

Franz Grillparzer (1791-1872)



ÍNDICE

RESUMEN.....	11
JUSTIFICACIÓN.....	12
OBJETIVO GENERAL.....	14
OBJETIVOS PARTICULARES.....	14
ESTRATEGIA DE TRABAJO.....	15
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES.....	17
1.1 Análisis de la situación hídrica de México.....	17
1.1.1 <i>Recursos hídricos en México</i>	17
1.1.2 <i>Consumo hídrico en México</i>	22
1.2 Situación actual del tratamiento de aguas residuales municipales en México.....	25
1.2.1 <i>Concepto e importancia del tratamiento de aguas residuales</i>	27
1.2.2 <i>Aspectos normativos</i>	28
1.2.3 <i>Infraestructura para el tratamiento de Aguas Residuales Municipales en México</i>	29
1.2.4 <i>Estado de aplicación de la tecnología en México</i>	32
1.2.5 <i>Infraestructura para el tratamiento de lodos en México</i>	33
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	36
2.1 Análisis de las Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales.....	36
2.1.1 <i>Características físicas, químicas y microbiológicas del agua residual municipal</i>	37
2.1.1.1 Origen.....	37
2.1.1.2 <i>Características físicas</i>	38
2.1.1.3 <i>Características químicas</i>	40
2.1.1.4 <i>Características microbiológicas</i>	43
2.1.1.5 <i>Composición típica de las aguas residuales municipales</i>	45
2.1.2 <i>Procesos típicos para el tratamiento de aguas residuales municipales</i>	46
2.1.2.1 <i>Análisis de las tecnologías empleadas en el tratamiento de aguas residuales en México</i>	49
2.1.3 <i>Análisis y estimación de costos índice para las tecnologías de tratamiento de aguas residuales municipales más utilizadas en México</i>	63
2.1.3.1 <i>Tratamiento primario avanzado</i>	63
2.1.3.2 <i>Lodos activados</i>	65
2.1.3.3 <i>Filtros percoladores</i>	69



2.1.3.4 Humedales.	69
2.1.3.5 Comparación de costos para diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales.	72
2.2 Análisis de las metodologías de selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales.	76
2.2.1 Modelo de selección de tecnología CINARA, Colombia.	76
2.2.2 Modelo de selección de tecnología UNEP.	80
2.2.3 Modelo de selección de tecnologías EPA, USA.	82
2.2.4 Modelo de selección de tecnología IRC.	84
2.2.5 Modelo de selección de tecnología Souza, Brasil.	86
2.2.6 Otros modelos de selección de tecnología.	92
2.2.7 Métodos auxiliares para la toma de decisiones en la selección de tecnologías.	92
CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.	96
3.1 Elaboración de la metodología propuesta para la selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales municipales.	97
3.1.1 Identificación y definición de los criterios de decisión para seleccionar la mejor alternativa de tratamiento de aguas residuales.	98
3.1.1.1 Criterios técnicos.	99
3.1.1.2 Criterios ambientales.	104
3.1.1.3 Criterios económicos.	105
3.1.2 Descripción de la metodología y mecanismo de calificación.	107
3.1.3 Ejemplo de la aplicación de la metodología de evaluación de alternativas y selección de la mejor alternativa tecnológica para el tratamiento de aguas residuales municipales.	124
CONCLUSIONES.	132
BIBLIOGRAFÍA.	137
ANEXOS.	142
A.1 Pretratamiento	142
A.2 Tratamientos primarios.	151
A.3 Tratamientos secundarios.	159
A.4 Tratamiento terciario.	176



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Disponibilidad media per cápita, por región Hidrológica 2007.	20
Tabla 2.	Escalas de la clasificación de la calidad del agua.	23
Tabla 3.	Descargas de aguas residuales municipales y no municipales, 2007.....	26
Tabla 4.	Normatividad Aplicable en México.	28
Tabla 5.	Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales de México, 2007.	30
Tabla 6.	Estado de aplicación de la tecnología en el tratamiento de aguas residuales en México. 32	
Tabla 7.	Principales contaminantes del agua residual municipal, efectos negativos que causan y origen.....	38
Tabla 8.	Descripción de los organismos típicos encontrados en las aguas naturales, residuales y en los procesos de tratamiento de aguas residuales.....	44
Tabla 9.	Composición del agua residual doméstica.	46
Tabla 10.	Eficiencia de remoción de contaminantes por tipo de tecnología.....	55
Tabla 11.	Comparación entre Costos de Inversión.	56
Tabla 12.	Costo de operación y mantenimiento	57
Tabla 13.	Área para su construcción	57
Tabla 14.	Complejidad de operación de la tecnología	58
Tabla 15.	Generación de olores	58
Tabla 16.	Producción de lodos	59
Tabla 17.	Datos geográficos y socioeconómicos por Entidad Federativa.	60
Tabla 18.	Ventajas y desventajas económicas para los procesos de lodos activados.....	67
Tabla 19.	Ventajas y desventajas económicas para el tratamiento de aguas residuales mediante humedales.....	71
Tabla 20.	Ecuaciones paramétricas para estimar los costos índice de inversión de tecnologías para el tratamiento de aguas (18).	72
Tabla 21.	Descripción general de la información requerida en cada nivel del modelo de selección de tecnología.....	77
Tabla 22.	Factores que influyen en la selección de tecnología para el saneamiento en una comunidad.....	84
Tabla 23.	Metodologías de análisis de decisión de para la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales.	86
Tabla 24.	Métodos de análisis de decisión con objetivos múltiples para la selección de tecnología.	94
Tabla 25.	<i>Clasificación de los criterios y subcriterios técnicos.</i>	99
Tabla 26.	Clasificación de los criterios y subcriterios económicos para la selección de una tecnología.	105



Tabla 27. Variables filtro para la elección de alternativas tecnológicas.	109
Tabla 28. Selección de alternativas tecnológicas de acuerdo al cumplimiento de la normatividad vigente, al número de habitantes y a la capacidad económica para municipios de México.	111
Tabla 29. Escala de calificación de los criterios y subcriterios.	116
Tabla 30. Ejemplo de asignación de ponderaciones para los criterios de selección.	117
Tabla 31. Criterios y subcriterios técnicos que se evaluarán.	118
Tabla 32. Criterios y subcriterios ambientales que se evaluarán.	120
Tabla 33. Criterios y subcriterios económicos que se evaluarán.	121
Tabla 34. Disponibilidad Tecnologías propuestas para el tratamiento de agua para un caso ejemplo.	125
Tabla 35. Escala de calificación.	125
Tabla 36. Criterios y subcriterios técnicos para la evaluación de alternativas tecnológicas de tratamiento biológico.	126
Tabla 37. Criterios y subcriterios ambientales para la evaluación de alternativas tecnológicas de tratamiento biológico.	128
Tabla 38. Criterios y subcriterios económicos para la evaluación de alternativas tecnológicas de tratamiento biológico.	129
Tabla 39. Tabla resumen de los puntajes obtenidos en cada evaluación para los procesos propuestos.	130
Tabla 40. Clasificación del tipo de rejillas de acuerdo a su abertura.	143
Tabla 41. Contaminantes removidos por tipo de desarenador.	147
Tabla 42. Clasificación de las tecnologías de tratamiento secundario.	160
Tabla 43. Rendimiento de eliminación del constituyente para lodos activados.	162
Tabla 44. Eficiencia de remoción de zanjas de oxidación.	164
Tabla 45. Eficiencia de remoción de los filtros percoladores(7).	169
Tabla 46. Tasas de remoción de DBO₅ para los tipos de filtros(24).	170
Tabla 47. Principales microorganismos removidos en el proceso de desinfección(29).	181



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo empleada.....	16
Figura 2. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México (millones de metros cúbicos, hm ³).....	18
Figura 3. Variación de la disponibilidad natural media per cápita del agua, de 1950 a 2005 (m ³ /hab/año).....	19
Figura 4. Acuíferos sobreexplotados en México al 2007.....	22
Figura 5. Distribución porcentual de los volúmenes concesionados para usos consuntivos en 2007.	24
Figura 6. Reúso de agua residual municipal y no municipal, 2007.	27
Figura 7. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, 2007. 31	
Figura 8. Alternativas planteadas para tratamiento y disposición de lodos (5).	34
Figura 9. Origen y flujos del agua residual en un ambiente urbano.	37
Figura 10. Dimensiones de los sólidos suspendidos, coloidales y disueltos.	39
Figura 11. Clasificación de los Procesos típicos de tratamiento de aguas residuales municipales.....	48
Figura 12. Costos de inversión con respecto al caudal de aguas residuales tratadas.	73
Figura 13. Costos de inversión con respecto al caudal de aguas residuales tratadas.	74
Figura 14. Comparación de costos de inversión con respecto al caudal de aguas residuales tratadas.....	75
Figura 15. Estructura del Modelo conceptual de Selección de Tecnología(19).....	79
Figura 16. Selección de la tecnología de tratamiento según el origen del agua residual.	82
Figura 17. Etapas y consideraciones para la selección del tren de tratamiento de aguas residuales. 83	
Figura 18. Diagrama de Flujo de la metodología propuesta.	123
Figura 19. Esquema de Cribado.....	142
Figura 20. Planta de un desarenador de doble canal.....	146
Figura 21. Vista en planta de un tanque desarenador a nivel constante.....	146
Figura 22. Trayectoria del agua y las partículas en un desarenador aireado.	147
Figura 23. Desarenadores tipo vórtice: a) Unidad PISTA (de Smith & Loveless) y b) Unidad taza de té (de Eutek).....	147
Figura 24. Esquema de un Sedimentador rectangular.....	152
Figura 25. Esquema de un Sedimentador circular.....	152
Figura 26. Esquema de la remoción de contaminantes mediante la dosificación de agentes coagulantes.....	153
Figura 27. Esquema de la separación de contaminantes por flotación.....	155
Figura 28. Flotador por aire disuelto (DAF).	156



Figura 29. Variantes del tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales.....	158
Figura 30. Esquema del proceso de lodos activados.....	161
Figura 31. Esquema del proceso de lodos activados (zanjas de oxidación).	164
Figura 32. Proceso de lodos activados con biopelícula integrada	166
Figura 33. Materiales de soporte o empaques empleados en sistemas de lecho empacado (Aqwise, año).	166
Figura 34. Sistemas más comunes de filtros percoladores(14).	169
Figura 35. Filtro percolador típico.	169
Figura 36. Diferentes arreglos de humedales. De arriba hacia abajo, humedales de tipo superficial, subsuperficial y flotantes(17).....	172
Figura 37. Esquema de proceso que incluye el uso de humedales(23).	172
Figura 38. Partes constitutivas de un reactor UASB.	174
Figura 39. Esquema de proceso.	174
Figura 40. Diagrama del proceso de desinfección con cloro	177
Figura 41. Diagrama del proceso de desinfección con ozono.....	178
Figura 42. Diferentes arreglos de lámparas UV.....	178
Figura 43. Esquema del proceso típico de tratamiento de aguas residuales municipales con desinfección.	181



RESUMEN

Para proporcionar una solución efectiva a la problemática actual en materia de tratamiento de agua residual, es necesario fortalecer los mecanismos de decisión que integran los procesos para la ejecución de proyectos de tratamiento de aguas residuales mediante el desarrollo de instrumentos que faciliten la toma de decisiones para seleccionar la tecnología adecuada y responder a las necesidades en el manejo, tratamiento y disposición final del agua residual generada por la población, considerando las características económicas y de desarrollo social de las diferentes regiones del país.

Con base en la revisión de otros trabajos relacionados con la selección de tecnologías y el análisis de los procesos de mayor aplicación en el país para el tratamiento de aguas residuales, se identificaron los criterios e indicadores tecnológicos, ambientales y económicos que influyen directamente en la selección de tecnologías viables de emplearse en México, a partir de lo anterior se diseñó una metodología para garantizar una adecuada selección de tecnología para una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) municipal desde la planeación hasta su correcta operación cumpliendo con el marco normativo ambiental para satisfacer las necesidades de la población y por tanto, facilitar el desarrollo de soluciones a la problemática actual en materia de tratamiento de agua residual.

La propuesta metodológica está fundamentada científica y tecnológicamente para la solución integral a un problema específico, usando para ello herramientas y recursos documentales actualmente disponibles.



JUSTIFICACIÓN

A partir del análisis de la situación actual en México en materia del tratamiento de agua residual municipal, es evidente que la disponibilidad de agua condiciona la posibilidad de desarrollo de algunas regiones del país y su calidad es factor determinante para la salud y bienestar de la población, aunado a esto, el consumo de agua proveniente de fuentes hidrológicas naturales se ha incrementado en los últimos años y sólo el 38.3% del agua residual generada y colectada en los sistemas municipales de alcantarillado del país es tratada(1), es importante señalar que lo anterior tiene un impacto significativo en la economía del país, ya que al no darle un tratamiento adecuado al agua residual generada se incurre en costos que equivalen a los gastos que realiza la sociedad para remediar, restituir o prevenir la contaminación de cuerpos receptores provocada por el agua residual sin tratamiento. Por ello surge la necesidad de facilitar la selección de tecnologías que cumplan con los requerimientos para el tratamiento de aguas residuales de una forma eficaz, para su posterior disposición o reúso.

El propósito del presente trabajo consiste en desarrollar una metodología para la selección de las tecnologías para el tratamiento de agua residual municipal, mediante la identificación y evaluación de aspectos tecnológicos, ambientales y económicos, ya que los conceptos anteriores son los principales parámetros de comparación entre una tecnología y otra, y por la relación existente con la solución a la problemática de tratamiento de aguas residuales también son fundamentales en una evaluación para elegir la mejor alternativa tecnológica de acuerdo a las características específicas de un determinado municipio en el que se construirá una Planta de Tratamiento de Agua Residual.

Con base en una investigación bibliográfica de las metodologías de selección de tecnología y del análisis de los procesos establecidos de aplicación actual para el tratamiento de agua residual, se determinaron criterios e indicadores técnicos, ambientales y económicos que se utilizan como elementos principales de un sistema de evaluación, que asegura el cumplimiento de normatividad aplicable.



La selección correcta de tecnología tiene como resultado la disminución de la contaminación y el incremento en el volumen y calidad del agua para reúso al garantizar el cumplimiento con la normatividad para las descargas en cuerpos de agua, además de resolver problemas de abastecimiento de agua y explotación de fuentes hidrológicas naturales, desde el punto de vista económico se obtendrá una tecnología con un costo de inversión y rentabilidad adecuadas a las condiciones de un municipio agilizando al mismo tiempo la estimación de resultados de estudios financieros y económicos, necesarios para desarrollar un proyecto de construcción de una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

El presente documento es concebido como un mecanismo de selección para el desarrollo de proyectos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales municipales, y está sustentado en los aspectos analizados en todo el presente trabajo.



OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una metodología para evaluar y seleccionar tecnologías de tratamiento de agua residual municipal aplicables a situaciones específicas de diferentes municipios en México, considerando aspectos ambientales, tecnológicos y económicos.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Elaborar un diagnóstico documental de la situación actual en el tratamiento de aguas residuales municipales en México.
- Identificar las tecnologías existentes y viables que se aplican a nivel nacional e internacional en materia de tratamiento de agua residual municipal. Para obtener las bases técnicas, ambientales y económicas para tomar una decisión en la selección de las alternativas de tratamiento de aguas residuales que por estar institucionalizadas y disponibles en el país puedan ser consideradas como tecnologías para resolver la problemática actual en cualquier municipio de la República Mexicana.
- Analizar las metodologías para la evaluación y selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales municipales.
- Definir los criterios de selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales.
- Formulación de una metodología para la selección de una tecnología específica en la solución de un problema actual de tratamiento de aguas residuales municipales con el fin de facilitar la evaluación y toma de decisión sobre la tecnología a implementar.
- Realizar un análisis y estimación de costos por tipo de tecnología de tratamiento de agua residual municipal.



ESTRATEGIA DE TRABAJO

Como primera actividad para la elaboración de este trabajo se analizó la situación actual en materia de recursos hídricos, se consideró la disponibilidad y demanda de agua para el desarrollo del país, posteriormente se revisó la normatividad vigente en materia de descargas y reúso de agua residual tratada, así como la infraestructura actual existente en México para el tratamiento integral del agua residual municipal: el resultado de esta primera etapa del desarrollo del presente trabajo fue la identificación de la necesidad de creación de un proceso constituido por etapas de evaluación para hacer más eficaz la selección de tecnologías para solucionar la problemática actual en lo concerniente a la planeación de nuevas Plantas de Tratamiento de Agua Residual Municipal. En una segunda etapa se analizaron las metodologías existentes para la selección de una tecnología, al mismo tiempo se evaluaron las tecnologías de mayor aplicación en México, con el fin de obtener los principales aspectos tecnológicos, ambientales y económicos que influyen en la elección de la mejor tecnología. Como etapa final se presenta la propuesta del diseño de una metodología fundamentada con base en los criterios de selección resultado del análisis de las metodologías existentes y de los parámetros y características principales que influyen directamente en el funcionamiento eficiente de cada una de ellas, identificados en la evaluación tecnológica que se llevó a cabo en la etapa anterior.

El siguiente diagrama muestra las actividades desarrolladas para la elaboración del presente trabajo.

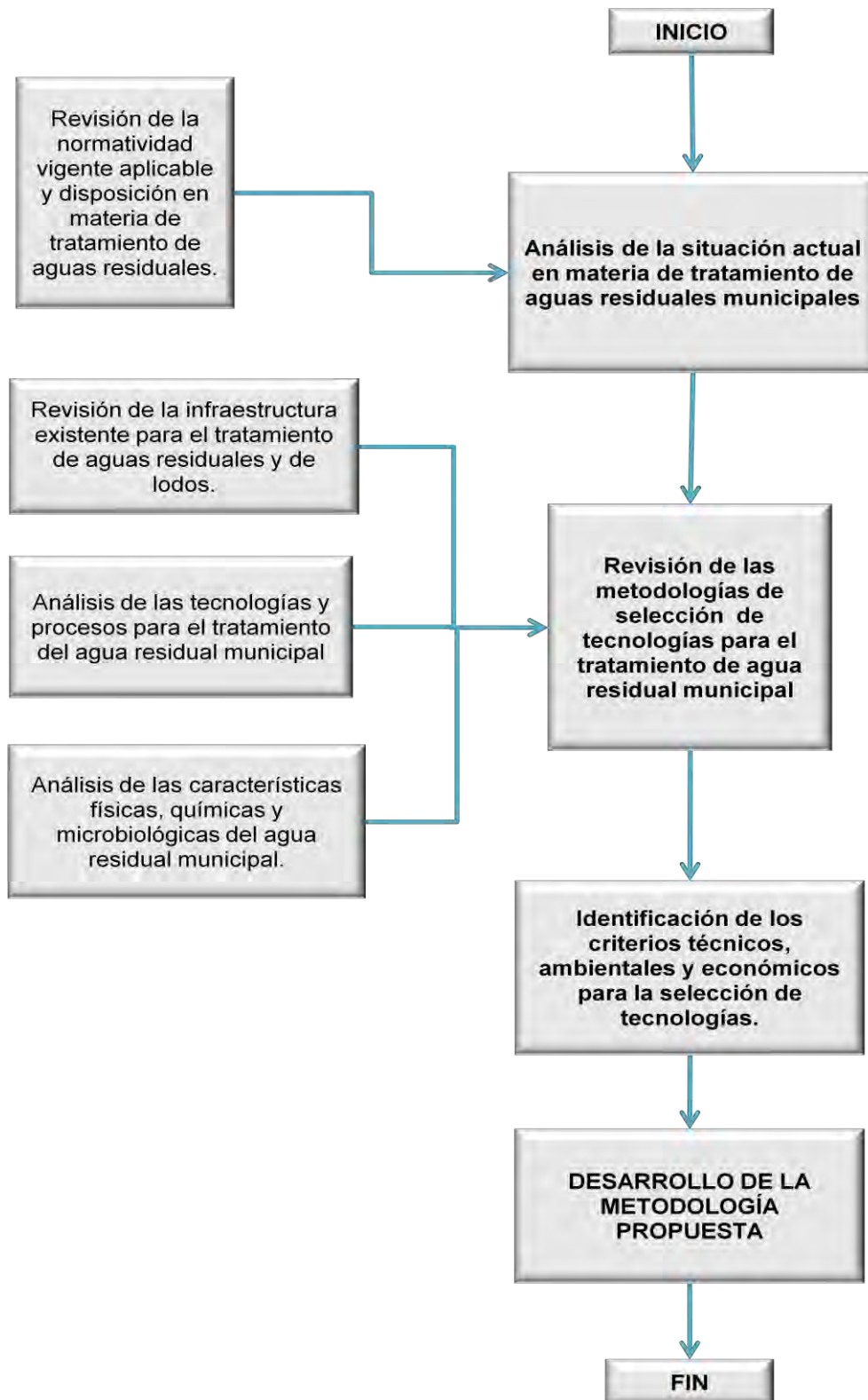


Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología de trabajo empleada.



CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

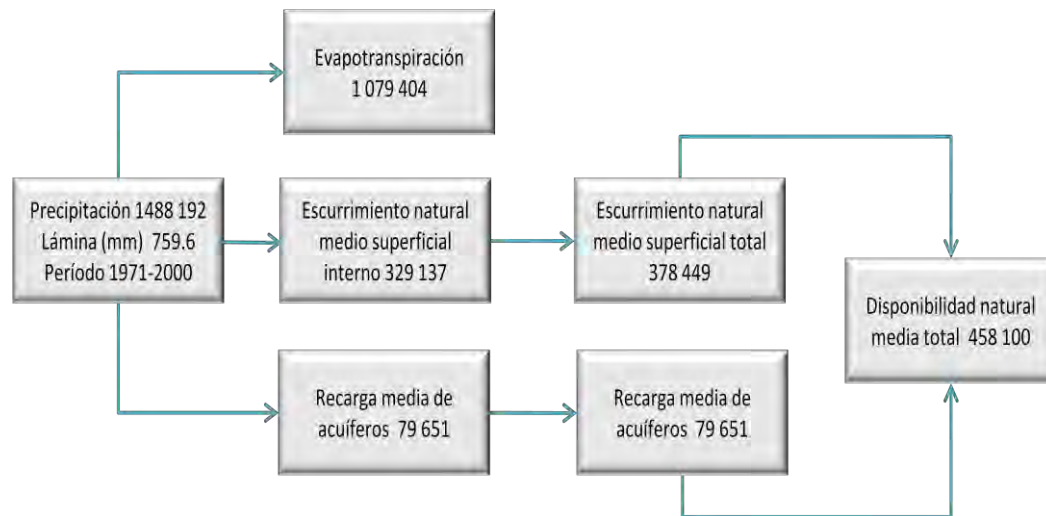
Existen múltiples factores que influyen directamente en la necesidad de tratar el agua residual con el objetivo de disminuir la contaminación de este recurso y reutilizarla; en este capítulo se mencionan algunos de estos factores como ejemplo, la disponibilidad de agua por habitante, los acuíferos sobreexplotados, la situación de sequía en algunas zonas del país, la demanda de agua por habitante, los diferentes usos del agua, así como un panorama general de la situación actual y la infraestructura para el tratamiento de aguas residuales municipales y la disposición de lodos en México.

1.1 Análisis de la situación hídrica de México

1.1.1 Recursos hídricos en México

México cuenta con una red hidrográfica de 633 mil kilómetros; constituida principalmente por ríos y arroyos, de los que destacan 50 ríos principales por los que fluye el 87% del escurrimiento superficial del país y cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie de la extensión territorial nacional.

La República Mexicana recibe un orden de 1488 miles de millones de metros cúbicos al año de agua en forma de precipitación, de los cuales el 72% se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 25.4% escurre por los ríos o arroyos y el 2.1% restante se infiltra al subsuelo recargando los mantos freáticos (1). Por tanto se considera que anualmente el país cuenta con tan solo 458 mil millones de metros cúbicos de agua dulce, que es a lo que se conoce como disponibilidad natural media. En la se puede observar cómo se encuentra distribuida la disponibilidad natural media en el país.



FUENTE: Elaboración propia a partir de datos de CONAGUA, 2008.

Figura 2. Valores medios anuales de los componentes del ciclo hidrológico en México (millones de metros cúbicos, hm³).

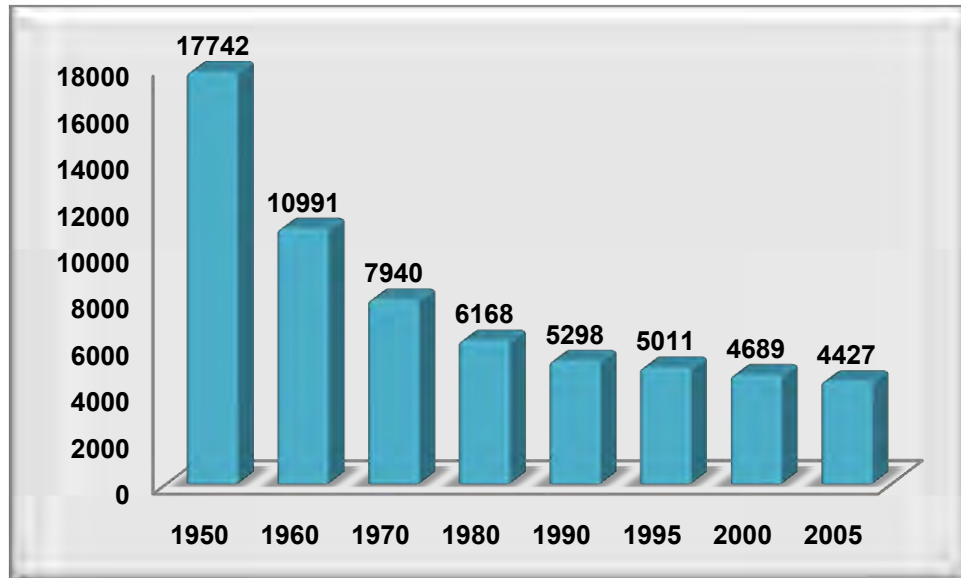
Para conocer la disponibilidad de agua se lleva a cabo un análisis tomando en cuenta tres aspectos:

1. Distribución temporal, debida principalmente a que en México existen grandes variaciones en la disponibilidad de agua a lo largo del año.
2. Distribución espacial, ya que algunas regiones del país tienen precipitación abundante y baja densidad de población, mientras que en otras ocurre lo contrario.
3. Área de análisis, principalmente debido a que el problema del agua es predominante de tipo local. Los indicadores calculados a gran escala esconden las fuertes variaciones que existen a lo largo y ancho del país.

Existen algunas regiones del país, en donde el valor de la disponibilidad natural media *per cápita* es preocupantemente bajo como por ejemplo en el Valle de México en donde la disponibilidad de agua por habitante por año es de 3,008 m.l.m³/ año.



De 1950 al 2007 la disponibilidad natural media *per cápita* ha disminuido de 18,035 m³/hab*año a tan solo 4, 312 m³/hab*año en el 2007 como se observa en la Figura 3, debido principalmente al crecimiento poblacional.



FUENTE: Elaboración propia con datos reportados en "Estadísticas del agua", CONAGUA (2008).

Figura 3. Variación de la disponibilidad natural media per cápita del agua, de 1950 a 2005 (m³/hab/año).

El volumen anteriormente enunciado, se considera peligroso en años de precipitación escasa, ya que no sólo se cubren los requerimientos de los habitantes, sino también los requerimientos de demanda de líquido de los ecosistemas naturales.

En la Tabla 1 se puede observar la disponibilidad natural per cápita por región hidrológica(1)¹.

¹ La CONAGUA para llevar a cabo un mejor control de los recursos hídricos del país ha clasificado todo el territorio nacional en 13 regiones hidrológico-administrativas.



Tabla 1. Disponibilidad media per cápita, por región Hidrológica 2007.

Región Hidrológico-Administrativa	Disponibilidad natural media total (m.ll.m ³ /año)	Población a dic. de 2007 (millones de habitantes)	Disponibilidad natural media per cápita 2007 (m ³ /hab/año)	Escorrentamiento natural medio superficial total (m.ll.m ³ /año)	Recarga media total de acuíferos (m.ll.m ³ /año)
Península de Baja California	4616	3.58	1289	3367	1249
Noroeste	8204	2.57	3192	5074	3130
Pacífico norte	25627	3.96	6471	22364	3263
Balsas	21651	10.54	2055	17057	4601
Pacífico sur	32794	4.12	7960	30800	1994
Río bravo	12024	10.7	1124	6857	5167
Cuencas centrales del norte	7780	4.12	1888	5506	2274
Lerma-Santiago-pacífico	34037	20.63	1650	26351	7686
Golfo norte	25500	4.94	5162	24227	1274
Golfo centro	95455	9.58	9964	91606	3849
Frontera sur	157754	6.5	24270	139739	18015
Península de Yucatán	29645	3.9	7603	4329	25316
Aguas del Valle de México	3008	21.09	143	1174	1834
Total	458100	106.23	4312	378449	79651

FUENTE: Elaboración propia con datos de CONAGUA (2007).

En la tabla anterior se observa que algunas regiones del país cuentan con una disponibilidad de agua baja, por lo que se identifican aquellas regiones en las que se debe dar prioridad al tratamiento de aguas residuales con el objetivo de reutilizar el agua tratada.

Otro aspecto a considerar para el reúso del agua son las regiones del país que sufren de sequías moderadas hasta sequías severas estas condiciones se intensifican en el norte de México, en estas regiones el tratamiento retoma importancia.

En México se estima una extracción de 27,000 m³/año de los más de 650 acuíferos registrados. En el caso de las aguas subterráneas, su importancia queda de manifiesto por la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios; cerca del 37% (28.9



miles de millones de m³/año) del volumen total concesionado para usos consuntivos, es de origen subterráneo. Para fines de administración del agua subterránea, el país se ha dividido en 653 acuíferos, cuyos nombres oficiales fueron publicados en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 5 de diciembre del año 2001.

A partir de la década de los setenta, ha venido aumentando sustancialmente el número de acuíferos sobreexplotados, 32 en 1975, 36 en 1981, 80 en 1985, 97 en 2001, 102 en 2003 y 104 en el 2006. Sin embargo, en el año 2007 se redujo el número a 101. De éstos se extrae el 58% del agua subterránea para todos los usos.

Según datos del *Inventario del 2008 de Recursos de Aguas Superficiales y Subterráneas*, actualmente México enfrenta graves problemas de sobre explotación de los acuíferos (ver Figura 4), y cuenta con menos de 282 acuíferos con disponibilidad de agua subterránea.

La disponibilidad de agua dulce a la que tiene acceso la población es muy poca y cada vez es menor debido a la sobre explotación de los cuerpos de agua los problemas de contaminación del agua en toda la República Mexicana y al cambio climático global. Por tal motivo la administración y la preservación del recurso hídrico es una tarea compleja que requiere del trabajo de las dependencias federales, estatales y municipales, así como de la sociedad en general, cuyas acciones tendrán repercusiones en el presente y en el futuro del país.



FUENTE: Elaboración propia con datos de CONAGUA (2008).

Figura 4. Acuíferos sobreexplotados en México al 2007

1.1.2 Consumo hídrico en México

Para que un agua pueda clasificarse como potable la calidad de la misma debe cumplir con las especificaciones marcadas en la NOM-021-SSA1-Modif 2000. Las fuentes para la producción de agua potable son principalmente de tipo subterráneo y superficial; en menor medida se pueden mencionar como fuentes potenciales de agua potable el agua de mar y el agua de lluvia. El ser humano puede consumir agua, siempre y cuando conozca la calidad que presenta, por esta razón se realiza una evaluación de la calidad del agua utilizando tres indicadores principales: la Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST).

Tanto la DBO_5 como la DQO se utilizan para indicar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua provenientes principalmente de las descargas de aguas residuales, de origen municipal y no municipal (Tabla 2).



Tabla 2. Escalas de la clasificación de la calidad del agua.

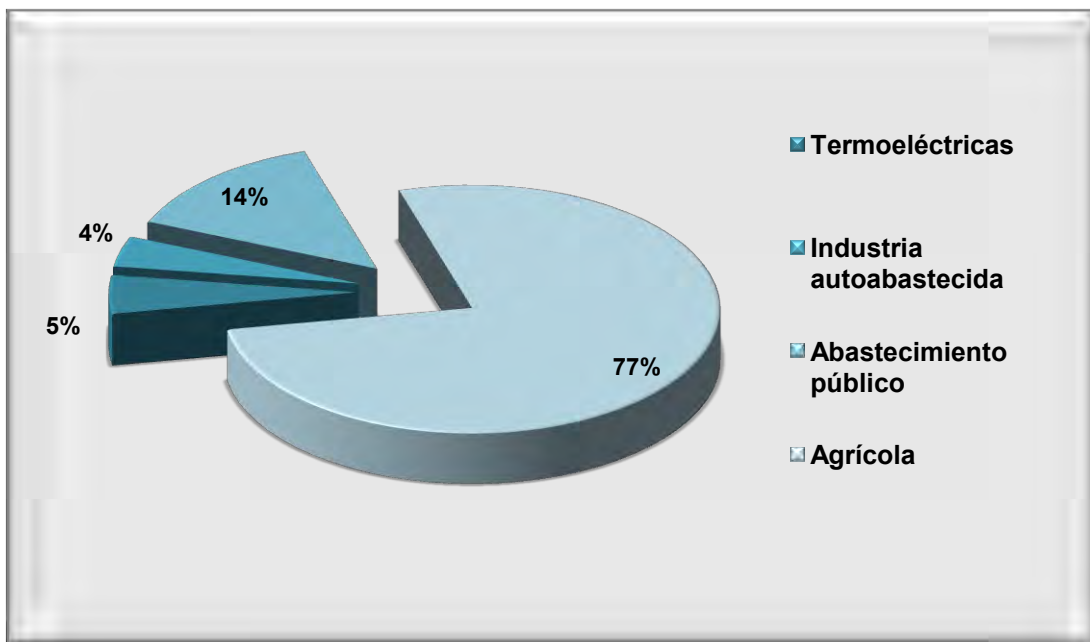
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	
Criterio	Clasificación
mg/L DBO ₅ ≤ 3	Excelente No contaminada
3 < DBO ₅ ≤ 6	Buena Calidad Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable
6 < DBO ₅ ≤ 30	Aceptable Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente
30 < DBO ₅ ≤ 120	Contaminada aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal
DBO ₅ > 120	Fuertemente contaminada Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	
DQO ≤ 10	Excelente No contaminada
10 < DQO ≤ 20	Buena Calidad Aguas superficiales con bajo contenido de materia orgánica biodegradable
20 < DQO ≤ 40	Aceptable Con indicio de contaminación. Aguas superficiales con capacidad de autodepuración con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente
40 < DQO ≤ 200	Contaminada Aguas superficiales con descargas de aguas residuales crudas, principalmente de origen municipal
DQO > 200	Fuertemente contaminada Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales
Sólidos Suspendedos Totales (SST)	
SST ≤ 25	Excelente Clase de excepción, muy buena calidad
25 < SST ≤ 75	Buena Calidad Aguas superficiales con bajo contenido de sólidos suspendidos, generalmente condiciones naturales. Favorece la conservación de comunidades acuáticas y el riego agrícola irrestricto



75<SST≤150	Aceptable Aguas superficiales con indicio de contaminación. Con descargas de aguas residuales tratadas biológicamente. Condición regular para peces. Riego agrícola restringido
150<SST≤400	Contaminada Aguas superficiales de mala calidad con descargas de aguas residuales crudas. Agua con alto contenido de material suspendido
SST>400	Fuertemente contaminada Aguas superficiales con fuerte impacto de descargas de aguas residuales crudas municipales y no municipales con alta carga contaminante. Mala condición para peces.

FUENTE: Elaboración propia a partir de datos de CONAGUA (2008).

El Conocer la calidad que presenta cierto cuerpo de agua permite indicar el uso que se puede hacer de éste; en México se tiene clasificados 12 usos en el Registro Público de Derechos de Agua, éstos se han agrupado en cinco usos; agrícola, abastecimiento público, industria autoabastecida, termoeléctricas e hidroeléctricas. Se indican por uso, entre otros aspectos, los volúmenes concesionados, así como la fuente de extracción, tanto de agua superficial como subterránea (ver Figura 5).



FUENTE: Elaboración propia a partir de los datos de CONAGUA (2008).

Figura 5. Distribución porcentual de los volúmenes concesionados para usos consuntivos en 2007.



Finalmente existe un tercer aspecto que hay que considerar éste es el grado de presión² sobre el recurso hídrico por Región, donde se observa que casi dos terceras partes del territorio del país ya se encuentran sometidas a una fuerte presión.

Se considera que si el porcentaje es mayor al 40%, se ejerce una fuerte presión sobre el recurso.

El país en su conjunto experimenta un grado de presión del 17%, lo cual se considera de nivel moderado; sin embargo, la zona centro, norte y noroeste del país experimentan un grado de presión del 47%, lo cual se considera como presión fuerte sobre el recurso.

El ser humano para satisfacer sus necesidades y llevar a cabo actividades cotidianas, requiere de una gran cantidad de agua, aunado al grado de presión que actualmente tienen algunas zonas de México, se deben tomar medidas para incrementar el aprovechamiento de los recursos hídricos del país, mediante el tratamiento de agua residual municipal para reuso.

1.2 Situación actual del tratamiento de aguas residuales municipales en México.

En México la perspectiva actual de la situación del tratamiento de aguas residuales municipales en el país toma como punto de inicio las descargas de agua residual, ya que a partir de esta situación se origina la necesidad de tratar el agua residual.

Las descargas de aguas residuales se clasifican en municipales e industriales. Las primeras corresponden a las que son manejadas en los sistemas de alcantarillado municipal, urbano y rural, en tanto que las segundas son descargadas a los cuerpos receptores de propiedad nacional.

² El grado de presión es definido como el porcentaje que representa el agua utilizada para usos consuntivos respecto a la disponibilidad total del agua en el país.



La siguiente Tabla 3 muestra las descargas de aguas residuales municipales en el año 2007.

Tabla 3. Descargas de aguas residuales municipales y no municipales, 2007.

Descargas de aguas residuales municipales y no municipales, 2007		
Centros urbanos (descargas municipales)		
Aguas residuales	7.66	km ³ /año (243 m ³ /s)
Se colectan en alcantarillado	6.53	km ³ /año (207 m ³ /s)
Se tratan	2.5	km ³ /año (79.3 m ³ /s)
Se generan	2.07	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se recolectan en alcantarillado	1.76	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	0.53	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Usos Industriales (no municipales)		
Aguas residuales	5.98	km ³ /año (188.7 m ³ /s)
Se tratan	0.94	km ³ /año (29.9 m ³ /s)
Se generan	6.95	millones de toneladas de DBO ₅ al año
Se remueven en los sistemas de tratamiento	1.1	millones de toneladas de DBO ₅ al año
NOTA: DBO₅ Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 Días 1km³=1000 hm³=mil millones de m³		

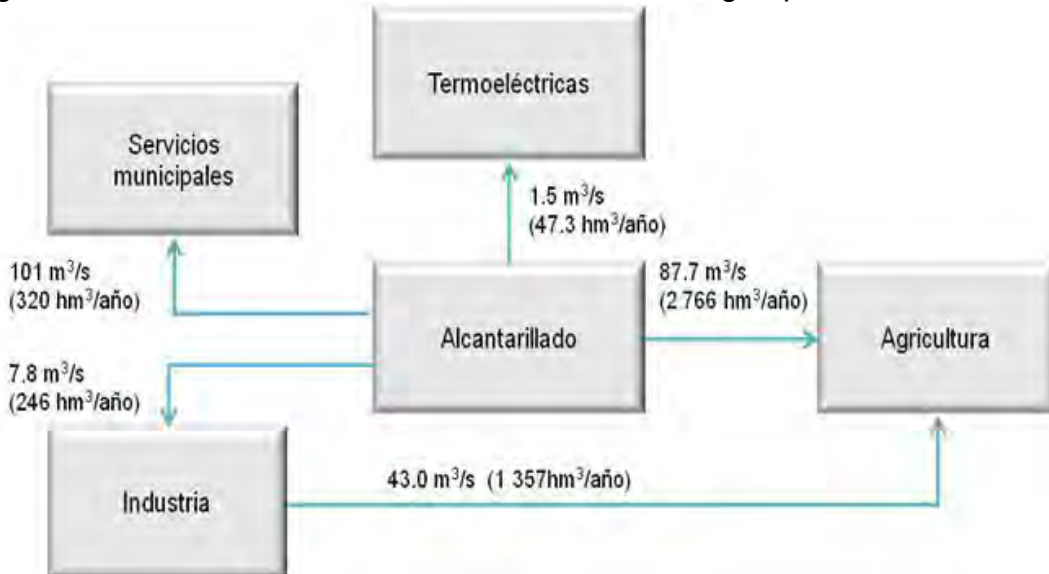
FUENTE: CONAGUA. Subdirección General de Agua Potable y Drenaje y Saneamiento y Subdirección General Técnica (2008).

Como se observa en la Figura 6 solo 2.5 de 7.66 km³/año de aguas residuales municipales en México son tratadas, esta cifra indica que menos del 50% de las aguas generadas son para reúso, debido a que no se les da un tratamiento adecuado. Sin embargo se estima que en el año 2007 en México se reutilizaron 4,722 millones de metros cúbicos de agua (equivalente a un caudal de 150 m³/s).

En el reúso del agua residual municipal destaca la transferencia de las aguas residuales colectadas en las redes de alcantarillado hacia cultivos agrícolas. En una menor proporción se reutiliza esta agua en el sector industrial, en las termoeléctricas.



En la Figura 6 se ilustran las diferentes transferencias de agua para diferentes usos.



NOTA: m^3/s = metros cúbicos por segundo $1m^3/año = 1$ millón de $m^3/año$
 $1m^3/s = 31.536 km^3/año$. FUENTE: Elaboración propia a partir de datos de CONAGUA. Estimaciones de la Subdirección General de Programación a partir de datos de la Subdirección General Técnica (2008).

Figura 6. Reuso de agua residual municipal y no municipal, 2007.

1.2.1 Concepto e importancia del tratamiento de aguas residuales

El principal objetivo de tratar las aguas residuales es la separación de los contaminantes presentes en esta agua para obtener un efluente que cumpla con las características que se piden de acuerdo al uso o disposición que tengan después de ser tratadas. En la mayoría de los casos, los contaminantes son separados en forma sólida, por lo que los procesos de tratamiento y disposición de lodos constituyen un aspecto de importancia dado que es parte significativa de los costos iniciales y de los costos de operación de las plantas.

El tratamiento de las aguas residuales es definido como todos aquellos procesos físicos, químicos y biológicos que se aplican para remover contaminantes de los efluentes generados por residencias, instituciones y locales comerciales e industriales, produciendo un agua con un nivel bajo de contaminantes para su reutilización y para tener el menor impacto ambiental posible del cuerpo receptor al que se descarga el agua(2).



El crecimiento explosivo de las ciudades ha generado una acelerada pérdida de áreas de cultivo y ha obligado a dar prioridad al uso del agua superficial para el uso doméstico e industrial, originando que la actividad agrícola ubicada generalmente en la periferia de las ciudades se haya visto seriamente afectada optando por el uso del agua residual (aguas negras) como única fuente de riego para sus cultivos (3). Éste es uno de los motivos, por los que el tratamiento del agua residual municipal juega un papel muy importante, en todas las actividades del ser humano.

Cabe señalar que el tratamiento de aguas residuales municipales depende de las condiciones locales, especialmente de la escasez de recursos hídricos. Históricamente, la reutilización se ha establecido de manera pionera en las regiones con escasez de agua, mientras que se ha evitado o pospuesto en las regiones con abundantes recursos hídricos. Independientemente del hecho de que las regiones cuenten con una gran cantidad de recursos hídricos, el tratamiento de aguas residuales debe llevarse a cabo para prevenir, disminuir y solucionar la contaminación y explotación de este recurso tan necesario para la vida.

1.2.2 Aspectos normativos

La reutilización de las aguas residuales municipales y las descargas de éstas a los cuerpos receptores, no deben ser una fuente potencial de contaminación, por lo cual se aplican normas que especifican que antes de utilizar el agua residual para cualquier fin, se debe de dar un tratamiento adecuado para obtener una calidad final que permita cumplir con el objetivo de las normas de vigente aplicación.

En 1997 y 1998 se promulgaron las normas oficiales mexicanas (NOM) que actualmente están vigentes.

Las principales normas en materia de agua son las siguientes (ver Tabla 4):

Tabla 4. Normatividad Aplicable en México.

Título de la Norma	Objetivos
NOM-001-SEMARNAT-1997	Esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. Esta



Título de la Norma	Objetivos
	norma se complementa con la aclaración publicada en el diario Oficial de la Federación del día 30 de abril de 1997.
NOM-002-SEMARNAT-1996	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal.
NOM-003-SEMARNAT-1997	Establece los límites máximos permisibles de contaminantes para las aguas residuales tratadas que se rehúsen en servicios al público.
NOM-004-SEMARNAT-1997	Protección ambiental. Lodos y biosólidos; Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final.

Para cumplir con lo establecido por la Ley se deben cumplir los objetivos de las normas antes mencionadas; en cada una de estas normas se describe la calidad que se requiere para cumplir descargar aguas a cuerpos receptores nacionales, así como la reutilización de las aguas residuales.

1.2.3 Infraestructura para el tratamiento de Aguas Residuales Municipales en México

Al finalizar el año 2007, el registro de plantas en operación se incrementó a 1 710 instalaciones, con una capacidad instalada de 106,267 litros por segundo y caudal tratado de 79 294 litros por segundo, que significa el 6.52% en cuanto a capacidad instalada y de 6.60% en caudal tratado, esta situación permitió alcanzar una cobertura de tratamiento de aguas residuales municipales del 38.3% de la aguas generadas. La CNA planteó que en el año 2008 la capacidad se incrementaría a 85,500 litros por segundo el caudal de aguas residuales tratadas y con ello se alcanzo una cobertura de tratamiento del 40.2% a nivel nacional, para el año 2012 se estima incrementar el tratamiento de aguas residuales al 60% (4).

En la Tabla 5 se muestra la clasificación de las plantas de tratamiento de aguas residuales municipales por proceso, que actualmente operan en México.



Tabla 5. Inventario de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales de México, 2007.

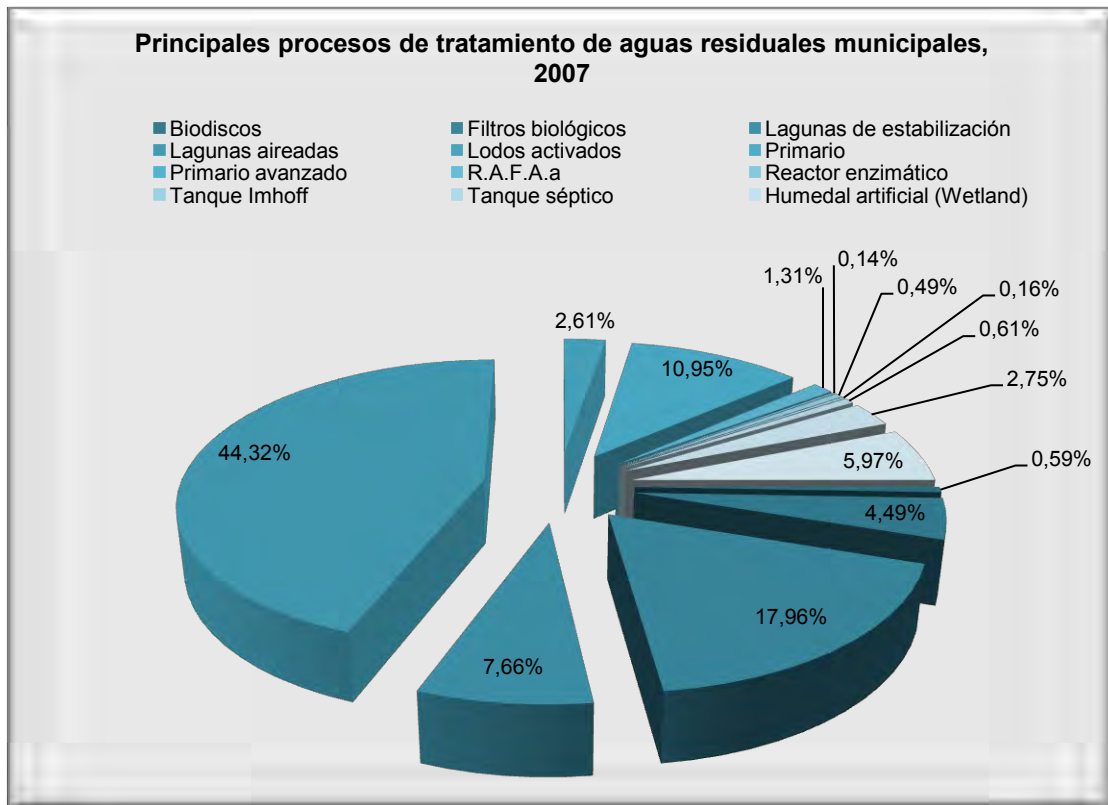
Proceso	Plantas		Capacidad instalada		Caudal tratado	
	No.	%	l/s	%	l/s	%
AEROBIO	4	0.23	292	0.27	127	0.16
Anaerobio	32	1.87	221.62	0.21	165.02	0.21
Biológico	11	0.64	131	0.12	94.5	0.12
Discos biológicos o biodiscos	6	0.35	719	0.68	468	0.59
Dual	10	0.58	4,626.00	4.35	4,298.11	5.42
Filtros biológicos o Rociadores o Percoladores	43	2.51	4,364.20	4.11	3,507.77	4.42
Fosa séptica	77	4.5	184.86	0.17	127.47	0.16
Fosa séptica + Filtro biológico	6	0.35	17.67	0.02	9.67	0.01
Fosa séptica + Humedales	50	2.92	114.08	0.11	66.4	0.08
Humedales (wetland)	60	3.51	578.7	0.54	364.9	0.46
Lagunas aireadas	26	1.52	7,923.10	7.46	6,075.92	7.66
Lagunas de estabilización	646	37.78	19,309.39	18.17	14,240.00	17.96
Lodos activados	417	24.39	49,573.96	46.65	35,140.39	44.32
Primario avanzado	14	0.82	9,870.00	9.29	8,681.51	10.95
Primario o Sedimentación	13	0.76	3,088.60	2.91	2,071.00	2.61
RAFA + Filtro biológico	9	0.53	25.72	0.02	11.12	0.01
RAFA	111	6.49	1,607.43	1.51	1,042.32	1.31
RAFA + humedal	4	0.23	49.2	0.05	32.2	0.04
Reactor Enzimático	59	3.45	143.7	0.14	109.38	0.14
Sedimentación + Humedales	16	0.94	28.4	0.03	19.5	0.02
Tanque Imhoff	59	3.45	586.3	0.55	386.65	0.49
Tanque Imhoff + Filtro biológico	16	0.94	74.7	0.07	27.9	0.04
Terciario	1	0.06	50	0.05	50	0.06
Zanjas de oxidación	20	1.17	2,687.10	2.53	2,177.60	2.75
Total Nacional	1,710	100	106,266.73	100	79,294.33	100

FUENTE: Inventario de plantas potabilizadoras y de aguas residuales 2007



En la Tabla 5 se puede observar cuales son los procesos de tratamiento de aguas residuales municipales más representativos en México, la información anterior se resume en la Figura 7 donde se puede ver que el 44% de las plantas de tratamiento de agua residual municipal corresponde a el proceso más utilizado, es decir, los lodos activados esto debido a la eficiencia de remoción de contaminantes, entre otros aspectos.

Analizando la información anterior se puede definir la tendencia de crecimiento de los procesos de tratamiento, y mediante este análisis se puede puntualizar algunas características de las tecnologías que son de utilidad para la selección de la tecnología cuando se requiere de una nueva planta de tratamiento de aguas en un municipio.



FUENTE: CONAGUA. Subdirección General de Agua Potable y Drenaje y Saneamiento y Subdirección General Técnica, 2008.

Figura 7. Principales procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, 2007.



1.2.4 Estado de aplicación de la tecnología en México.

Antes de comenzar la selección de la alternativa tecnológica adecuada se definirán los términos empleados, en este apartado se clasifica el tratamiento por etapas, es decir: pre-tratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario o avanzado y la etapa de tratamiento de lodos.

En la Figura 11 se presentan en forma esquemática las opciones que pueden ser utilizadas en las etapas de tratamiento del agua residual en el caso del tratamiento de lodos ver la Tabla 8.

No todas las operaciones unitarias son factibles de utilizarse en la práctica; muchas de ellas representan soluciones muy costosas o son desarrollos tecnológicos que aún no han pasado a la categoría de práctica común o tecnología establecida. En la Tabla 6 se describe el estado de aplicación de la tecnología para los procesos de tratamiento de aguas residuales y en la Figura 8 para el tratamiento de lodos.

Varios de los mismos procesos empleados para el tratamiento de aguas residuales municipales se emplean también para el tratamiento de aguas residuales industriales. Sin embargo, en el caso de los tratamientos biológicos se deben tener en cuenta las concentraciones del influente.

Tabla 6. Estado de aplicación de la tecnología en el tratamiento de aguas residuales en México.

Descripción de los procesos	Práctica común	ESTADO Tecnología establecida	En desarrollo
PRE-TRATAMIENTO			
Cribado	✓		
Rejillas	✓		
Desarenado	✓		
TRATAMIENTO PRIMARIO			
Sedimentación	✓		
Floculación y remoción de grasas	✓		
Floculación y precipitación química	✓		
Tanque Imhoff	✓		
TRATAMIENTO SECUNDARIO			



Descripción de los procesos	Práctica común	ESTADO Tecnología establecida	En desarrollo
Filtros percoladores	✓		
Lodos activados, zanjas de oxidación y aeración extendida	✓		
Lagunas de estabilización: 1. Anaerobias 2. Facultativas 3. Aerobias 4. Y por series	✓		
Reactor de contacto anaerobio		✓	
Discos rotatorios		✓	
DESINFECCIÓN			
Cloración	✓		
Ozonización		✓	
Irradiación UV		✓	
TRATAMIENTO AVANZADO			
1. Remoción de sólidos en suspensión:			
Microcribado		✓	
Clarificación química		✓	
Filtros rápidos		✓	
2. Remoción de nutrientes (Nitrógeno)			
Nitrificación-Denitrificación	✓		
Remoción de amoníaco (desgasificación)		✓	
Cloración a punto de Quiebre (NH ₄)		✓	

FUENTE: Elaboración propia a partir de datos reportados por CONAGUA (1)

1.2.5 Infraestructura para el tratamiento de lodos en México

El tratamiento del agua trae siempre como consecuencia la formación de lodos residuales que son subproductos indeseables difíciles de tratar y que implican un costo extra en su manejo y disposición.

Actualmente en México, se considera que los lodos que se generan durante el tratamiento de las aguas residuales son residuos peligrosos y, en consecuencia, deben sujetarse a las regulaciones que emite el Instituto Nacional de Ecología, INE (5).



El lodo resultante debe someterse a un análisis CRETIB para determinar sus características de Corrosividad, Reactividad, Toxicidad y Biológico-infecciosas, lo que permite precisar el nivel de peligrosidad del lodo residual (NOM-052-SEMARNAT-2005) y con base en estos análisis, plantear las alternativas para el manejo y disposición del mismo.

En la Figura 8 se observan las alternativas para el tratamiento y disposición de lodos en México.

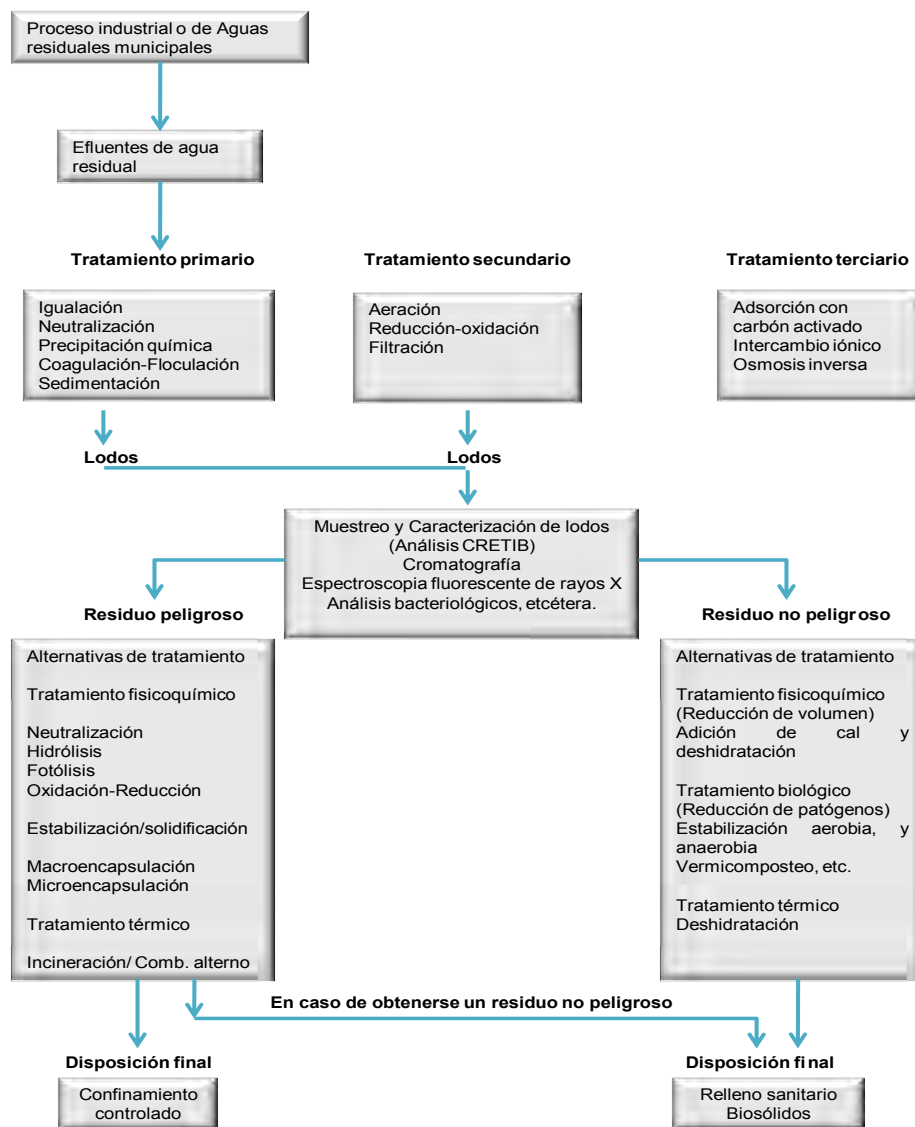


Figura 8. Alternativas planteadas para tratamiento y disposición de lodos (5).



En el país se tiene considerado el uso benéfico de los lodos provenientes de las aguas residuales municipales. Sin embargo, el empleo del concepto de biosólidos³ no se aplica aún a pesar de la marcada tendencia internacional para hacerlo. Cabe mencionar que actualmente se lleva a cabo una revisión para normar el tratamiento de lodos y favorecer su reúso empleando como base la reglamentación de la EPA, con las adecuaciones debidas.

En cuanto a la producción de lodos, en México no es reportada una cifra oficial y son pocas las plantas que realizan algún proceso de estabilización, ya que generalmente carecen de las instalaciones para llevar a cabo el tratamiento necesario y la disposición final adecuada de los lodos generados.

Los procesos más utilizados para la estabilización de éstos son la digestión aerobia y el tratamiento con cal (o estabilización alcalina), procesos adoptados por su facilidad de operación. En menor proporción son usados el composteo y en casos muy raros la digestión anaerobia (6).

Hoy en día se han realizado estudios que reportan que los lodos residuales que en México han significado un grave problema pueden ser reutilizados sin riesgos a la salud y al ambiente, demostrado que incrementan de un 10 a un 85% el rendimiento de los cultivos en relación con los fertilizantes comunes, así, estos desechos podrían ser aprovechados después de ser tratados mediante diversos procesos de estabilización, generando biosólidos que podrían aplicarse como fertilizante dependiendo de las características del suelo, el principal problema es la alta concentración bacteriana que presentan ya que esto los vuelve residuos peligrosos creando la necesidad de mandarlos a confinación o incineración, en vez de aprovecharse para mejorar el suelo de dos terceras partes del territorio nacional que presentan problemas de salinidad y alcalinidad (www.dgi.unam.mx/boletin/bdboletin/2000_432.html).

³ Los biosólidos son principalmente materiales orgánicos producidos durante el tratamiento de aguas residuales, los cuales pueden ser utilizados en diversos usos benéficos (40).



Un hecho que aún no ha podido controlarse totalmente en países como México y que limita las aplicaciones de biosólidos, es la descarga de desechos industriales a la red domiciliaria urbana. En países como Francia y Estados Unidos, la utilización de biosólidos es una práctica habitual, en donde las empresas encargadas del sistema de drenaje pagan a intermediarios para transportar el residuo hasta el campo agricultor (5).



CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se lleva a cabo un análisis y una comparación de las metodologías que ya existen y que actualmente se aplican para la selección de una tecnología para el tratamiento de aguas residuales municipales, se revisan los procesos típicos de tratamiento considerando aspectos tecnológicos, ambientales y económicos para llevar a cabo una evaluación tecnológica e identificar aspectos clave que definen el funcionamiento eficiente de la tecnología.

2.1 Análisis de las Tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales.

Las aguas residuales generalmente se consideran como una molestia que debe eliminarse en la forma menos costosa y ofensiva al ambiente. Esto equivale a emplear sistemas de disposición en el sitio, es decir la descarga directa de las aguas residuales en lagos y corrientes. Durante el siglo pasado se reconoció que la descarga de estas aguas genera efectos indeseables sobre el ambiente(7). Esta situación ha permitido el desarrollo de diversas técnicas de tratamiento que caracterizan a los sistemas municipales de tratamiento. Actualmente se debe considerar que el agua residual es como una materia prima que se debe conservar. El agua limpia es un bien escaso que es preciso tratar, por lo que es necesario conservarlo y reutilizarlo. El contenido del agua residual con frecuencia se considera como contaminante. Sin embargo, el contenido de esta agua es abundante en nutrientes, que en algunos esquemas de tratamiento se recuperan y se utilizan como fertilizante. Este principio debe conservarse ya que permite un desarrollo sostenible. Los compuestos orgánicos en el agua residual son fuente de energía, en un futuro las tecnologías de tratamiento deberán seleccionarse de acuerdo a los beneficios que se puedan obtener tanto energéticos como ambientales y sociales.



Tabla 7. Principales contaminantes del agua residual municipal, efectos negativos que causan y origen.

Contaminante	Importancia	Origen
Sólidos sedimentables (arena, grava)	Los sólidos sedimentables pueden crear depósitos de lodos y condiciones anaerobias en las alcantarillas, instalaciones de tratamiento o aguas superficiales	Doméstico, desagües
Materia orgánica (DBO), nitrógeno Kjeldahl	Degradación biológica que consume oxígeno y puede afectar el balance de oxígeno en la superficie del agua; si el oxígeno en el agua se agota bajo condiciones anaerobias habrá malos olores, muerte de peces y desequilibrio ecológico.	Doméstico, industrial
Microorganismos patógenos	Graves riesgos a la salud pública debidos a la transmisión de patógenos en el agua como el cólera.	Doméstico
Nutrientes (N y P)	Niveles elevados de nitrógeno y fósforo en el agua provocarán un crecimiento excesivo de las algas (eutroficación). La muerte de las algas incrementa la materia orgánica.	Doméstico, desagüe rural, industrial

FUENTE: UNEP, 1997.

2.1.1.2 Características físicas

Una forma de definir qué tan contaminadas están las aguas residuales generadas por un municipio, es la observación de las características sépticas de esta agua (olor, color, turbiedad y temperatura), así mismo estas características dan información del tiempo (edad del efluente) que las aguas tienen desde su generación hasta que se les dé un tratamiento adecuado.

La característica física más importante es el contenido total de sólidos, otras características que también son relevantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad ya que estos parámetros indican a primera vista qué tan contaminada está un agua residual.

Sólidos Totales

Los sólidos totales se definen como la suma de los sólidos suspendidos totales más los sólidos disueltos totales. La diferencia entre este tipo de sólidos está dada por el tamaño de partícula (ver Figura 10).

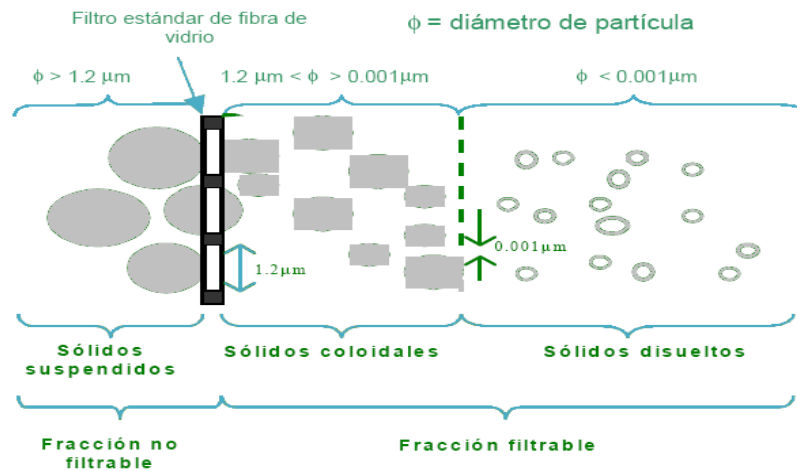


Figura 10. Dimensiones de los sólidos suspendidos, coloidales y disueltos.

Figura 11.

La materia que se obtiene como residuo de la evaporación del agua residual entre 103° y 105° C, son sólidos sedimentables, éstos sedimentan en el fondo de un recipiente de forma cónica (cono Imhoff) en el transcurso de un periodo de 60 minutos. Los sólidos sedimentables se expresan en mg/L y constituyen una medida aproximada de la cantidad de lodo que se obtiene en el sedimentador primario del tren de tratamiento de agua residual. Los sólidos totales pueden clasificarse en filtrables y no filtrables (sólidos en suspensión) haciendo pasar un volumen conocido de líquido por un filtro.

Olor

El agua residual municipal fresca y aeróbica tiene el olor del queroseno o de tierra recién mojada (8). Las aguas residuales envejecidas y sépticas tienen un olor muy agresivo para el olfato.

Color

Otra característica además del olor, es que las aguas residuales recientes tienen un color gris característico. Mientras que las aguas sépticas son negras. Este color se debe a la precipitación de hierro contenido en ellas.



Temperatura

La temperatura del agua residual oscila, normalmente entre 10° y 20°C. En general, y es mayor que la temperatura del agua del suministro, debido a la adición de agua tibia de los hogares y al calentamiento dentro del sistema de drenaje de la estructura.

Turbiedad

La turbiedad, como medida de las propiedades de transmisión de la luz de un agua, es otro parámetro que se emplea para indicar la calidad de las aguas vertidas o de las aguas naturales en relación con la materia coloidal y residual en suspensión.

Un metro cúbico de agua residual pesa aproximadamente 1, 000,000 g y contiene unos 500g de sólidos. La mitad de éstos estará disuelta, como los compuestos de calcio, sodio y los orgánicos solubles. Los 250g restantes serán insolubles. La fracción insoluble consiste en 125g de sólidos sedimentables que salen, de la fracción líquida. Los 125g restantes permanecerán en suspensión durante un tiempo muy largo. El resultado es un agua muy turbia.

2.1.1.3 Características químicas

La cantidad de sustancias químicas presentes en las aguas residuales es casi ilimitada, principalmente se consideran aquellas características con un mayor potencial contaminante, como ejemplo, el contenido de materia orgánica e inorgánica, y los gases presentes en el agua residual.

La medición del contenido de la materia orgánica se realiza en laboratorio según lo indican las normas aplicables vigentes y aplicables.

Materia Orgánica

Aproximadamente el 75% de los sólidos en suspensión y el 40 % de los sólidos filtrables de un agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica. Son



sólidos de origen animal y vegetal, así como de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos.

Las principales sustancias orgánicas presentes en el agua residual son las proteínas (40-60%), hidratos de carbono (25-50%) y grasas y aceites (10%). Otro compuesto orgánico muy importante presente en el agua residual es la urea, principal constituyente de la orina. Sin embargo, debido a la cinética del proceso de descomposición de la urea, escasamente está presente en aguas residuales que no sean muy recientes. Además de estas sustancias orgánicas, el agua residual también contiene pequeñas cantidades de moléculas orgánicas sintéticas, como agentes tensoactivos, los contaminantes orgánicos prioritarios, los compuestos orgánicos volátiles y los plaguicidas de uso agrícola, dependiendo del municipio de origen del agua residual.

Medida del Contenido Orgánico

Los diferentes métodos para medir el contenido orgánico pueden clasificarse en dos grupos: los empleados para determinar altas concentraciones de contenido orgánico, mayores a 1 mg/L, y los métodos empleados para determinar las concentraciones de 0.001 mg/L a 1 mg/L.

El primer grupo incluye los siguientes ensayos de laboratorio:

1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)
2. Demanda química de oxígeno (DQO)
3. Carbono orgánico total (COT).

En el segundo grupo se emplean métodos instrumentales que incluyen la cromatografía de gases y la espectroscopía de masas.

Demanda Bioquímica de Oxígeno: El parámetro de contaminación orgánica más empleado, que es aplicable tanto a aguas residuales como a aguas superficiales, es la DBO a 5 días (DBO₅). La determinación de éste está relacionada con la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación



bioquímica de la materia orgánica. Los resultados de los ensayos de DBO se emplean para:

1. Determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente;
2. Dimensionar las instalaciones de tratamiento de aguas residuales
3. Medir la eficacia de algunos procesos de tratamiento y controlar el cumplimiento de las limitaciones a que están sujetos los vertidos.

El periodo de incubación es de 5 días a 20°C. La oxidación bioquímica es un proceso lento. En un periodo de 20 días se completa la oxidación del 95 al 99 % de la materia carbonosa, y en los 5 días que dura el ensayo de la DBO₅ se llega a oxidar entre el 60 y 70%. Se asume la temperatura de 20 °C como un valor medio representativo de temperatura.

Materia Inorgánica

Las concentraciones de las sustancias inorgánicas en el agua aumentan tanto por el contacto del agua con las diferentes formaciones geológicas, como por las aguas residuales, tratadas o sin tratar, que a ella se descargan. Las aguas naturales disuelven parte de las rocas y minerales con los que entran en contacto y, salvo el caso de determinados residuos industriales, no se suelen tratar con el objetivo específico de eliminar los constituyentes inorgánicos que se incorporan durante el ciclo de uso.

Las concentraciones de los diferentes constituyentes inorgánicos pueden afectar mucho a los usos del agua, por ejemplo los cloruros, la alcalinidad, el nitrógeno, el azufre, y otros compuestos tóxicos inorgánicos y metales pesados como el níquel, el manganeso, el plomo, el cromo, el cadmio, el cinc, el cobre, el hierro y el mercurio; éstos afectan directamente los equipos y son difíciles de remover por métodos convencionales.

El nitrógeno de Kjeldahl¹ (NTK) es una medida del nitrógeno (orgánico y amoniacal) en el agua residual. Es una medida de la disponibilidad de nitrógeno como formador de



células, así como de la demanda potencial de oxígeno y nitrógeno que se debe satisfacer.

El fósforo aparece en muchas formas en el agua residual; por ejemplo, ortofosfatos, polifosfatos y fosfatos orgánicos. Todas estas sustancias se agrupan bajo el término fósforo total.

Dentro de la materia inorgánica es de suma importancia también hablar de la concentración de ion hidrónico (pH). El agua residual con valores de pH alejados de la neutralidad presenta dificultades de tratamiento con procesos biológicos, y el efluente puede modificar el pH de los cuerpos receptores.

Gases

Los gases que con mayor frecuencia se encuentran en aguas residuales sin tratar son el nitrógeno (N_2), el oxígeno (O_2), el dióxido de carbono (CO_2), el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el amoníaco (NH_3), y el metano (CH_4). Los tres últimos proceden de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales. El oxígeno disuelto es necesario para la respiración de los microorganismos aerobios en los procesos aerobios, así como para otras formas de vida. Debido a que la velocidad de las reacciones bioquímicas que consumen oxígeno aumenta con la temperatura, los niveles de oxígeno disuelto tienden a ser más críticos durante el verano o en climas calurosos.

2.1.1.4 Características microbiológicas

Las características biológicas de las aguas residuales son de fundamental importancia para el control de enfermedades causadas por los organismos patógenos de origen humano presentes en estas aguas. Los microorganismos encontrados en esta agua intervienen en los procesos biológicos, y también son un indicador de qué tan contaminada se encuentra el agua residual; se han logrado identificar algunos de los microorganismos con mayor presencia en el agua residual de origen municipal éstos se



clasifican en bacterias, hongos, protozoarios, algas y virus, en la Tabla 8 se describen los microorganismos.

Tabla 8. Descripción de los organismos típicos encontrados en las aguas naturales, residuales y en los procesos de tratamiento de aguas residuales.

Organismo	Descripción
Bacteria	Son organismos unicelulares procariontes. En el interior de la célula se encuentra una suspensión coloidal de proteínas, carbohidratos y otros compuestos orgánicos complejos, llamada citoplasma.
Arqueo bacterias	Son similares a las bacterias en tamaño y componentes celulares. Estas células tienen paredes de material celular, y la composición de ARN ¹ es diferente. Esta bacteria se encuentra a condiciones extremas de temperatura y composiciones químicas, en los procesos anaerobios.
Hongos/levaduras	Los hongos son organismos multicelulares, no fotosintéticos, heterótrofos eucariotes. La mayoría de los hongos se reproducen sexualmente o asexualmente, por fisión, gemación o por formación de esporas. Las levaduras son hongos que no pueden formar micelas y son organismos unicelulares. Los hongos sobreviven a bajos pH y condiciones de nitrógeno limitado, los hongos tienen la característica de degradar la celulosa, hacen que esto sea muy importante en la composición de los lodos.
Protozoarios	Los protozoarios son células simples. La mayoría de los protozoarios son heterótrofos aeróbicos, algunos son anaerobios. Estos organismos son semejantes a las bacterias y a menudo consumen bacterias como FUENTE de energía
Rotíferos	Especies dioicas, con una longitud comprendida entre 40 µm y 3 mm. Los machos son más pequeños que las hembras y en algunas especies no existen. Son cosmopolitas: dulceacuícolas (la mayoría), marinas y terrestres; la mayoría de vida libre y algunas epizoicas o parásitas. Soportan variaciones de temperaturas comprendidas entre 40°C y - 272°C.
Algas	Son especies vegetales y su presencia afecta al valor del agua de abastecimiento ya que puede originar problemas de olor y sabor. Uno de los problemas más importantes es encontrar el proceso de tratamiento que hay que aplicar a las aguas residuales de diferentes orígenes de modo que los efluentes no favorezcan el crecimiento de algas y demás plantas acuáticas.

¹ Ácido Ribonucleico.



Organismo	Descripción
Virus	Los virus son parásitos intracelulares, cuando son excretados por los seres humanos pueden representar un importante peligro para la salud pública. Algunos virus pueden sobrevivir hasta 41 días, tanto en aguas limpias como en residuales a temperatura de 20° C, y hasta 6 días en un río normal.

FUENTE: Elaboración propia

2.1.1.5 Composición típica de las aguas residuales municipales

Para seleccionar un tren de tratamiento adecuado para el agua residual de un municipio se debe conocer primero la composición del influente ya que las tecnologías de tratamiento dependen principalmente de las características del agua a tratar y algunas de estas características son empleadas como parámetros de diseño de las tecnologías.

Las aguas residuales municipales son una combinación entre aguas generadas por la población en sus hogares y las generadas en locales comerciales y algunas industrias que se encuentran en los alrededores, generalmente las industrias tratan sus aguas residuales con el fin de descargarlos a los sistemas de alcantarillado y cumplir con la norma NOM-002-SEMARNAT-1996.

Se han considerado parámetros promedio para estimar el nivel de contaminantes presentes en el agua residual municipal. En la Tabla 9 se encuentran las características y cantidades promedio de contenido de contaminantes de presentes en esta agua. Sin embargo, estos valores sólo son un indicativo y se recomienda llevar a cabo un muestreo para determinar los parámetros de contaminación del agua y con esto obtener valores reales y llevar a cabo un mejor diseño, así como una mejor selección de alternativas tecnológicas, ya que la cantidad de sustancias contaminantes depende del lugar de origen de las aguas residuales.

Tabla 9. Composición del agua residual doméstica.



Contaminante	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/L	350	720	1200
Total de sólidos disueltos (TDS)	mg/L	250	500	850
Fijo	mg/L	145	300	525
Volátil	mg/L	105	200	325
Los sólidos en suspensión	mg/L	100	220	350
Fijos	mg/L	20	55	75
Volátiles	mg/L	80	165	275
Sólidos sedimentables	mL/L	5	10	20
DBO₅, 20 ° C	mg/L	110	220	400
TOC	mg/L	80	160	290
COD	mg/L	250	500	1 000
Nitrógeno (total como N)	mg/L	20	40	85
Orgánicos	mg/L	8	15	35
Amoníaco libre	mg/L	12	25	50
Nitritos	mg/L	0	0	0
Nitratos	mg/L	0	0	0
Fósforo (total como P)	mg/L	4	8	15
Orgánicos	mg/L	1	3	5
Inorgánicos	mg/L	3	5	10
Cloruros	mg/L	30	50	100
Sulfato	mg/L	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO₃)	mg/L	50	100	200
Grasas	mg/L	50	100	150
Coliformes totales	No/100 ml	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹
Compuestos orgánicos volátiles	µg/L	<100	100-400	>400

FUENTE: Metcalf and Eddy Inc., Wastewater Engineering, 3rd edition.

2.1.2 Procesos típicos para el tratamiento de aguas residuales municipales.

Todas las plantas de tratamiento de aguas residuales están integradas por una serie de unidades de proceso colocadas en forma secuencial, dependiendo de los contaminantes que se vayan a remover.

Algunos procesos son denominados convencionales o típicos, estos procesos son generalmente los más utilizados por su eficiencia y bajo costo para tratar aguas residuales.



Las alternativas para el tratamiento de aguas residuales municipales se agrupan en tres categorías principales (8):

- 1) Tratamiento Primario
- 2) Tratamiento Secundario
- 3) Terciario o Avanzado

En cada una de estas etapas se incluyen las unidades tecnológicas de tratamiento que se utilizan para remover ciertos contaminantes, por ejemplo: en el tratamiento primario se utilizan las rejillas, la cámara de desarenado y el tanque de igualación; en la Figura 12 se encuentran algunos dispositivos tecnológicos y estructuras correspondientes a cada categoría.

Además de agrupar los procesos por etapas, existen otras clasificaciones dependiendo el metabolismo que presentan los microorganismos en el proceso, entre otras características de la tecnología de tratamiento (ver Figura 12).



Para llevar a cabo una evaluación de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales, se debe describir el principio de funcionamiento, los equipos principales, las condiciones bajo las que opera, los costos de inversión y operación, entre otros aspectos.

En el siguiente apartado se describen algunas características importantes de cada tecnología.

2.1.2.1 Análisis de las tecnologías empleadas en el tratamiento de aguas residuales en México.

Desde un enfoque de desarrollo sustentable, algunos procesos de tratamiento de aguas tienen muy bajos consumos energéticos por ejemplo, procesos anaerobios, aerobios con aireación natural y facultativos respecto a otros aerobios cuyo sistema de aireación requiere de un mayor consumo energético. Este consumo de energía está relacionado con las emisiones de gases contaminantes debido a la generación eléctrica. Sin embargo, estos aspectos sólo pueden estudiarse mediante análisis enfocados al ciclo de vida aplicado a tecnologías de tratamiento de agua residual.

En el caso de México en particular, la contaminación generada por el consumo energético para el tratamiento de agua residual no es un aspecto predominante para seleccionar tecnologías, básicamente los criterios han sido:

- a) La viabilidad económica y técnica de la construcción y operación de la PTAR.
- b) La calidad del efluente que es posible obtener de acuerdo al tipo de tecnología comparándola con la calidad exigida en la normatividad para la descarga o reutilización del agua.
- c) La confianza que las tecnologías ofrecen a las autoridades, por haber sido probadas o no en un número suficiente de instalaciones en el mundo.

Respecto a lo anterior, se analizan los principales procesos empleados en México para el tratamiento de aguas residuales municipales. De acuerdo al inventario de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales son el proceso de lodos activados empleado en un 44.32 %, con 17.96 % las lagunas de estabilización y con 10.95 % el



tratamiento primario avanzado, el 26.77 % restante corresponde a los demás procesos anaerobios y naturales. A continuación se describen las características principales de los procesos anteriores de acuerdo a las estadísticas de aplicación y a los criterios anteriormente mencionados para su utilización.

a) Proceso de lodos activados.

Es el proceso mayormente usado en países industrializados. Es un proceso aerobio mecanizado, el cual requiere de obra civil, ya que generalmente los reactores son de concreto. Los costos de inversión y operación generalmente son elevados, sin embargo, la calidad del efluente es mucho mejor respecto a otros procesos simples, como los anaerobios o las lagunas.

Para el proceso de lodos activados de flujo continuo, los costos de inversión en México son de 18000-36000 USD / (L/s), en función del gasto de la planta, mientras que los gastos de operación son de 0.07-0.22 USD/m³ (9). En plantas muy grandes con digestión anaerobia de lodos y cogeneración con biogás, los costos de operación pueden disminuir.

Respecto a la calidad del efluente es elevada para este proceso, aunque debido a su naturaleza puede requerir de otros tratamientos terciarios aparte de una desinfección, por ejemplo, coagulación, sedimentación o filtración terciarias si el agua es para uso público urbano. El proceso discontinuo de lodos activados (reactores biológicos secuenciales, RBS) produce un efluente en general de mejor calidad, y permite una mayor flexibilidad de operación, además de requerir una menor área en planta para su construcción.

Al ser un proceso relativamente compacto, se ha empleado en México para el tratamiento de medianos y grandes caudales en zonas urbanas o periurbanas con terreno escaso y de costo elevado, especialmente en la reutilización del agua para uso público urbano ya que proporciona la calidad adecuada, por otra parte al ser un proceso con mucha experiencia en su aplicación en diversos países del mundo además de ser comercializado por varias empresas en el rubro de tratamiento de agua residual se considera un proceso factible de emplearse para zonas con las características anteriormente mencionadas.



De acuerdo a la experiencia de aplicación en México, se observa que este proceso cumple con los parámetros de calidad establecidos en las normas oficiales mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y la NOM-003-SEMARNAT-1997, sin embargo, para caudales menores a 90 L/s los costos de inversión y operación son considerablemente elevados con respecto a otros procesos de tratamiento de agua residual como se verá en la Figura 13.

b) Lagunas de estabilización

Las lagunas de estabilización son un tratamiento recomendado para municipios en los que el suelo es impermeable, barato y en el que se puede disponer de grandes extensiones, además de considerar que son adecuados para lugares donde no se requiere bombear el agua residual a grandes distancias o elevaciones, los costos de inversión para las lagunas de estabilización generalmente son bajos o moderados, en México los costos para caudales mayores a 100 L/s son aproximadamente de 23 a 30 millones de pesos como se verá en la Figura 13, estos costos son menores respecto a los demás tratamientos excepto humedales. En plantas menores de 60 L/s el costo aumenta con respecto al tratamiento primario avanzado como se verá en la Figura 13, también cuando se tiene un terreno caro, poco apto para la excavación, permeable, los costos aumentan considerablemente. Los costos de operación en general son muy bajos comparados con los que se tienen para el proceso de lodos activados, en el caso de México varían entre \$0.03 a 0.05 USD/m³, esta rango se considera a no ser que se requiera bombear el agua residual desde una cierta distancia o desnivel.

La calidad del efluente obtenido con este proceso en general no es tan buena como la calidad obtenida con el proceso de lodos activados a menos que los tiempos de retención sean muy elevados y se utilicen postratamientos para remover sólidos y patógenos. Sin embargo, se ha observado que las lagunas son adecuadas para cumplir con los límites establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996.

De acuerdo a los aspectos anteriores y por ser procesos económicos y de operación simple, que resisten bien las oscilaciones de carga y caudal, se han aplicado ampliamente en México, especialmente en poblaciones con disponibilidad de terrenos cercanos al núcleo urbano. En el año 2007, 646 PTAR operaban en México mediante



lagunas de estabilización correspondiente al 37 % del total, tratando un caudal de 17.96 % y una capacidad instalada de 18.17 % (ver Tabla 5).

Las lagunas aireadas facultativas tienen costos de inversión intermedios entre el proceso de lodos activados y las lagunas de estabilización, es una alternativa que se considera en los casos en los que se dispone de amplias extensiones de terreno pero su disponibilidad o su precio no hace viable la construcción de lagunas de estabilización: las lagunas aireadas ocupan menos terreno y tiene menores costos de inversión que el proceso de lodos activados. En diciembre de 2007 operaban en México 26 PTAR municipales correspondiente al 1.52 % del total de PTAR basadas en lagunas aireadas, que sumaban 7.66 % del caudal tratado y una capacidad instalada de 7.46 % (ver Tabla 5).

c) Tratamiento primario avanzado (TAP).

Este proceso consiste en incrementar la eficiencia de la sedimentación primaria, mediante la coagulación y la floculación previas del efluente del pretratamiento. De acuerdo al Anexo A en el apartado correspondiente a la ficha técnica de los tratamientos primarios los rendimientos de eliminación en el tratamiento primario convencional son mucho menores que los obtenidos al implementar un TAP. El TAP cumple con la mayoría de los límites de descarga establecidos en la NOM-001-SEMARNAT-1996, se puede cumplir en muchos casos con las normas al implementar un TAP sin necesidad de un tratamiento biológico. Sin embargo, es importante complementar la remoción de patógenos del agua residual empleando lagunas de maduración o sistemas de desinfección fisicoquímicos para cumplir con el límite establecido en la normatividad.

Respecto a los costos de inversión de las plantas que usan el TPA son menores que los de una planta con tratamiento primario simple seguido de un tratamiento biológico. Otros factores que se deben considerar son el consumo de reactivos para la coagulación y la floculación, además de la generación de grandes volúmenes de lodos, al generar lodos primarios más los lodos de hidróxido generado normalmente por la adición de reactivos para la coagulación. En el año 2007 las PTAR municipales en



operación basadas en TPA correspondiente al 0.82 % del total de plantas con una caudal tratado de 10.95 % y una capacidad instalada de 9.29 % (ver Tabla 5).

d) Tratamiento anaerobio

Los procesos anaerobios empleados para el tratamiento de aguas residuales municipales son una alternativa adecuada para regiones con condiciones climatológicas particulares, es decir, para zonas con climas tropicales o subtropicales, debido a los altos rendimientos que se consiguen a estas condiciones de temperatura, por lo cual la operación de las plantas que usan tratamientos anaerobios en ubicadas en zonas con estas características incrementan su eficiencia en la operación sin necesidad de consumir energía o combustibles para calentar el influente,

La calidad que presenta el efluente del proceso anaerobio es en general menor que la obtenida con los procesos aerobios. Sin embargo, al implementar en una PTAR un proceso anaerobio y posteriormente un proceso aerobio, por ejemplo, complementar el proceso anaerobio con un filtro biológico, una laguna de estabilización o humedales artificiales, para incrementar la calidad del efluente final.

Los reactores anaerobios de lechos de lodos y flujo ascendente (*upflow anaerobic sludge blanket*, *UASB reactor*, en México es denominado Reactor anaerobio de flujo ascendente, RAFA) permiten tratar aguas residuales a temperatura ambiente (mayores a 15°C), por tanto, es una tecnología recomendada para regiones con climas tropicales y subtropicales, por ejemplo para la mayor parte del sureste y algunas regiones del centro del país en donde las temperaturas permanecen la mayor parte del año mayores de 15 °C.

Los costos de inversión y operación para los tratamientos anaerobios en general son bajos, los sistemas duales generalmente tienen costos moderados tomando como referencia el costo de inversión y operación de un proceso de lodos activados en el apartado siguiente se llevará a cabo un análisis de costos con mayor detalle.

Las fosas sépticas y el tanque Imhoff son dos tecnologías de tratamiento descentralizado de efluentes de origen doméstico, es decir, son utilizados principalmente en lugares donde no existe infraestructura de alcantarillado, sin



embargo, también pueden formar parte de un sistema de tratamiento para una PTAR municipal donde se complementarían con un proceso aerobio posteriormente.

En el año 2007 operaban en México 111 RAFA que representaban el 6.49 % de todas las PTAR municipales con una capacidad instalada de 1.51% y un caudal tratado de 1.31 % (ver tabla 5).

Respecto a las Fosas sépticas y a los tanques Imhoff en el país operaban 208 plantas que emplean estas tecnologías y que corresponden al 12.16 % del total de PTAR municipales con una capacidad instalada de 0.92 % y un caudal tratado de 0.78 %.

Los procesos analizados anteriormente muestran que las tecnologías de tratamiento anaerobio, los tratamientos basados en métodos naturales (como ejemplo humedales artificiales y lagunas de estabilización), las plantas con tratamiento primario convencional (sedimentación) y sus respectivas combinaciones, suman 1070 PTAR municipales esto representa el 62.57 % del total de plantas y que tratan el 23.19 % del volumen de aguas residuales generado en todo el país, estos valores indican que las tecnologías se han seleccionado tomando en cuenta bajos costos de inversión y operación, así como un bajo consumo de energía.

Sin embargo, también se deberán considerar otros indicadores asociados a los principales aspectos técnicos y eficiencias de remoción de contaminantes de cada proceso de tratamiento de aguas residuales (ver Tabla 10), los cuales se encuentran descritos a detalle en el Anexo A correspondiente a las fichas técnicas de las tecnologías empleadas en las etapas que conforman un tren de tratamiento de aguas residuales municipales, las tecnologías que se describen son las correspondientes a la etapa de pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y tratamiento terciario.

A partir de la información contenida en el Anexo A presentan los siguientes indicadores considerados de mayor que influyen en la selección de tecnología.



a) Eficiencia de remoción

Tabla 10. Eficiencia de remoción de contaminantes por tipo de tecnología.

Tecnología de tratamiento	Eficiencia de remoción (%)						
	DBO	DQO	SS	P	N	NH ₃ -N	Patógenos
Cribado	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Desarenadores	0-5	0-5	0-10	NA	NA	NA	NA
Sedimentación primaria	30-40	30-40	50-65	10-20	10-20	0	NA
Lodos activados (convencional)	80-95	80-95	80-90	10-25	15-20	8-15	NA
Filtros percoladores Alta tasa, roca	65-80	60-80	60-85	8-12	15-50	8-15	NA
Filtros percoladores Super tasa, plástico	65-85	65-85	65-85	8-12	15-50	8-15	NA
Reactor RAFA (o UASB)	65-80	60-80	60-70	30-40	---	---	NA
Filtros anaerobios	65-80	60-80	60-70	30-40	---	---	NA
Lagunas anaerobias	50-70	---	20-60	---	---	---	90-99
Lagunas aireadas	80-95	---	85-95	---	---	---	90-99
Lagunas facultativas	80-90	---	63-75	30	---	---	90-99
Lagunas de maduración	60-80	---	85-95	---	---	---	90-99
Desinfección con cloro	NA	NA	NA	NA	NA	NA	100
Desinfección con UV	NA	NA	NA	NA	NA	NA	100

FUENTE: Elaboración a partir del Anexo A, (9), NA (no aplica)

b) Características de las tecnologías

En este inciso se llevará a cabo la comparación entre tecnologías mediante indicadores como el área requerida para su construcción, complejidad de operación de la tecnología, producción de olores, generación de lodos y costos de operación y mantenimiento.



Con base en las fichas técnicas contenidas en el Anexo A y en el siguiente apartado denominado “Análisis y estimación de costos índice para las tecnologías de tratamiento de agua en México” se elaboraron las siguientes tablas comparativas para las tecnologías de la etapa secundaria de tren de tratamiento de aguas residuales municipales, ya que la remoción de la mayor parte de los contaminantes sucede en la etapa secundaria, por ello es importante seleccionar la mejor tecnología para esta etapa.

Cabe aclarar que los valores exactos de cada parámetro comparativo varían dependiendo de las características de la tecnología, por lo que para su comparación se propone utilizar una escala numérica cuyo valor mínimo es 1 y se asigna a un costo o valor bajo, para un costo o valor intermedio se asignará el número 2, y para un costo o valor alto el número 3, en lo que se refiere a los números 1.5 y 2.5 son valores intermedios, esta escala tiene el único objetivo de facilitar la comparación.

Tabla 11. Comparación entre Costos de Inversión.

Proceso	Costo bajo		Costo alto		
Humedales					
Lagunas de estabilización (aerobia, facultativa y anaerobia)					
Filtros percoladores					
Reactor RAFA o UASB					
Tratamiento primario avanzado					
Lagunas aireadas					
Lodos activados ²					
Discos biológicos					
Calificación	1	1.5	2	2.5	3

² Se consideran las diferentes modalidades del proceso de lodos activados descritas en el apartado del Anexo A correspondiente a este proceso.



NOTA: Se consideraron los costos estimados con las ecuaciones del IMTA y los costos plantas financiadas por del Fondo Nacional de Infraestructura que actualmente se encuentran en operación en México.

Tabla 12. Costo de operación y mantenimiento

Proceso	Costo bajo		Costo alto		
	1	1.5	2	2.5	3
Humedales					
Lagunas de estabilización (aerobia, facultativa y anaerobia)					
Filtros percoladores					
Reactor RAFA o UASB					
Tratamiento primario avanzado					
Lagunas aireadas					
Lodos activados ²					
Discos biológicos					
Calificación	1	1.5	2	2.5	3

Tabla 13. Área para su construcción

Proceso	Costo bajo		Costo alto		
	1	1.5	2	2.5	3
Humedales					
Lagunas de estabilización (aerobia, facultativa y anaerobia)					
Filtros percoladores					
Reactor RAFA o UASB					
Tratamiento primario avanzado					
Lagunas aireadas					
Lodos activados ²					
Discos biológicos					
Calificación	1	1.5	2	2.5	3



Tabla 14. Complejidad de operación de la tecnología

Proceso	Baja		Alta		
Humedales					
Lagunas de estabilización (aerobia, facultativa y anaerobia)					
Filtros percoladores					
Reactor RAFA o UASB					
Tratamiento primario avanzado					
Lagunas aireadas					
Lodos activados ²					
Discos biológicos					
Calificación	1	1.5	2	2.5	3

Tabla 15. Generación de olores

Proceso	Bajo		Alto		
Humedales					
Lagunas de estabilización (aerobia, facultativa y anaerobia)					
Filtros percoladores					
Reactor RAFA o UASB					
Tratamiento primario avanzado					
Lagunas aireadas					
Lodos activados ²					
Discos biológicos					
Calificación	1	1.5	2	2.5	3



Tabla 16. Producción de lodos

Proceso	Bajo			Alto	
Humedales ³					
Lagunas de estabilización (aerobia, facultativa y anaerobia)					
Filtros percoladores					
Reactor RAFA o UASB					
Tratamiento primario avanzado					
Lagunas aireadas					
Lodos activados ²					
Discos biológicos					
Calificación	1	1.5	2	2.5	3

c) Indicadores sociales y económicos de los municipios

En la Tabla 17, se observan las variables económicas y sociales que están asociadas a la implementación de las tecnologías y procesos de tratamiento de aguas residuales municipales, mediante datos de la CONAGUA se construyó la siguiente tabla que muestra algunos de los indicadores por estado que permiten implementar de ciertas tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

Respecto al índice y grado de marginación cabe destacar que se eligió como indicador, ya que es una medida-resumen que permite diferenciar entidades federativas y municipios según el impacto global de las carencias que padece la población, como resultado de la falta de acceso a la educación, la residencia en viviendas inadecuadas, la percepción de ingresos monetarios insuficientes y las relacionadas con la residencia en localidades pequeñas.

³ No se producen lodos



Tabla 17. Datos geográficos y socioeconómicos por Entidad Federativa.

#	Estado	Población 2008 (habitantes)	superficie continental (Km ²)	Densidad de población 2008 (hab/Km ²)	PIB 2008	Índice de marginación	Grado de marginación	Número de PTAR municipales en operación en 2008	Capacidad instalada (m ³ /s)	Caudal tratado (m ³ /s)
1	Aguascalientes	1133117	5618,00	202	1,1	-0,095352	Bajo	115	4,23	3,47
2	Baja California	3122570	71463,00	44	2,9	-1,25336	Muy bajo	27	6,99	5,26
3	Baja California Sur	558463	73922,00	8	0,6	-0,71946	Bajo	18	1,2	0,84
4	Campeche	791368	51352,00	15	5,6	0,55876	Alto	13	0,1	0,06
5	Coahuila de Zaragoza	2615413	151623,00	17	3,4	-1,13709	Muy bajo	21	4,97	3,87
6	Colima	597074	5625,00	106	0,5	-0,73788	Bajo	57	1,54	1
7	Chiapas	4483595	73178,00	61	1,7	2,32646	Muy alto	24	1,51	1,36
8	Chihuahua	3375776	247478,00	14	3,2	-0,68411	Bajo	119	8,72	5,93
9	Distrito Federal	8838981	1496,00	5909	17,5	-150,487	Muy bajo	27	6,48	3,12
10	Durango	1547516	123287,00	13	1,2	-0,01884	Medio	167	3,55	2,67
11	Guanajuato	5032768	30609,00	164	3,7	0,09191	Medio	60	5,79	4,31
12	Guerrero	3143093	63652,00	49	1,5	241,213	Muy alto	40	2	1,22
13	Hidalgo	2415384	20824,00	116	1,6	0,75057	Alto	13	0,33	0,28
14	Jalisco	6988697	78598,00	89	6,3	-0,76871	Bajo	96	3,77	3,49
15	México	14737822	22357,00	659	8,9	-0,62211	Bajo	78	7,09	5,19
16	Michoacán de Ocampo	3970987	58614,00	68	2,4	0,45654	Alto	25	3,56	2,47
17	Morelos	1668304	4882,00	342	1,1	-0,44346	Bajo	32	1,6	1,21
18	Nayarit	968268	27815,00	35	0,6	0,19052	Medio	63	2,03	1,23
19	Nuevo León	4420582	64226,00	69	7,7	-132,611	Muy bajo	61	13,24	11,65
20	Oaxaca	3551544	93524,00	38	1,6	212,936	Muy alto	66	1,51	0,99
21	Puebla	5623566	34283,00	164	3,4	0,63482	Alto	69	3,02	2,43
22	Querétaro	1705299	11707,00	146	1,8	-0,14165	Medio	67	1,12	0,72
23	Quintana Roo	1290575	38784,00	33	1,5	-0,31569	Bajo	29	2,08	1,6
24	San Luis Potosí	2479314	61112,00	41	1,8	0,65573	Alto	21	2,12	1,74
25	Sinaloa	2650391	57377,00	46	2	-0,14817	Medio	136	5,28	4,51
26	Sonora	2499085	179484,00	14	2,6	-0,74955	Bajo	76	4,45	3,09
27	Tabasco	2045247	24743,00	83	3	0,46224	Alto	72	1,85	1,31
28	Tamaulipas	3173982	80243,00	40	3,4	-0,68338	Bajo	39	5,61	4,05
29	Tlaxcala	1127332	4006,00	281	0,5	-0,12922	Medio	52	1,23	0,87
30	Veracruz de Ignacio de la Llave	7269905	71846,00	101	4,7	107,674	Alto	92	5,43	3,17
31	Yucatán	1910023	37409,00	51	1,4	0,43144	Alto	13	0,08	0,07



#	Estado	Población 2008 (habitantes)	superficie continental (Km ²)	Densidad de población 2008 (hab/Km ²)	PIB 2008	Índice de marginación	Grado de marginación	Número de PTAR municipales en operación en 2008	Capacidad instalada (m ³ /s)	Caudal tratado (m ³ /s)
32	Zacatecas	1380576	75313,00	18	0,8	0.15999	Medio	45	0,55	0,46
	TOTAL	107116617	1946450	9036	100			1833	113,03	83,64

FUENTE: Elaboración propia con datos de CNA, 2010.

A continuación se analizarán los estados que cuentan con un número representativo de de PTAR.

Aguascalientes. Es uno de los estados de la republica mexicana cuya superficie es de 5,618.00 km². En el año 2008 según datos de la CNA el PIB fue de 1.1 del total nacional y contaba con una población de 1,133, 117 habitantes, y una densidad de población de 202 habitantes por Km²; el grado de marginación que tenía y tiene es muy bajo, y para este mismo año se determinó que el número de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación era de 115 de las cuales 69 estaban basadas en lagunas de estabilización, 13 eran fosas sépticas y 23 correspondientes a lodos activados con un caudal tratado de 3.47 m³/s del total nacional. De lo anterior se puede decir, que de acuerdo a las características de este estado se utilizaron tecnologías tratamiento de agua económicas, de operación simple y bajo a moderado consumo energético, las cuales requieren de un área moderada a extensa para su construcción.

Chihuahua. Este estado tiene una extensión territorial de 247,478.00 Km², en 2008 tenía una densidad de población de 14 habitantes por Km² y un PIB de 3.2 del total nacional, para ese año contaba con 119 PTAR municipales que trataban un caudal total de 5.93 m³/s, de las 119 PTAR 90 correspondían a lagunas de estabilización y 15 a sistemas de sedimentación primaria más humedales, estas tecnologías son de bajo costo de inversión y de operación simple, en el caso de este estado en general se dispone de terrenos extensos para su construcción, esta característica es importante ya que los procesos por métodos naturales como lagunas y humedales requieren de áreas extensas para su construcción.



Distrito Federal. El Distrito Federal es el estado con el mayor número de habitantes y la menor superficie, la cual es de 1,469.00 Km², para el año 2008 la densidad de población era de 5,909 habitantes por Km², para el mismo año el PIB fue de 17.5 del total nacional, lo cual indica el D.F. cuenta con la capacidad técnica y financiera para la implementación de soluciones para el tratamiento de aguas residuales; respecto al tratamiento de agua residual para el 2008 existían 27 PTAR en las que el proceso implementado fue lodos activados, sin embargo, debido al espacio disponible y requerido para la construcción de PTAR basadas en este proceso la capacidad de las PTAR sumaron un caudal tratado de 3.12 m³/s menor que en estados que cuentan con una mayor disponibilidad de espacio y una situación económica semejante, por ejemplo, Nuevo León el cual trata un caudal de aguas residuales municipales de 11.65 m³/s y cuenta con 61 PTAR municipales, de las cuales 19 están basadas en lagunas de estabilización y 35 en lodos activados estos procesos requieren de áreas moderadas a extensas para su construcción.

Otros estados como Querétaro, Puebla, Veracruz, entre otros que se caracterizan por tener un grado de marginación moderado, un PIB entre 3 y 4 del total nacional y un área mayor que el D.F. pero menor que el estado de Chihuahua, emplean tecnologías con grados de operación simples hasta complejos y de costos de inversión, operación y mantenimiento de altos a bajos, esta situación se debe a que las condiciones económicas y de desarrollo de la población, así como la disposición de espacio lo permiten.

Con respecto a los estados con índices de marginación de altos a muy altos los procesos y tecnologías predominantes son aquellos que tienen consumos energéticos bajos y son de operación simple, ya que no cuentan con la capacidad financiera para implementar tecnologías que requieran de mano de obra calificada para su operación y que esta no esté disponible en el municipio en cuestión, asociado a estos aspectos esta la disponibilidad de una mayor área para una PTAR, por tanto, las PTAR que se encuentran en los municipios de estos estados están basadas en lagunas de estabilización, humedales, fosas sépticas, sedimentación convencional, entre otros,



2.1.3 Análisis y estimación de costos índice para las tecnologías de tratamiento de aguas residuales municipales más utilizadas en México.

En el análisis de los factores que influyen en la selección de tecnologías se determinó que uno de los principales criterios para elegir la mejor alternativa es el costo total de la tecnología, los costos de inversión y los costos de operación y mantenimiento que incluyen: Los costos de servicios auxiliares como la energía entre otros. Sin embargo el costo total real de todo un sistema de tratamiento de aguas residuales municipales depende en gran medida del diseño de éste. Sin embargo, con base en las plantas de tratamiento existentes se puede llegar al desarrollo de ecuaciones cuyo objetivo sea la estimación de los principales costos asociados a las diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales considerando el caudal tratado, éste es un parámetro directamente relacionado con el diseño de toda una planta de tratamiento de aguas residuales municipales.

Estimar los costos principales es fundamental para aplicarlos en la planeación de inversiones y en la estimación de los montos presupuestarios de proyectos de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales para las tecnologías principales del tratamiento de aguas residuales en México.

La información que se presenta en este apartado es resultado del procesamiento de información documental referente factores que impactan en los costos de inversión, operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

2.1.3.1 Tratamiento primario avanzado.

2.1.3.1.1 Factores que intervienen en el costo.

Los costos de la precipitación química dependen de diversas variables, incluyendo las características del agua residual a tratar, el tipo de reactivo químico y la cantidad dosificada, el volumen de agua a tratar y el nivel de purificación en el agua que se deba obtener (10).



El tratamiento primario avanzado, es una modificación que se hace a un sedimentador primario con el objetivo de aumentar la eficiencia de remoción de sustancias contaminantes, mediante la adición de químicos, ya que esto se lleva a cabo en un mismo equipo (sedimentador secundario) los costos son bajos en comparación algunos tratamientos biológicos secundarios (11).

El impacto en la disminución de costos se debe principalmente a la reducción de costos de terreno en comparación con los tratamientos biológicos secundarios que requieren de un reactor para llevar a cabo la remoción de materia orgánica y sólidos suspendidos principalmente, en donde el sedimentador primario precede a este reactor y tiene la función de remover únicamente sólidos sedimentables. Sin embargo, los costos no son despreciables ya que en este proceso se requiere de la adición de químicos y en algunos casos se suministra aire, este es el caso de la flotación por aire disuelto(10).

Los costos operativos varían de acuerdo a los distintos tipos de aplicación ya que de esto depende la adición de las sustancias químicas coagulantes y/o floculantes para llevar a cabo una precipitación y de las condiciones del lugar (10). Este tipo de plantas de tratamiento se emplean en México, ya que pueden remover hasta el 75% de la materia orgánica que está asociada a partículas susceptibles de flocular (11).

Este tratamiento es logra una eficiencia del 60 al 75 % de remoción. Sin embargo, la remoción de materia orgánica es baja comparada con los sistemas biológicos convencionales(11).

2.1.3.1.2 Ventajas y desventajas asociadas a los costos.

a) Ventajas.

- I. La precipitación química es un tratamiento tecnológicamente establecido con la disponibilidad de equipos y varios productos químicos de diferentes costos.
- II. Algunos tratamientos químicos, especialmente la cal, son muy baratos.
- III. Los costos de operación y mantenimiento son bajos, ya que no se requiere de controles muy sofisticados para adicionar las sustancias químicas floculantes y para mantener el pH estable.



b) Desventajas.

- I. La adición de sustancias químicas, especialmente la cal, aumenta el volumen de los lodos en un 50 % más, este aspecto incrementa el costo de tratamiento de los lodos residuales.
- II. Se requieren grandes cantidades de sustancias químicas por lo que los gastos de transporte y almacenamiento se incrementan.
- III. Los polímeros pueden ser costosos.

La elección del coagulante más eficaz depende de los resultados de la prueba de jarras, la facilidad de almacenamiento, la facilidad de el transporte, y las consideraciones y los costos asociados a la operación y mantenimiento de los equipos.

2.1.3.2 Lodos activados.

En el caso de la tecnología de lodos activados existen múltiples variantes del proceso. Sin embargo, se identifican aspectos que influyen en el costo de la tecnología, diferenciando una modalidad de otra.

2.1.3.2.1 Factores que intervienen en el costo.

A continuación se describen los factores que intervienen en los costos de cada variante del sistema de lodos activados.

a) Lodos activados convencionales (aireación con burbuja fina).

Una de las variantes con mayor aplicación es el sistema de aeración por burbuja fina. Este proceso consume aproximadamente del 50 al 65 % de la demanda neta total de energía en una planta de tratamiento de agua con un sistema típico de lodos activados. Por tal motivo se debe diseñar el sistema que cumpla con las necesidades de mezclado y oxígeno con el menor costo posible(7).



Una vez determinados los requisitos para la aeración se comparan los costos estimados de los diferentes sistemas para el suministro de oxígeno. Los principales elementos que influyen en el costo de construcción para esta modalidad son los costos de aeración, las tuberías de aire, los dispositivos de aeración y sus soportes, los costos de limpieza de los equipos de aire, sopladores y las construcciones donde se encuentran estos, los gastos principales son aquellos asociados con la operación y mantenimiento, alimentación del aire, limpieza y sustitución del equipo de aeración.

Los gastos de operación están determinados por la forma del sistema de aeración de burbujas y por las características del influente de aguas residuales. Mientras que los costos de limpieza dependerán del tipo de dispositivo de aeración, de la forma de extracción que se utilice.

b) Zanjas de oxidación.

En el caso de las zanjas de oxidación que son consideradas como una variante más del proceso de lodos activados se ha identificado que debido al volumen de los tanques y el área construida que son mucho mayores que en otros tratamientos convencionales secundarios los costos son mucho mayores que los de otros procesos secundarios, especialmente en áreas urbanas en donde el terreno disponible es muy costoso.

Los reactores verticales, en los cuales el flujo avanza por el reactor hacia el fondo del tanque, son generalmente más costosos que los reactores horizontales tradicionales. Sin embargo, debido a que estos requieren un menor terreno que los reactores horizontales tradicionales, el uso de los reactores verticales puede producir una reducción significativa en el costo total de inversión en donde el precio del terreno sea alto.

Los costos de las plantas con zanjas de oxidación varían de acuerdo con la capacidad de tratamiento, las consideraciones de diseño por los límites del efluente y otros factores del sitio.



Las zanjas de oxidación tienen costos de operación y mantenimiento significativamente menores que otros procesos de tratamiento secundario. Con relación a otras tecnologías de tratamiento las necesidades de energía son bajas, el control por parte de los operadores es mínimo y normalmente la adición de compuestos químicos no es requerida(12).

c) Reactores Secuenciales por lotes (SBR por sus siglas en inglés de Sequential Batch Reactor).

Las estimaciones de costos de inversión y operación son específicas para cada sitio. En general, los costos incluyen el costo de los tanques, las obras en el sitio de trabajo, la excavación y relleno, la instalación, y los costos inherentes a la tecnología como: Los sopladores, los difusores, las válvulas operadas electrónicamente, los mezcladores las bombas de lodo, los decantadores y los paneles de control (13).

2.1.3.2.2 Ventajas y desventajas asociadas a los costos.

En la siguiente tabla se muestran las ventajas y desventajas económicas asociadas a las diferentes modalidades del proceso de lodos activos.

Tabla 18. Ventajas y desventajas económicas para los procesos de lodos activados.

Modalidad	Ventajas	Desventajas
Lodos activados Aireación extendida	<ul style="list-style-type: none">➤ Existe una reducción en los lodos residuales producidos y por tanto disminuyen los costos asociados al tratamiento de lodos activados(14).➤ La ventaja principal de este proceso es la disminución de costos asociada a que las instalaciones para la manipulación de lodos son muy pequeñas al compararlas con las que se emplean en el procesos de lodos activados convencional(14).	<ul style="list-style-type: none">➤ Incremento en el costo de inversión debido a un mayor consumo de oxígeno, es el doble del requerido en el proceso de lodos activados convencional, concretamente se estima que en aeración extendida se emplean 18 kWh/hab mientras que en lodos activados convencional es de 8 kWh/hab (14).
Zanjas de oxidación	<ul style="list-style-type: none">➤ La principal de las zanjas de oxidación es su capacidad para lograr los objetivos de remoción de contaminantes con bajos	<ul style="list-style-type: none">➤ Requiere una superficie de terreno más grande que otras opciones de tratamiento con lodos activados. Esto puede ser



Modalidad	Ventajas	Desventajas
	<p>costos de operación y mantenimiento.</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Reducción en los costos de tratamiento de lodos ya que produce menos lodos que otros sistemas biológicos. ➤ La eficiencia de operación en cuanto al uso de energía da como resultado la disminución en los costos por la reducción en el consumo de energía en relación con otros procesos biológicos. 	<p>muy costoso, restringiendo la factibilidad de uso de las zanjas de oxidación en áreas urbanas, suburbanas y otras áreas donde en donde el costo de la adquisición de terrenos es relativamente alto(12).</p>
<p>Reactores Secuenciales por lotes (SBR)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ La homogenización de caudales, la sedimentación primaria (en la mayoría de los casos), el tratamiento biológico y la sedimentación primaria pueden lograrse en un reactor/tanque único, por lo cual el ahorro es potencial en el capital de inversión por la eliminación de los equipos antes mencionados(13). <p>El costo por el terreno es menor en comparación con las demás modalidades ya que se requiere de un área superficial mínima(13).</p>	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se requiere de un nivel mayor de sofisticación (en comparación con los sistemas convencionales) de las unidades de programación temporal y controles, especialmente en sistemas de mayor tamaño, estos controles incrementan el costo del tratamiento(13). ➤ Los costos de mantenimiento y operación se incrementan debido a que los controles antes mencionados por ser más complejos, requieren de un nivel más alto de mantenimiento (comparado con los sistemas convencionales)(13).

FUENTE: Elaboración propia

Para todas las variantes de lodos activados se ha identificado que el costo de inversión depende directamente de la capacidad de tratamiento.

El costo de inversión es muy sensible a cambios en los equipos de aeración y en el área y materiales de construcción que se requieran, sin embargo, entre mayor sea el caudal a tratar mayor será el costo de inversión.



2.1.3.3 Filtros percoladores.

2.1.3.3.1 Factores que intervienen en el costo.

El costo de construcción de los filtros percoladores incluye la mano de obra y materiales necesarios para la construcción, los costos de operación y mantenimiento. Generalmente los filtros percoladores se empaquetan con piedra, ladrillos, madera o medios plásticos, dependiendo del material seleccionado se tendrá un costo determinado(15).

Los filtros percoladores son diseñados de acuerdo a las condiciones específicas del lugar, por tal motivo, los costos dependen de éstas.

2.1.3.3.2 Ventajas y desventajas asociadas a los costos.

a) Ventajas.

- Los elementos del proceso son durables (15).
- Los requerimientos de energía son bajos, este aspecto se ve reflejado en los costos por la electricidad(15).
- Se requiere de un nivel moderado de conocimientos para la operación de esta tecnología.

b) Desventajas.

Incremento en el costo por ser necesario un tratamiento adicional para cumplir con las normas de descarga(15).

2.1.3.4 Humedales.

2.1.3.4.1 Factores que intervienen en el costo.

Las comparaciones de costos han mostrado que a caudales mayores a 2.7 L/s normalmente es más económico construir sistemas de Humedales. Generalmente los



sistemas de humedales se describen típicamente por la posición de la superficie del agua y/o el tipo de vegetación presente, existen dos tipos de humedales que son los siguientes:

a) Humedales de flujo libre superficial (FLS).

Los principales elementos que se incluyen en los costos de inversión de los humedales FLS son similares a los de sistemas de lagunas, incluyendo el costo del terreno, la evaluación del sitio, la limpieza del mismo, la movilización de suelos, el recubrimiento, el medio de sembrado, las plantas, las estructuras de entrada y descarga, las cercas, tuberías misceláneas, la ingeniería, los costos legales, las contingencias, y los gastos fijos y ganancia del contratista. El recubrimiento puede ser el elemento más costoso. Por ejemplo, una membrana lineal se podría acercar a un cuarenta por ciento de los costos de construcción. En muchos casos la compactación de suelos nativos *in-situ* proporciona una barrera suficiente para la contaminación subterránea(16).

b) Humedales de flujo subsuperficial.

La tecnología de humedales de Flujo superficial está mejor adaptada para aplicaciones de tamaño pequeño y mediano (<2.7 L/s) y en sistemas de mayor tamaño en los cuales se tiene un potencial significativo de contacto con el público, mosquitos o generación de olores. Sin embargo, en climas extremadamente fríos pueden no ser factibles desde el punto de vista económico o técnico (17).

En estos sistemas los principales elementos que se incluyen en los costos de inversión de los humedales FS son similares a muchos de los requeridos para los sistemas de lagunas. Estos incluyen el costo del terreno, la evaluación del sitio, la limpieza del sitio, la movilización de suelos, el recubrimiento, el medio de grava, las plantas, las estructuras de entrada y descarga, las cercas, tuberías misceláneas, la ingeniería, los costos legales, las contingencias, y los gastos fijos y ganancia del contratista. El medio de grava y el recubrimiento pueden ser los elementos más costosos de este tratamiento (17).



En los estados del Golfo de México en donde los suelos son arcillosos a menudo eliminan la necesidad del recubrimiento, el costo de traer la grava puede representar el 50 por ciento de construcción. En otras localidades en donde la grava está disponible localmente pero se requiere de una membrana de recubrimiento, el costo de ésta puede ser cerca del 40 por ciento del costo de construcción (17).

2.1.3.4.2 Ventajas y desventajas asociadas a los costos.

Tabla 19. Ventajas y desventajas económicas para el tratamiento de aguas residuales mediante humedales.

Modalidad	Ventajas	Desventajas
Humedales de flujo libre superficial (FLS)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Los humedales FLS proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de los operadores. ➤ Los humedales FLS pueden ser menos costosos de construir, operar y mantener que los procesos mecánicos de tratamiento. ➤ Los sistemas de humedales no producen biosólidos ni lodos que requieren de un tratamiento o disposición posterior. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Costo alto debido a las necesidades de terreno para los humedales FLS pueden ser grandes.. ➤ En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, los humedales en climas extremadamente fríos puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico. ➤ El aumento del tamaño del humedal y, consecuentemente, el tiempo de retención puede hacerse en forma compensatoria pero puede no ser eficiente en términos económicos
Humedales de flujo subsuperficial (FS)	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Los humedales FLS proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de los operadores. ➤ Los humedales FS pueden ser menos costosos de construir, y usualmente también son menos costosos para operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento diseñados para un nivel equivalente de calidad de efluente ➤ Los sistemas de humedales no producen biosólidos ni lodos 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Costo alto debido a las necesidades de terreno para los humedales FLS pueden ser grandes. ➤ En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, los humedales en climas extremadamente fríos puede no ser factible desde el punto de vista económico o técnico ➤ Si bien los humedales FS pueden ser de menor superficie que los humedales FLS para la remoción de los contaminantes del agua residual, el costo mayor del medio de grava en los humedales FS puede dar como resultado costos



	que requieren de un tratamiento o disposición posterior	de construcción más altos para sistemas con capacidad mayor a 2.7 L/s
--	---	---

FUENTE: Elaboración propia con información de USEPA (17).

2.1.3.5 Comparación de costos para diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales.

La estimación de los costos es importante para tener un valor aproximado en el momento de decidir que tecnología es la que se utilizará, por medio de ecuaciones obtenidas mediante el tratamiento de datos de costos de inversión para plantas de tratamiento de aguas residuales municipales entre 1991 y 2002 (18).

Tabla 20. Ecuaciones paramétricas para estimar los costos índice de inversión de tecnologías para el tratamiento de aguas (18)⁴.

Proceso	Ecuación obtenida de la curva
Primario avanzado	INVERSIÓN=1272 Q 0 ^{.6843}
Lodos activados	INVERSIÓN=1032.4 Q ^{0.7633}
Lagunas aireadas	INVERSIÓN=-184430 +47,677 Ln Q
Filtros biológicos	INVERSIÓN=319.6 Q ^{0.964}
Lagunas de estabilización	INVERSIÓN=740 Q 0.6928
Humedales	INVERSIÓN=-1,722.7 + 3,453.2 Ln Q

FUENTE: IMTA, 2002.

Los valores calculados con estas ecuaciones pueden ser actualizados mediante índices de costos de acuerdo al año para el que se calcule este costos por tecnología, se debe considerar que los valores sólo son estimaciones que son una herramienta para tener un monto indicativo del costo del tratamiento para aguas residuales municipales y para utilizarse como comparación, ya que para evaluar económicamente un proyecto deben realizarse estudios y análisis económicos detallados.

⁴ De los cuatro modelos de ajuste de curva se aplicaron a cada grupo de datos: lineal, exponencial, logarítmica y potencial y se seleccionó aquella que arrojó la mejor correlación (generalmente mayor de 0.9) (25).



Los flujos que se toman en cuenta para las gráficas son valores del gasto promedio en México. Los procesos considerados para la recopilación de datos son aquellos que son de uso frecuente en el país como se muestra en el capítulo uno del presente trabajo. En las figuras 12, 13 y 14 se observa cual es la tendencia de los costos de inversión con respecto al flujo de aguas residuales tratadas de las tecnologías de mayor uso en México. Se puede apreciar que los costos de inversión están directamente relacionados con el flujo del influente. Sin embargo, algunas tecnologías de tratamiento para caudales mayores sus costos son muy semejantes, en este caso se deben evaluar otros aspectos técnicos y ambientales para que la elección de tecnologías sea más adecuada.

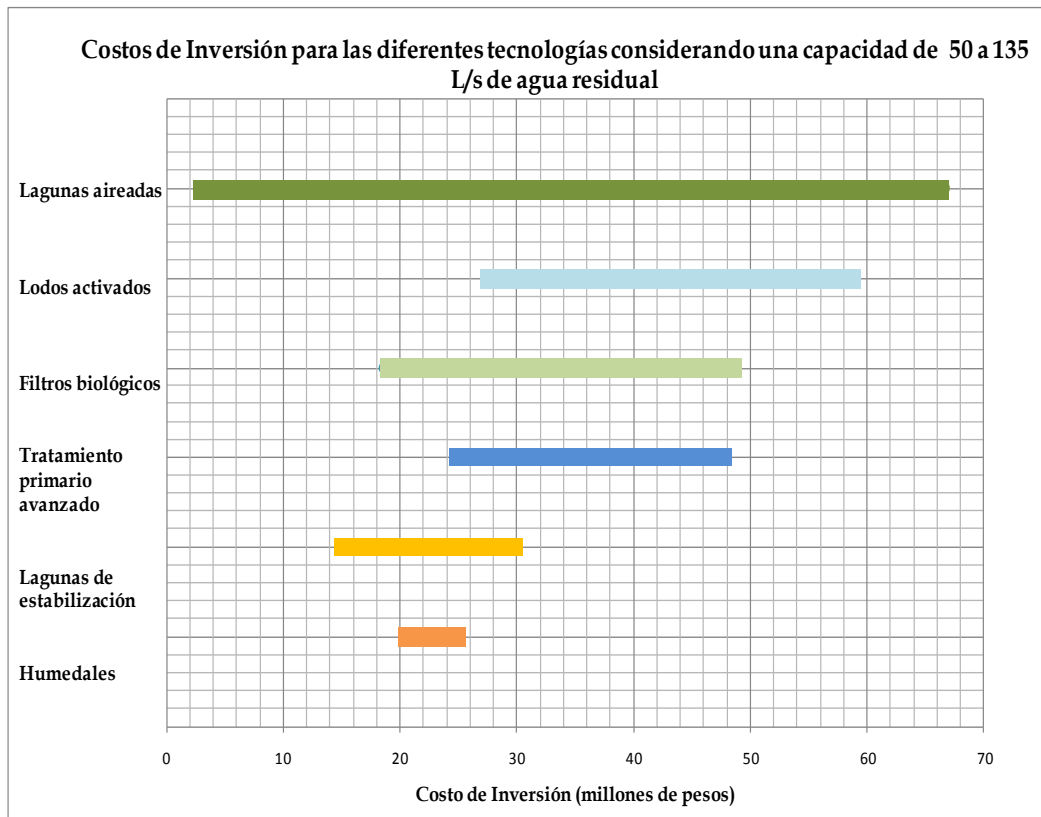
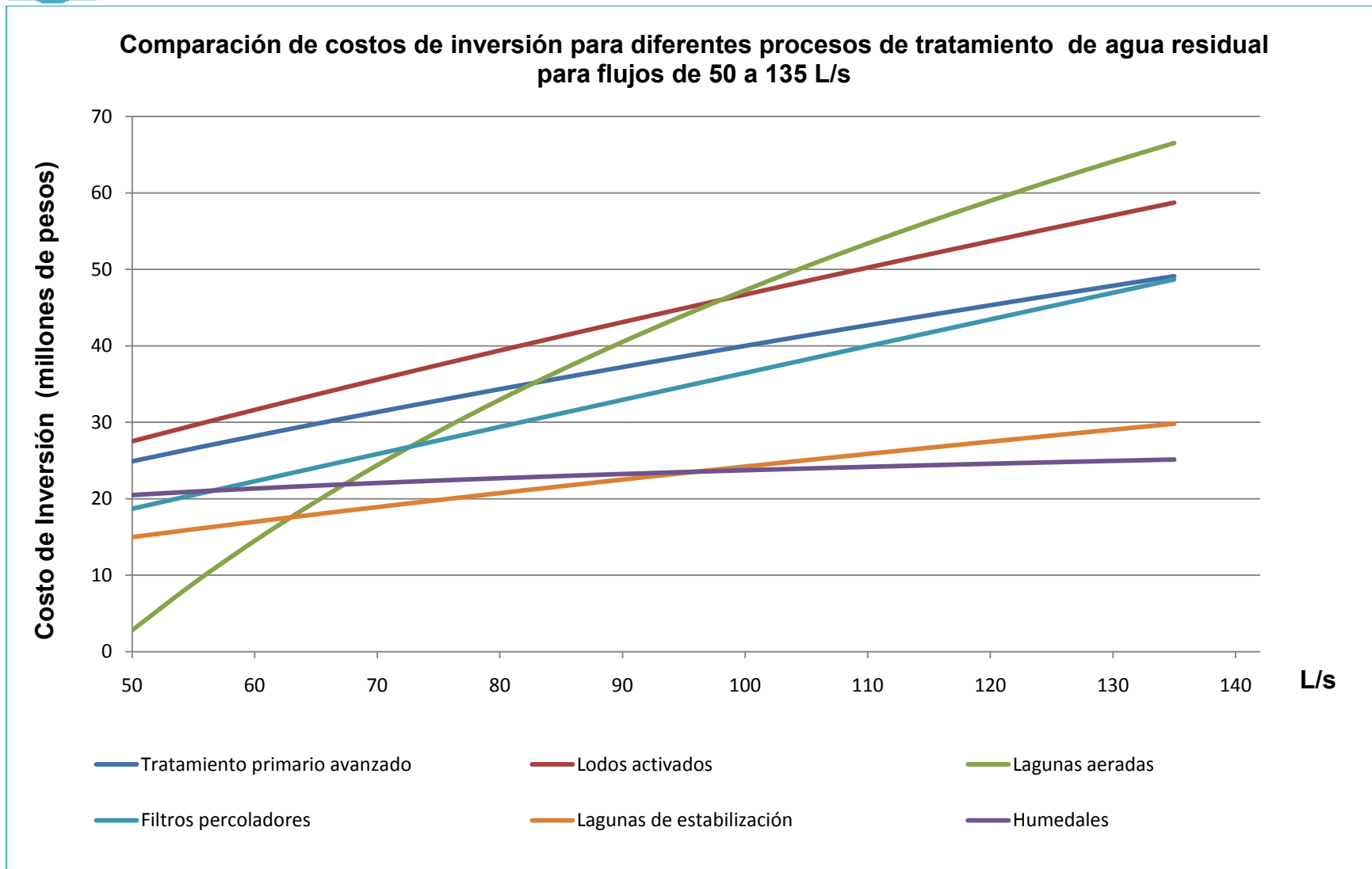
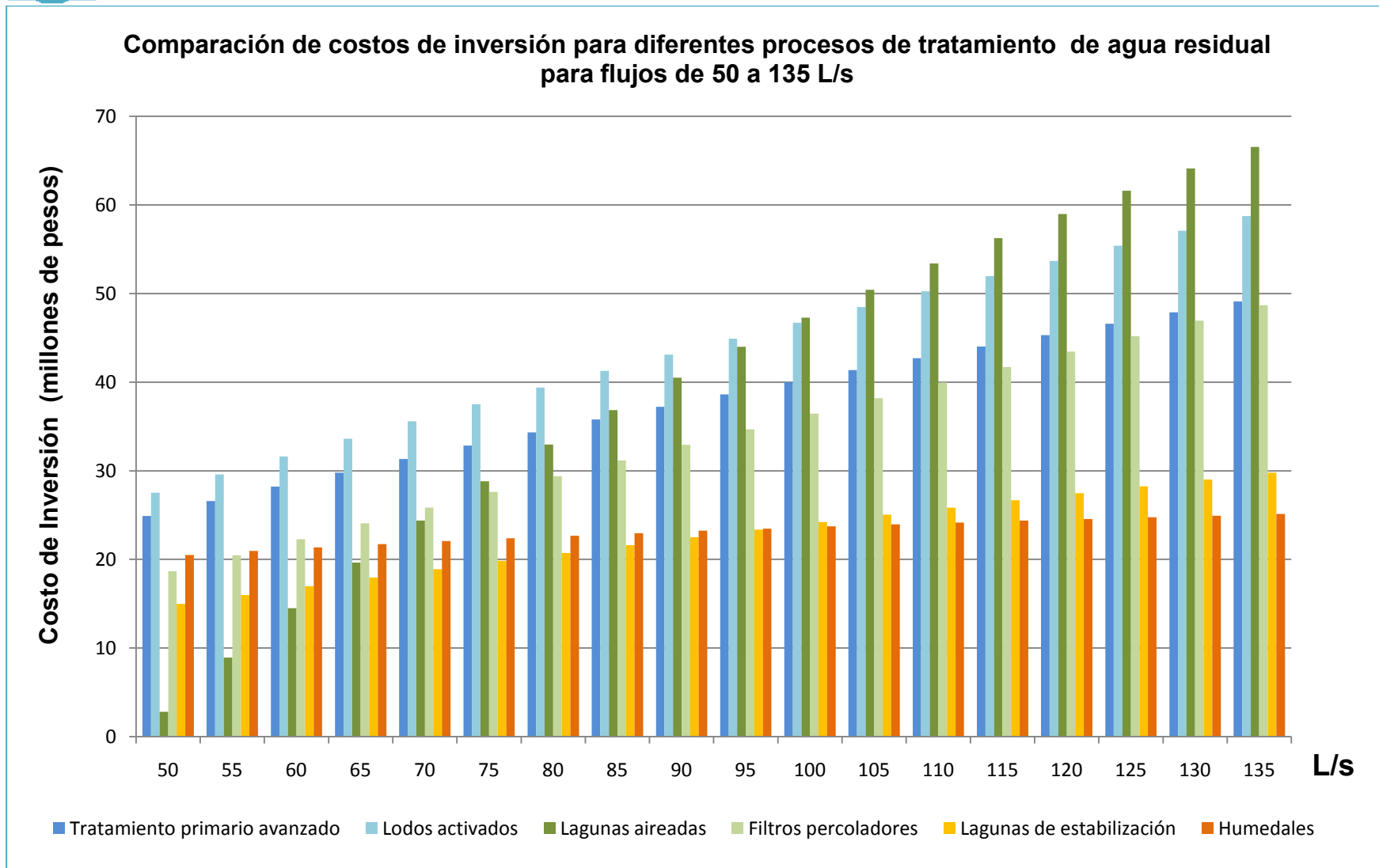


Figura 13. Costos de inversión con respecto al caudal de aguas residuales tratadas.



FUENTE: Elaboración propia con datos del IMTA.

Figura 14. Costos de inversión con respecto al caudal de aguas residuales tratadas.



FUENTE: Elaboración propia con datos del IMTA.

Figura 15. Comparación de costos de inversión con respecto al caudal de aguas residuales tratadas.



2.2 Análisis de las metodologías de selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales.

En materia de tratamiento de aguas y reúso se han desarrollado varias metodologías para apoyar el trabajo de planificación, en los procesos que tienen relación con la selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales municipales, orientados tanto a países desarrollados como a países en vías de desarrollo.

La tecnología tiene varias definiciones dependiendo del contexto en el que se encuentre. Generalmente su significado se asocia con un elemento tangible en el presente trabajo se define tecnología como el conocimiento para producir un bien de consumo o un servicio. Adicionalmente el concepto de tecnología debe considerar una visión más integral que involucre un equipo humano y desarrollo físico y de investigación.

El modelo de desarrollo sustentable ha contribuido al cambio en los programas para el manejo integral del agua, por esta razón se han generado herramientas para prevenir, remediar y controlar la contaminación de los recursos hídricos.

Diferentes autores y especialistas han planteado criterios y aspectos que hay que tomar en cuenta para la selección adecuada de la tecnología para el tratamiento de aguas residuales de origen municipal.

Las metodologías son elaboradas para aplicarse en cualquier lugar del mundo. Sin embargo lo realmente importante es definir criterios específicos del lugar, así como su ponderación para la selección de la tecnología.

2.2.1 Modelo de selección de tecnología CINARA, Colombia.

El Instituto CINARA, de la Universidad del Valle, con el respaldo del Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia y otras instituciones del sector, en 1996 llevaron a cabo el Proyecto de selección de tecnología y Análisis de Costos en Sistemas de



Tratamiento de Agua para abastecimiento y saneamiento básico. Este Proyecto incluye el desarrollo de un modelo de selección de tecnología, el cual fue concebido como una herramienta de planeación para apoyar el proceso de identificación de las opciones tecnológicas sostenibles, considerando en forma conjunta, los aspectos socioculturales, económicos, técnicos e institucionales, debido al reconocimiento de las instituciones antes mencionadas relacionadas con la planificación de las inversiones en materia de agua. En este modelo conceptual de tecnología se presentan Niveles de selección de una tecnología (Figura 16). Un Nivel de selección de opera como un “filtro” donde se descartan las tecnologías que no cumplen con las condiciones de sostenibilidad de acuerdo a los valores asignados a las variables (datos de entrada) para una aplicación específica.

La estructura de este modelo involucra datos de entrada, criterios básicos, procedimientos y selecciones parciales en cada uno de los niveles considerados por el modelo conceptual.

En la Tabla 21 se resume la información requerida en cada uno de los niveles del modelo de selección.

Tabla 21. Descripción general de la información requerida en cada nivel del modelo de selección de tecnología.

Nivel	Información requerida
1. Institucionalización de la tecnología.	<ul style="list-style-type: none">• Población factor máximo.• Factor máximo diario.
2. Aspectos socioculturales de la localidad.	<ul style="list-style-type: none">• Tipo de calidad y distancia al centro regional urbano.• Saber académico y saber comunitario.• Accesibilidad a repuestos y materiales y soporte técnico local.• Instituciones públicas y privadas.• Instituciones públicas y privadas.• Organización de la sociedad civil.• Gestión de la administración municipal.• Gestión de los servicios públicos.
3. Disponibilidad de recursos y materiales.	<ul style="list-style-type: none">• Disponibilidad de insumos químicos.• Características de la energía eléctrica.



Nivel	Información requerida
4. Riesgo sanitario y eficiencia de las tecnologías.	<ul style="list-style-type: none">• Disponibilidad de medios filtrantes.• Tipo de fuente.• Indicadores de calidad de agua para estimar el riesgo agudo en forma directa a través de inspección sanitaria.• Indicadores de calidad de agua para estimar la posibilidad de riesgo crónico.
5. Análisis de costos.	<ul style="list-style-type: none">• Precios unitarios para estimar la inversión inicial.• Costos de requerimientos para administración, operación y mantenimiento.• Costos específicos para plantas desalinizadoras y plantas compactas.
6. Capacidad y disponibilidad de pago.	<ul style="list-style-type: none">• Ingreso promedio por familia.• Distribución de la población por estrato socioeconómico.• Recursos disponibles para subsidios.• Disponibilidad a pagar, DAP.

FUENTE: Galvis (1997).

Los procedimientos se ejecutan sobre la base de la información de entrada y los criterios básicos considerados. Con base en estos procedimientos y la recopilación de experiencias en diferentes áreas del conocimiento relacionadas con la selección de tecnología, se construyen los modelos de decisión en cada Nivel.

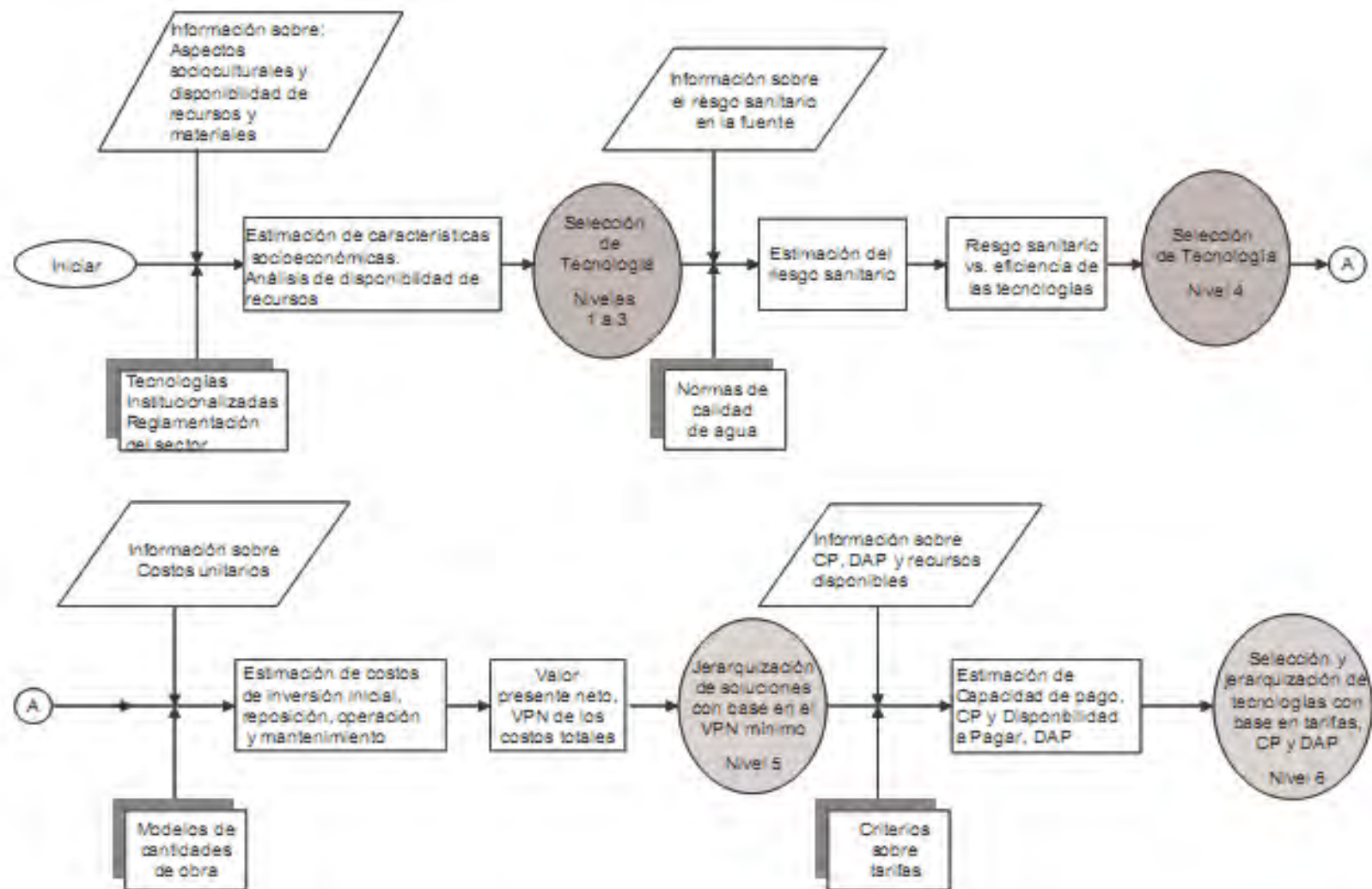


Figura 16. Estructura del Modelo conceptual de Selección de Tecnología(19).



2.2.2 Modelo de selección de tecnología UNEP.

La UNEP (United Nations Environment Programme) propone un modelo para la selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales. Este modelo considera que el desarrollo tecnológico es paralelo al crecimiento económico, principalmente en términos de rendimiento y disponibilidad de opciones para el tratamiento de aguas residuales. Por tanto, al seleccionar e invertir en una tecnología de tratamiento de aguas residuales, es importante investigar si es posible minimizar o prevenir la contaminación. En cualquier iniciativa de control de la contaminación es necesario analizar la eficiencia en función de los costos y compararla con las otras alternativas concebibles. *El objetivo principal de la metodología* descrita es orientar a los planificadores urbanos y responsables de tomar decisiones sobre cómo proceder al seleccionar tecnologías.

Antes de tomar cualquier decisión se considera que las tecnologías de tratamiento de agua residual dependen principalmente de las características del agua a tratar y de los objetivos del tratamiento para obtener una calidad de efluente determinada (Figura 17). Por otra parte, se pueden tomar en cuenta los parámetros del efluente para evaluar la factibilidad técnica y financiera del proceso de tratamiento considerado.

La selección de la tecnología debe ser ambientalmente sostenible, apropiada a las condiciones locales, aceptada por los usuarios y accesible para quienes tienen que pagar por ella. Aquellos procesos simples y reproducibles que permiten una posterior actualización, desarrollo y que pueden ser operados y financiados por la comunidad local son, a menudo, los considerados más apropiados y factibles económicamente (United Nations Environmental Programme, 1997).

Las metas de uso de una tecnología se plantean principalmente en términos de la calidad deseada del efluente. Esto depende del uso esperado de las aguas receptoras o del reúso protegiendo la salud de la población. Estos usos del agua se expresan en las normas de emisión. De esta manera se puede optar por una tecnología de



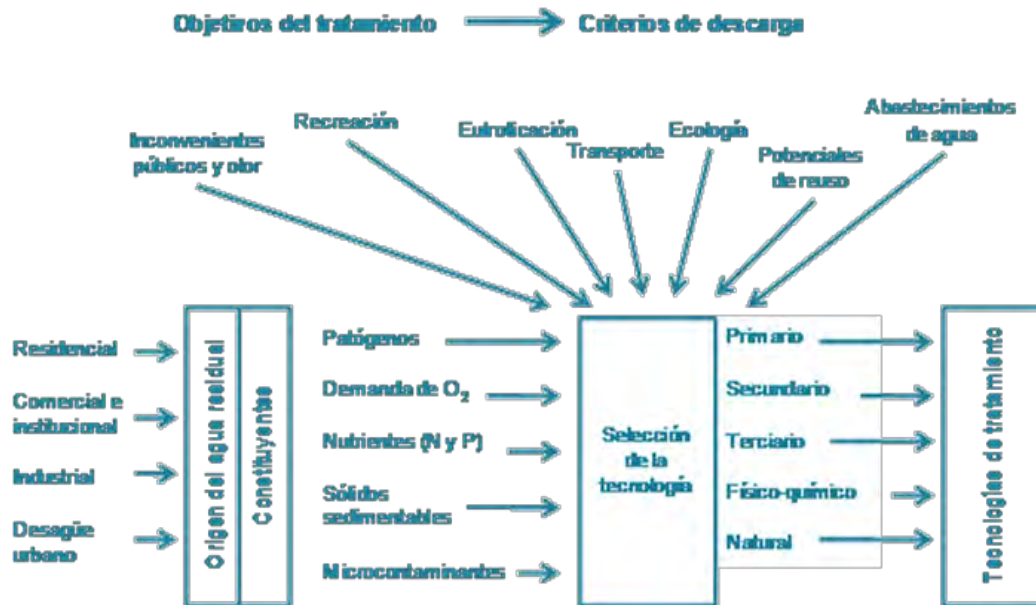
tratamiento u otra acción para remover y prevenir la descarga de contaminantes en el agua residual.

Para la selección de tecnologías se aplican los siguientes criterios generales:

1. Eficiencia y rendimiento promedio de la tecnología.
2. Confiabilidad de la tecnología.
3. Manejo institucional.
4. Sostenibilidad financiera.
5. Aplicación en los esquemas de reúso.
6. Determinación de la reglamentación.

También se consideran los costos de operación y mantenimiento, los costos de inversión (que cubren principalmente el costo del terreno, los cimientos, equipo electromecánico y la construcción), entre otros costos. La operación y el mantenimiento constituyen una parte esencial del manejo de aguas residuales municipales e influyen directamente en la selección de tecnologías. Se plantea que el proceso de selección de tecnologías implica el aprovechamiento óptimo de múltiples criterios, incluidos los factores tecnológicos, logísticos ambientales, financieros e institucionales en un horizonte de 10 a 20 años.

Básicamente se generan herramientas y se lleva a cabo un análisis de las tecnologías, sus características y los factores que influyen directamente en su operación y en la calidad que debe tener el efluente cumpliendo con la normatividad. Sin embargo, en el documento analizado no se encuentra el uso de una secuencia de pasos o un método matemático que permita una calificación para las alternativas tecnológicas y el proceso de selección de la mejor alternativa es más difícil y menos objetivo.



FUENTE: UNEP (1997).

Figura 17. Selección de la tecnología de tratamiento según el origen del agua residual.

2.2.3 Modelo de selección de tecnologías EPA, USA.

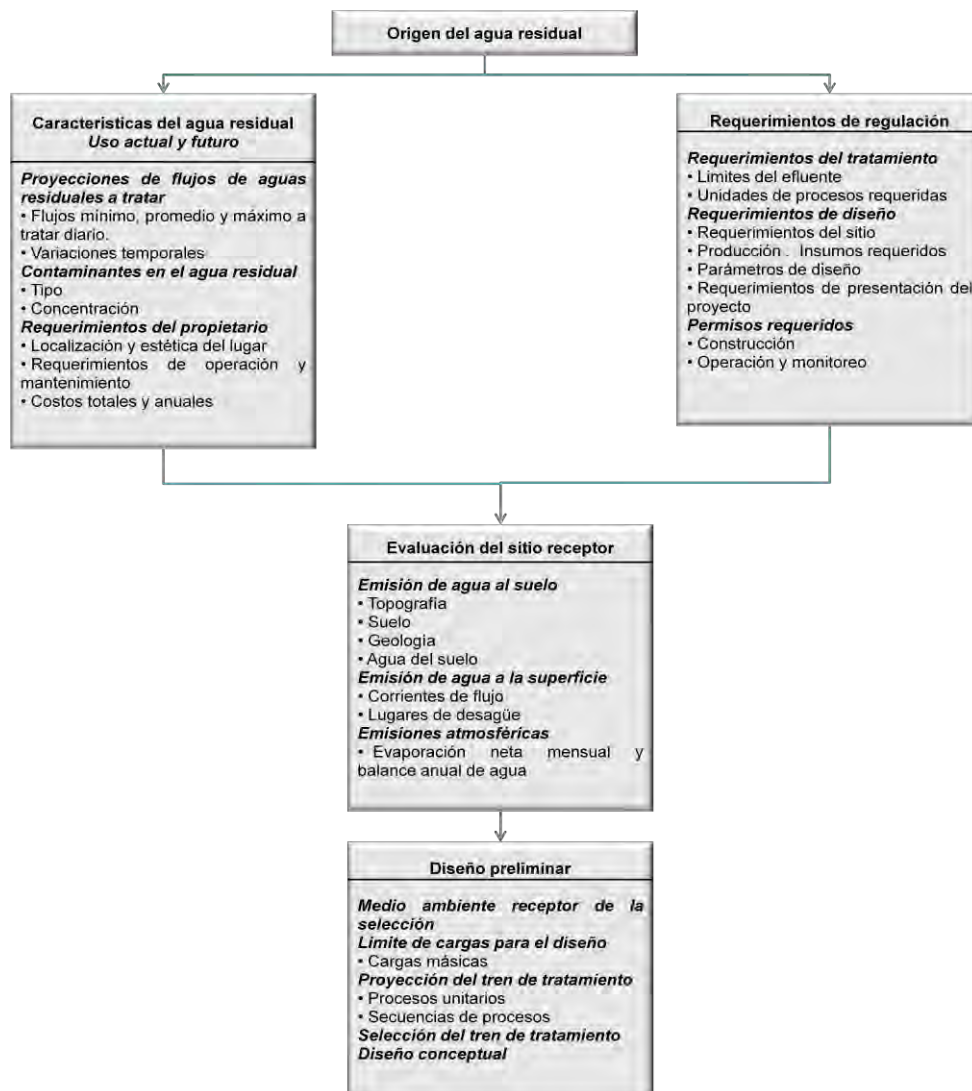
La EPA (Environmental Protection Agency) es otra institución que cuenta con un manual para el manejo de aguas residuales: en este documento se toman como principales consideraciones para la selección de tecnología aspectos como el volumen del influente a tratar, la composición y características del agua residual que determinan el tamaño y la ubicación de la planta. Como criterios secundarios se toman en cuenta las características geológicas de la región, las características hidrológicas y el área estimada de suelo, así como el tipo de combustible consumido por la tecnología de tratamiento, los criterios anteriormente mencionados influyen directamente en el diseño y, por tanto, en la selección del sistema más apropiado.

En la Figura 18 se muestran las etapas y consideraciones que toma un experto para la evaluación y selección de una tecnología para el tratamiento de aguas residuales municipales.



El enfoque que se le da a la selección es con el fin de elaborar un diseño preliminar del sistema de tratamiento con los criterios ambientales tecnológicos y normativos que influyen directamente en el desarrollo de una planta de tratamiento de agua.

El enfoque de este documento es el análisis de los procesos de tratamiento de aguas residuales para lograr identificar la tecnología adecuada de acuerdo a los parámetros contenidos en el siguiente esquema (Figura 18).



FUENTE: USEPA Onsite Wastewater Treatment System Manual.

Figura 18. Etapas y consideraciones para la selección del tren de tratamiento de aguas residuales.



2.2.4 Modelo de selección de tecnología IRC.

El IRC (International Water and Sanitation Centre) contó con el respaldo de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para desarrollar un modelo de selección de tecnología empleado en el desarrollo de proyectos de abastecimiento y saneamiento de agua en zonas rurales y urbano marginales.

El modelo se elaboró considerando los principios de desarrollo sostenible y los aspectos técnicos, ambientales, institucionales y comunitarios.

Los principales factores que se consideran en este documento en la selección de tecnologías para el saneamiento, son los siguientes (Tabla 22):

Tabla 22. Factores que influyen en la selección de tecnología para el saneamiento en una comunidad.

Factores de importancia general	Factores pertinentes específicamente a O & M.
<p>1. Factores técnicos</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Diseño de preferencia (subestructura, piso, etc).➤ Normas técnicas y horizonte de vida de la tecnología.➤ La disponibilidad de materiales de construcción.➤ Costo de la construcción.	<ul style="list-style-type: none">➤ Requerimientos de operación y mantenimiento.➤ De fácil acceso.➤ Utilización de residuos en descomposición.
<p>2. Los factores ambientales</p> <ul style="list-style-type: none">➤ La textura de la tierra, la estabilidad, la permeabilidad.➤ Nivel de las aguas subterráneas.➤ Control de la contaminación ambiental.➤ La disponibilidad de agua.➤ La posibilidad de inundaciones.	<ul style="list-style-type: none">➤ Implicaciones de la operación y el mantenimiento para la protección del medio ambiente.➤ Protección contra la contaminación de las aguas subterráneas.➤ Protección contra la contaminación de las aguas subterráneas.



Factores de importancia general	Factores pertinentes específicamente a O & M.
<p>3. Los factores institucionales</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Factores nacionales y estrategias locales.➤ Funciones y responsabilidades de los agentes implicados.➤ La capacidad de formación.➤ La disponibilidad de subsidios y financiamientos.➤ La disponibilidad de mano de obra local.	<ul style="list-style-type: none">➤ La capacidad de mantenimiento de alcantarillado.➤ Posible participación del sector privado.➤ Las asignaciones presupuestarias para el saneamiento.
<p>4. Factores de la comunidad</p> <ul style="list-style-type: none">➤ Los aspectos socioculturales: los tabúes, los hábitos, las tradiciones religiosas, las normas y reglamentos. El material de limpieza, la postura da la comunidad en materia de saneamiento, requisitos específicos de género.➤ Aspectos de Motivación: conveniencia, comodidad, la accesibilidad, privacidad, status y prestigio, salud, limpieza del medio ambiente, la propiedad.➤ Factores Desalentadores: el colapso de la fosa, generación de olores e insectos.➤ Factores de organización social: los roles de liderazgo, los líderes religiosos, maestros, trabajadores en materia de salud de la comunidad.➤ Otros factores: densidad de población.	<ul style="list-style-type: none">➤ Costos de O & M➤ O & M de capacitación y sensibilización para el saneamiento➤ Conocimiento de la salud y la percepción de los beneficios➤ Presencia de comité de saneamiento ambiental➤ Comportamiento y movilización social en materia de higiene y saneamiento.

FUENTE: Brikké (2003).

Después de identificar los factores para la selección de la tecnología se lleva a cabo un análisis de los datos obtenidos de acuerdo a los factores considerados, estos factores de selección son discutidos por los expertos y la comunidad finalmente selecciona una tecnología dándole mayor importancia a los aspectos que tienen que ver con la operación y el mantenimiento, ya que así se garantiza que la alternativa seleccionada funcionará eficientemente a lo largo de su vida útil. Sin embargo, el principal objetivo está relacionado directamente con el bienestar de la comunidad ya que es de aplicación en el ámbito de zonas rurales y urbano marginales.



2.2.5 Modelo de selección de tecnología Souza, Brasil.

En abril de 1997 en Brasil la preocupación por el desarrollo sostenible motivó un cambio en quienes realizan programas de investigación y planificación de los recursos hídricos. Este cambio llevó a considerar alternativas para el uso racional de los recursos naturales, incluidos la minimización de residuos y el reúso del agua. La selección de tecnologías para la recolección y tratamiento de aguas residuales deberá considerar, cada vez en mayor medida, alternativas que incluyan el reúso de agua. El enfoque de tratar el agua y seleccionar tecnologías deberá considerar, cada vez en mayor medida, alternativas que incluyan el reúso del agua. Esta metodología se basa en el uso de métodos de análisis de decisión con objetivos y criterios múltiples que permiten un tratamiento holístico de la selección de tecnología (20). Estos métodos sustituyen a los métodos económicos y de optimización criticados por monetarizar y materializar los factores involucrados. La metodología propuesta puede usarse en cualquier otra área ambiental y de saneamiento.

A continuación se describen los métodos de análisis de decisión para la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales que se pueden emplear en esta metodología.

En la Tabla 23 se presenta un resumen de las diferentes propuestas generadas desde 1987.

Tabla 23. Metodologías de análisis de decisión de para la selección de alternativas de tratamiento de aguas residuales.

Año	Autor	Descripción
1987	Wolf, P. Auswahl-und Bewertungskriterien für Kleine Klarangem.	Presento una metodología simple utilizando un método auxiliar para la toma de decisiones en el método de la media ponderada.
1988	Teclé, A.; Fogel, M.; Duckstein.	Introdujeron técnicas de análisis de decisión con objetivos múltiples, como el "Compromising Programing" y Electre I.
1991	Okun, D. A.	Su modelo tiene como principal objetivo la protección de FUENTES de abastecimiento de agua.



Año	Autor	Descripción
1991	Di Bernardo, L.	Enfatiza que la selección de la tecnología se realice basándose en la calidad del agua en la FUENTE y los objetivos del tratamiento según la normatividad vigente.
1992	Souza, M.A.A.	Souza desarrollo el modelo PROSEL-i ("Process Selection Vesion I"), utilizó los principios de la tecnología apropiada y el análisis de decisión con objetivos múltiples.
1993	Gobbetti , L.E.C.	En 1993 Gobbetti y Gobbetti & Barros aplicaron las técnicas de análisis multiobjetivos "Compromising Programing", Func/Eo Utilidade Multidimensional", Electre-I y Promethee para la Revisión del Plan Director de Desagües de San Paulo Brasil.

FUENTE: Elaboración propia

Esta metodología de selección propone algunos métodos de análisis de decisión que permiten la participación de la población y el tratamiento holístico y presenta las siguientes etapas:

1) Definición de los objetivos del sistema, del uso del agua y de la calidad de los efluentes tratados.

La planificación del reúso de agua debe realizarse a nivel de la cuenca hidrográfica y considerar la cooperación entre diferentes órganos y agentes interesados. Se debe incluir los siguientes puntos:

- ✓ Inventario de las necesidades de tratamiento y disposición de aguas residuales;
- ✓ Inventario de la demanda y suministro de agua;
- ✓ Inventario de los beneficios del abastecimiento de agua mediante el reúso.
- ✓ Análisis del mercado para el agua residual recuperada;
- ✓ Análisis técnico y económico de alternativas (mencionada anteriormente) y,
- ✓ Plan de implementación del reúso con análisis financiero (Metcalf & Eddy, 1991).



En Asano (1991), se encuentra una lista de actividades e inventarios que se deben realizar en la planificación del reúso de agua.

La existencia de mercado para el agua residual recuperada es esencial. Se debe hacer una lista de los clientes potenciales, así como de su capacidad de compra. El inventario también debe incluir las necesidades de los usuarios potenciales (20).

2) *Definición de la calidad del agua residual natural o del efluente tratado.*

Es necesario determinar las características de la calidad del agua de acuerdo a las exigencias de los patrones de uso predefinidos y de las contribuciones municipales e industriales en la cuenca de recolección de aguas residuales. En el caso de reúso de agua industrial es necesario hacer un inventario de todos los contaminantes posibles.

La definición de las características de calidad del agua no es una tarea fácil y puede conllevar a errores en las etapas posteriores. La elección de las variables depende de un análisis epidemiológico local y del examen de la situación real, debiéndose desconfiar de estudios simplificadores que sólo trabajan con DBO o NMP (número más probable) de coliformes fecales, a no ser que sea necesario para el estudio.

3) *Definición de las alternativas de sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales.*

Para definir el universo de alternativas se debe tomar en cuenta los criterios de confiabilidad y eficacia de cada alternativa a fin de descartar las no viables y para no desechar algunas inadecuadamente. Puede haber muchas alternativas debido a las diferentes combinaciones de procesos y operaciones unitarias y formas de distribución y uso del agua recuperada.

La ubicación y la modalidad de reúso deben considerarse como parte de cada alternativa, incluida la distribución de agua en los diversos puntos de consumo.



4) Definición de las variables de decisión para seleccionar la alternativa de recuperación de aguas residuales.

Las variables de decisión pueden incluir principios de la tecnología apropiada y del desarrollo sostenible, tales como:

- ✓ Maximización del uso de recursos materiales y mano de obra locales;
- ✓ Minimización del consumo de energía;
- ✓ Maximización de la calidad y cantidad del efluente final para el reúso;
- ✓ Minimización del impacto ambiental;
- ✓ Rentabilidad económica;
- ✓ Facilidad de operación y mantenimiento;
- ✓ Minimización del riesgo para la salud de los trabajadores y del público;
- ✓ Participación social; y
- ✓ Aceptación pública.

Se debe procurar que los objetivos sean lo más independientes posible para no volver a evaluar el mismo objetivo.

Se puede tener más de un criterio para medir cada objetivo y se puede emplear variables discretas o continuas, numéricas u ordinales. Las variables pueden ser cuantificables, tales como el costo, área ocupada, etc., o subjetivas, como preferencia por uno u otro aspecto de cada alternativa. Las variables se pueden comparar entre sí con valores de juicio, tales como bueno, medio, deficiente, mejor, peor, etc.

Para cada objetivo se puede utilizar criterios de eficacia, confiabilidad, resistencia, flexibilidad, etc.

5) Comparación de las alternativas de recuperación de aguas residuales con las variables de decisión.

En el análisis de decisión con múltiples objetivos, el método de selección de tecnología más recomendado actualmente, incluye la llamada matriz de resultados que compara las alternativas viables según el grado de consideración de todas las



variables de decisión de la etapa anterior. Esta matriz está compuesta por los criterios y actividades. La evaluación de las alternativas se puede realizar con un grupo ejecutivo de decisión o con un equipo de especialistas en reúso y se debe buscar la participación popular mediante un "consejo de usuarios del agua residual". El éxito de la metodología depende de cuán juiciosa resulte la evaluación de las alternativas. Se puede elaborar formularios basados en preguntas y atribución de importancia, de manera que los evaluadores no distingan la relación entre sus respuestas y el resultado final. Se han desarrollado métodos, tales como el Delphi, para obtener respuestas de manera científica. La definición de los objetivos y variables a considerarse en cada caso debe realizarla el mismo agente de decisión.

6) Elección de un método auxiliar para la decisión.

Para alcanzar un punto de satisfacción de los objetivos planteados en la elección de la tecnología, varios autores defienden el uso del análisis de decisión con objetivos múltiples. Los métodos más utilizados cuando se tiene una variable discreta, que es la más fácil de operar, son los de la serie Electre (versión I, II, III y IV-A), "Compromising Programming", el Promethee, el de la "Función de Utilidad Multidimensional" y el ME-MCDM ("Multiple Expert Multiple Criteria Multiple Decision Makers"). Hay programas de cómputo disponibles para ellos, lo cual facilita su uso en computadoras.

Algunos especialistas en el tratamiento y reúso de aguas residuales no están interesados en el análisis de decisiones y se resisten a usar la metodología propuesta porque les parece complicada. Sin embargo, existen métodos de análisis de decisión simples y de fácil comprensión. Otro punto que debe resaltarse es el uso de varios métodos (dos, tres o cuatro) para priorizar la solución del problema.

7) Jerarquización de las alternativas de recuperación de aguas residuales y aceptación del resultado.

Con cualquiera de los métodos auxiliares de decisión se produce una lista de alternativas de acuerdo al logro de los objetivos planteados. Como se dijo



anteriormente, es mejor usar más de un método auxiliar para comparar los resultados.

En algunos métodos es posible hacer un análisis de sensibilidad para conocer los factores de decisión que más contribuyen a la solución. El proceso permite adaptar los valores de una de las variables y verificar el efecto de tales variaciones en las respuestas del método. Con el análisis de sensibilidad también es posible conocer los motivos que llevan a la preferencia de una u otra alternativa.

8) *Repetición del proceso con modificaciones si no se ha llegado a una decisión.*

La lista ordenada de alternativas y la explicación del proceso de organización se discute con los agentes de decisión para conocer el grado de aceptación de la solución propuesta. Por lo general, se cuestiona el resultado pues sólo así se reconocen algunas fallas en una o algunas de las etapas anteriores, ya que muchas de éstas son interdependientes. En caso de no haber aceptación, se deben considerar todas las sugerencias y críticas en el proceso metodológico de las etapas anteriores pertinentes y reiniciar el ciclo. El proceso se reitera hasta alcanzar una decisión satisfactoria.

Es necesario entender que no hay una solución óptima para el problema y que se debe llegar a una "solución de compromiso" que no se puede definir fácilmente en términos numéricos. Se alcanza entonces el "óptimo de Pareto" o "punto de satisfacción", que es una solución posible (es decir, una alternativa viable) para la cual no existe alguna otra solución viable que ocasione una mejora en cualquiera de los objetivos propuestos sin agravar por lo menos uno de los demás objetivos.

2.2.6 *Otros modelos de selección de tecnología.*

Se considera que no hay una solución óptima para el problema y se debe llegar a una "solución compromiso" que no se puede definir fácilmente en términos numéricos. Se



alcanza entonces el “óptimo de pareto” o “punto de satisfacción”, que es una solución posible (es decir, una alternativa viable).

Las metodologías antes mencionadas no son las únicas que se aplican, se pueden citar muchas aplicaciones en otras áreas del medio ambiente y de recursos hídricos que cuentan con métodos matemáticos para la toma de decisiones. Por ejemplo, Perlac & Willis (1985) utilizaron métodos de análisis de decisión con objetivos múltiples para resolver un problema de manejo de residuos sólidos. Merkhofer & Keeney (1987) aplicaron el análisis de utilidad multi-atributo para definir el lugar de disposición de residuos nucleares. Briggs et-al. (1990) aplicaron los métodos Promethee y Gaia para el manejo de residuos nucleares. Hokkanen et-al. (1995), Caruso et al. (1993), Maystre & Simos (1987), y Simos (1990) aplicaron diversas técnicas de análisis de decisión con objetivos y criterios múltiples para la selección de alternativas de manejo de residuos sólidos. Duckstein et-al. (1994) emplearon técnicas de análisis de decisión con criterios múltiples Compromise Programming, FunçÆo Utilidade Multidimensional, Electre-III, y UTA (del francés Utilité Additive) para la selección de alternativas de manejo de aguas subterránea (20). Estos métodos constituyen una herramienta que ayuda a tomar decisiones cuando se tienen que considerar factores tangibles e intangibles y cuando se desea la participación comunal.

2.2.7 Métodos auxiliares para la toma de decisiones en la selección de tecnologías.

Estos métodos constituyen una herramienta que ayuda a tomar decisiones cuando se tienen que considerar factores tangibles e intangibles y cuando se desea la participación interdisciplinaria.

Para llevar a cabo una toma de decisiones empleando un método de decisión de múltiples criterios (MDMC), se utilizan métodos para analizar un problema multiobjetivos para el manejo de agua residual con el fin de seleccionar una tecnología de tratamiento.



Por ejemplo, Teclee et-al, 1988 ., planteó un caso de estudio compuesto por 15 alternativas de sistemas de tratamiento se evaluaron con respecto a 12 criterios o variables discretas, utilizando tres métodos diferentes de MDMC;

- 1) Compromise Programming (CP),
- 2) Por la teoría de juegos cooperativos (CGT), y
- 3) ELECTRE I.

El caso de estudio fue el proyecto para el tratamiento de aguas residuales en Nogales, que trata las aguas residuales procedentes de las ciudades gemelas de Nogales, Arizona y Nogales, Sonora, México. La solución a esta problemática se planteó en el contexto de un análisis multicriterios en términos de objetivos, especificaciones, escalas para los criterios, y la construcción de una matriz de evaluación que consiste en las alternativas considerando los criterios dentro de ésta.

La selección de la alternativa más satisfactoria se hizo mediante el análisis de la matriz utilizando los métodos auxiliares multicriterios MDMC, en el caso de la Programación Competitiva y la Teoría de juegos cooperativos y la selección se redujo a las alternativas dominantes y con el método ELECTRE I dos tecnologías fueron las dominantes.

En la actualidad se utilizan los métodos auxiliares de análisis de decisión con objetivos múltiples para la toma de decisiones, ya que facilitan la selección de una tecnología. Sin embargo, estos métodos sólo le otorgan un valor numérico a los criterios y variables que el especialista considera significativos, por esta razón es esencial definir aquellos criterios tecnológicos, ambientales y económicos que influyen en la selección de la mejor alternativa tecnológica (Tecle, 1988).

Los métodos auxiliares de decisión con objetivos múltiples para la selección de tecnología, más utilizados son los mostrados en la Tabla 24.



Tabla 24. Métodos de análisis de decisión con objetivos múltiples para la selección de tecnología.

Método Auxiliar	Descripción
Método de ponderación aditiva.	Se basa en la utilidad, una relación entre el valor de una variable de decisión y su valor atribuido en la decisión y, fundamentalmente, en la media ponderada de los valores de todos los criterios, en los que los pesos atribuyen importancia a cada uno de ellos. La alternativa elegida es la que obtiene el valor más alto de utilidad aditiva (es decir, la media ponderada). Este método es muy criticado, pero es el más sencillo y permite que los inexpertos entiendan la justificación de la decisión.
Método Electre I (traducido del Francés como Eliminación de Elección).	Compara alternativas por pares, entre todas las alternativas, de manera que elimina un subconjunto de alternativas y elige las que reúnen la mayoría de los criterios. Implica tres conceptos definidos matemáticamente: concordancia, discordancia y valores límite de concordancia y discordancia. El método no se elaboró para organizar las alternativas pero Souza (1992) propone una manera simple y eficaz de jerarquizar las alternativas.
Método Electre II.	Es una modificación del método Electre I, y fue elaborado para orientar las alternativas. Crea relaciones de comparación entre la mayor calificada y la de menor calificación, condiciones de concordancia y discordancia diferentes. En la primera etapa se ordena de forma descendente (de la mejor alternativa a la peor), en la segunda etapa de forma ascendente y en la tercera etapa según la media aritmética de las anteriores.



Método Auxiliar	Descripción
Método Electre III.	Se basa en relaciones de comparación difusas, crea el concepto de pseudocriterio para medir las preferencias del agente de la decisión, permite trabajar con relaciones de indiferencia “no muy estricta” o estricta y combina los límites de indiferencia y preferencia con el criterio tradicional. Añade estas preferencias parciales y forma una relación de comparación difusa que establece dos ordenaciones preliminares de las alternativas (ascendente y descendente). El método realiza la ordenación final a partir de esas dos ordenaciones preliminares. Este método es el más aceptable cuando hay duda e imprecisión en la evaluación de las alternativas y permite compararlas. No usa comparaciones proporcionadas directamente por el agente de la decisión, sino que las construye internamente a partir de las preferencias. También realiza una compensación parcial de la comparación a partir de la elección de los índices de concordancia y de discordancia, además de permitir que el agente de la decisión exprese sus preferencias, indiferencia y oposición al elegir los pesos que miden el grado de importancia de los diversos criterios utilizados.
Método “Comprising Programing”.	Es un método elaborado para identificar la solución más próxima a la ideal, formada por un vector de los mejores valores registrados para todos los criterios. El grado de proximidad a la calificación ideal se mide según un patrón de distancias que considera otro vector formado por los peores valores de los diversos criterios registrados en la matriz de resultados. Es un método de aplicación fácil y rápida.

Se cita a Duckstein et al. (1994) *"el propósito de aplicar los métodos de análisis de decisión con objetivos y criterios múltiples es ayudar al agente de la decisión y no el de reemplazarlo"*.



CAPÍTULO 3. DISEÑO DE LA METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES.

La necesidad del tratamiento de aguas residuales municipales depende no sólo del destino del agua residual, sino de la disponibilidad de recursos hídricos de la región, ya que el agua es un recurso indispensable para la producción de alimentos, para cubrir las necesidades de agua de las poblaciones humanas, la higiene personal, la producción industrial y pesquera. La disponibilidad de agua de buena calidad es un factor crítico para el desarrollo de las naciones y es considerado como el recurso que marca los límites del desarrollo sostenible (21).

En este capítulo se desarrolla una metodología fundamentada en:

1. El análisis de aplicación de las principales tecnologías de tratamiento de aguas residuales, y
2. En la revisión de metodologías y métodos para la selección de tecnologías;

De acuerdo a la revisión de metodologías se definió tomar como referencia para la metodología desarrollada en el presente trabajo, un mecanismo de selección en el cual se determinen primeramente los criterios para la selección de tecnologías de tratamiento de aguas residuales, y se eligió un método de calificación basado en un promedio ponderado tomando en cuenta los indicadores asociados a aspectos técnicos, ambientales y económicos, lo cual hace de la calificación un mecanismo simple y permite la comparación entre los criterios calificados para la selección de tecnologías.

Se debe hacer énfasis en que al seleccionar un sistema de tratamiento de agua residual, la cantidad de tecnologías disponibles y sus posibles combinaciones, pareciera que son ilimitadas. Sin embargo, cada problema de contaminación de un lugar tiene una solución específica y óptima.



3.1 Elaboración de la metodología propuesta para la selección de tecnología de tratamiento de aguas residuales municipales.

El objetivo principal de la metodología a continuación desarrolla es eficientar, facilitar y estructurar el proceso de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales con el fin de disminuir la contaminación que representa la descarga de aguas residuales en cuerpos receptores y proveer agua con la calidad adecuada para su reúso.

En la metodología propuesta como primer paso se identifican los objetivos que generalmente se definen en el momento de proponer la construcción de una planta de tratamiento de agua y que están relacionados con las características de las tecnologías seleccionadas. Como segundo paso se deben identificar y definir los criterios técnicos, ambientales y económicos que se emplean en el proceso de selección de las alternativas tecnológicas y en la elección de la mejor tecnología para aplicarse en un determinado municipio.

En un proceso de selección se debe tener claro cuáles son los objetivos de la implementación de un sistema de tratamiento de agua residual, como ya se analizó en el primer capítulo del presente trabajo, el desarrollo local depende en gran medida del manejo eficiente del agua y de sus recursos hídricos.

Generalmente se considera que los principales objetivos del sistema de tratamiento de aguas residuales son:

- Proteger los cuerpos de agua evitando las descargas de aguas contaminadas cumpliendo con la normatividad vigente¹.
- Obtener una calidad de agua adecuada para su reutilización².

¹ Cumplimiento de la NOM-001-SEMARNAT-1996.

² Cumplimiento de la NOM-003-SEMARNAT-1997.



- Contribuir al desarrollo del municipio y generar oportunidades económicas para la población.

En el caso específico de la reutilización del agua tratada los objetivos particulares que se consideran generalmente son los siguientes:

- Definir cuál es la calidad que debe tener de acuerdo a la normatividad aplicable (referirse a la NOM-003-SEMARNAT-1997).
- Describir las necesidades de tratamiento y tipo disposición de aguas residuales.
- Definir si el suministro es suficiente para cubrir la demanda de agua de acuerdo a su reutilización.
- Definición de los beneficios del abastecimiento de agua mediante el reúso.

3.1.1 Identificación y definición de los criterios de decisión para seleccionar la mejor alternativa de tratamiento de aguas residuales.

Los criterios de selección de una tecnología para el tratamiento de aguas residuales deben estar enfocados de manera general en lo siguiente:

- Eficiencia promedio o típica y el funcionamiento de la tecnología:** Este es el criterio de mayor importancia que se considera en los estudios de comparación de tecnologías. También se debe considerar la posibilidad de que la tecnología sea capaz de remover otros contaminantes además de aquellos para los que fue diseñada. Así mismo debe considerarse el destino final de los contaminantes removidos como factor clave, en especial con las opciones de disposición de lodos que contienen altas concentraciones de micro-contaminantes.
- Rentabilidad de la tecnología:** El proceso preferentemente debe ser capaz de soportar cambios en la carga orgánicas a tratar, es decir, el sistema debe seguir operando bajo condiciones inusuales y producir un efluente con la calidad requerida. De manera que el sistema debe considerar tanto las condiciones normales como las variaciones en las características del influente. Durante la



fase de diseño es importante considerar que una vez presentada una contingencia, el proceso debe ser fácil de corregir y reiniciar.

- c) **Sustentabilidad financiera:** A menores costos de financiamiento, será más atractiva la tecnología. Sin embargo una opción con costo bajo no necesariamente es financieramente sustentable ya que esto se encuentra determinado por la disponibilidad de fondos que aporte el emisor.
- d) **Opciones de reutilización:** De esta manera se contribuye a la recuperación de recursos y del ambiente; es también una opción para la sustentabilidad financiera. Se puede incluir en el riego agrícola, piscicultura, acuicultura, en la industria como agua de enfriamiento, en aplicaciones que no requieran una alta calidad del agua como en la descarga de los sanitarios, etc. Los lodos únicamente pueden ser usados como fertilizantes o para remediación si la concentración de los micro-contaminantes lo permite y no significa un riesgo a la salud.
- e) **Normatividad:** cumplimiento de la normatividad referente a la calidad del agua del cuerpo receptor y el cumplimiento de los parámetros para su reutilización.

3.1.1.1 Criterios técnicos.

Para facilitar el proceso de selección una tecnología se adoptó una clasificación de criterios y subcriterios como se observa en la Tabla 25

Tabla 25. Clasificación de los criterios y subcriterios técnicos.

<i>Criterios técnicos</i>	<i>Subcriterios técnicos</i>
1. Especificaciones técnicas del proceso.	<ul style="list-style-type: none">a) Eficiencia de remoción de contaminantes.b) Intervalo de flujo en el cual el sistema es aplicable.c) Espacio requerido para su instalación y futuras ampliaciones.d) Especificaciones de los insumos necesarios para que la tecnología opere eficientemente (cantidad, tipo, etc.).e) Generación de residuos (características físicas, químicas y microbiológicas).f) Especificaciones de servicios auxiliares (tipo, consumo y disponibilidad).



<i>CrITERIOS TÉCNICOS</i>	<i>SUBCRITERIOS TÉCNICOS</i>
2. Características relevantes del proceso.	a) Condiciones de operación (temperatura, humedad, etc.). b) Tratamientos previos y posteriores. c) Aceptación por parte de la comunidad.
3. Características específicas de la tecnología.	a) Vida útil. b) Disponibilidad de la tecnología (nacional o extranjera). c) Capacidad de ampliación de la tecnología. d) Riesgos implícitos en la tecnología y sistemas de seguridad. e) Compatibilidad con los sistemas de abastecimiento de agua y alcantarillado. f) Consumo anual de energía. g) Grado de complejidad de la tecnología respecto a la población.
4. Flexibilidad del proceso.	a) Tolerancia a las variaciones de flujo. b) Flexibilidad del proceso en cuanto a las variaciones en el suministro de insumos y activos. c) Flexibilidad en cuanto a capacidad de operación en condiciones críticas. d) Flexibilidad en cuanto a número de equipos de relevo necesarios. e) Requerimientos de automatización de la tecnología.
5. Disponibilidad de recursos materiales y equipos necesarios.	a) Disponibilidad local o nacional de equipos. b) Disponibilidad local o nacional de materiales de construcción. c) Insumos y activos locales o nacionales disponibles.

Estos criterios consideran las características de la tecnología desde el punto de vista de proceso. Las características técnicas de las diferentes tecnologías influyen directamente en el costo de inversión y mantenimiento de una planta de tratamiento de aguas residuales. Los siguientes criterios han sido adoptados para seleccionar las tecnologías para el tratamiento de agua:

1. Especificaciones técnicas del proceso.

a) **Eficiencia de remoción de contaminantes.** Debido a su simplicidad de análisis e importancia algunas características del agua cruda han sido escogidas como parámetros de este criterio (Tabla 9) para las selección de los procesos involucrados en las diferentes etapas del sistema de tratamiento, ya que se deben comparar las características iniciales con la calidad deseada en el efluente, en conclusión se debe elegir una tecnología cuya eficiencia de remoción sea la indicada para obtener la calidad requerida en el efluente final.



b) Intervalo de flujo en el cual el sistema es aplicable. En este punto se debe considerar cuál es el volumen del efluente y la carga orgánica de operación de la tecnología.

c) Espacio requerido para su instalación y futuras ampliaciones. Se debe evaluar la **densidad de población**. La principal variable para decidir que tecnologías se pueden aplicar en un municipio, es la densidad de población, personas por hectárea en el caso de zonas rurales y urbanas. La densidad de población determina la **disponibilidad de terreno para el tratamiento**.

Por otra parte el área requerida para la construcción de una planta de tratamiento puede ser decisiva para la implementación de una tecnología con respecto a otras, ya que la poca disponibilidad de terreno o el alto costo del mismo pueden influir fuertemente en la factibilidad de algunas alternativas tecnológicas, tales como los sistemas naturales (lagunas y humedales artificiales). En sentido inverso un terreno barato, arcilloso y disponible favorecerá este tipo de procesos.

d) Especificaciones de los insumos necesarios para que la tecnología opere eficientemente. Se debe especificar la cantidad y el tipo de insumos que se requieran para que se lleve a cabo el proceso.

e) Generación de residuos. Los tipos y cantidades de residuos sólidos, líquidos o gaseosos generados por un proceso deben ser conocidos o estimados. Algunos aspectos que deben considerarse en el procesamiento de los residuos son el sitio de disposición final y el costo del tratamiento y disposición de los mismos. La selección del sistema de tratamiento y disposición de los residuos debe hacerse a la par del sistema de tratamiento de aguas residuales.

f) Especificaciones de servicios auxiliares que se requieren para su operación. Se debe especificar el tipo de servicio auxiliar (agua, vapor, aire,



energía eléctrica, etc.) que se requiere, la cantidad consumida y su disponibilidad.

2. Características relevantes del proceso.

a) Condiciones de operación. Se requiere conocer las condiciones límite de temperatura y humedad bajo las cuales la tecnología opera eficientemente.

b) Tratamientos previos o posteriores. En todos los casos de un sistema de tratamiento se requiere de un tratamiento previo. Sin embargo, la etapa de pre-tratamiento está conformada por varias unidades de proceso (cribado, rejillas, desarenador, sedimentador primario, etc.; ver capítulo 2 “Pretratamientos) y puede ser una combinación o emplear solo una unidad esto depende de la calidad del agua residual cruda. La selección de tratamientos posteriores dependen de la calidad deseada en el efluente tratado, generalmente se emplea una unidad de desinfección con cloro para el caso de aguas residuales municipales.

c) Aceptación por parte de la comunidad. En algunos casos puede ser el factor decisivo para que se realice o no la construcción de una planta de tratamiento. Este tipo de obras que dan servicio a la comunidad deben ser aceptadas por la población involucrada.

3. Características específicas de la tecnología.

a) Vida útil. Se refiere a cuánto tiempo durará operando la planta de tratamiento de aguas. Para una obra como una planta de tratamiento de aguas residuales generalmente hay dos partes en la divisiones en la vida útil de ésta, la primera se refiere a la vida útil de la infraestructura (obra civil, eléctrica, tuberías, sistemas de control) y la de los equipos rotatorios expuestos a un mayor desgaste por lo que tienen una vida útil menor. En este caso la limitante son los equipos rotatorios por la razón antes mencionada.



- b) Disponibilidad de la tecnología.** Se refiere a la disposición de la tecnología en el país o en el extranjero (nacional ó extranjera, número de tecnólogos, alternativas existentes, antigüedad del desarrollo tecnológico y de las patentes, etc.).
- c) Capacidad de ampliación de la tecnología.** Se refiere a las modificaciones en la estructura que puede tener una tecnología para aumentar su capacidad de operación.
- d) Riesgos implícitos en la tecnología y sistemas de seguridad.** Este subcriterio se refiere a los riesgos durante la operación, si la tecnología requiere de sistemas de seguridad y qué tan complejos podrían ser.
- e) Compatibilidad con los sistemas existentes de abastecimiento de agua y alcantarillado.** La tecnología debe tener un grado de confiabilidad compatible con: los otros componentes del sistema de abastecimiento de agua y con la infraestructura ya existente para el agua residual.
- f) Consumo anual de energía.** La elección entre tecnologías aerobias y anaerobias tiene que considerar principalmente el hecho de proveer oxígeno necesario en las tecnologías aerobias. La adición de grandes cantidades de oxígeno mediante aeración superficial o por un sistema de dispersión por burbuja incrementa sustancialmente el consumo anual de energía y puede llegar a ser considerablemente alto (puede alcanzar los 30 KW/h por equivalente habitante).
- g) Grado de complejidad de la tecnología respecto a la población.** Éste está relacionado con la capacidad de las instituciones y personas requeridas para construir, mantener y operar una planta con la eficiencia de las especificaciones originales de diseño.



4. Flexibilidad del proceso en cuanto a: Variaciones en el suministro de insumos y activos; capacidad de operación en condiciones críticas; número de equipos de relevo necesarios; que tan automatizada es la tecnología.

a) Tolerancia a las variaciones de flujo. En general los procesos trabajan eficientemente con un flujo constante. Sin embargo, se debe tener en cuenta las variaciones en el flujo de entrada que pueden ser toleradas por el sistema. Es por esta razón que en algunos casos al ser las variaciones de flujo muy grandes se usa un tanque de igualación para mantener un flujo constante a la entrada del sistema.

5. Recursos materiales y equipos necesarios. Se evaluará el nivel tecnológico que maximice el uso de materiales y equipos producidos o disponibles localmente (es posible obtener diseños con alta eficiencia a bajo costo usando casi exclusivamente materiales locales).

a) Insumos y activos localmente disponibles. *La selección entre tecnologías mecanizadas y no mecanizadas se centra en la infraestructura tecnológica local o nacional disponible, lo cual puede asegurar la disposición regular de trabajo especializado, así como el aseguramiento de suministros (por ejemplo, energía, sustancias químicas y partes de repuesto) otras consideraciones adicionales son los requerimientos de terreno.*

3.1.1.2 Criterios ambientales.

1. Impacto ambiental debido a los lodos residuales generados. Definir si éstos son considerados residuos peligrosos.

2. Producción de ruido. El equipo ruidoso en plantas de tratamiento es una limitante para su aceptación, en zonas donde existan viviendas aledañas a la planta de tratamiento.



3. **Emisiones de compuestos peligrosos al medio ambiente.** En el caso de los procesos en los que se genera gas metano se debe cuidar que éste no se escape a la atmósfera.
4. **Generación de malos olores.** La dirección de los vientos dominantes puede restringir el uso de algunos procesos, especialmente los que generan olores, este aspecto debe considerarse con mayor atención cuando existan asentamientos humanos cercanos a la planta de tratamiento. En ocasiones deberá considerarse la incorporación en las especificaciones de equipo el control de malos olores.
5. **Generación de fauna nociva.** Considerar las condiciones que presenta la tecnología para propiciar la reproducción de fauna nociva, como las ratas, cucarachas, mosquitos, moscas, etc.

3.1.1.3 Criterios económicos.

Estos criterios tienen un enfoque desde la perspectiva de recuperación de la inversión inicial y las utilidades y beneficios asociados a la implementación de la tecnología implementada.

Tabla 26. Clasificación de los criterios y subcriterios económicos para la selección de una tecnología.

<i>Criterios económicos</i>	<i>Subcriterios económicos</i>
1. Costo de la solución tecnológica.	a) Costo de la tecnología que se implementará b) Costo del terreno. c) Costo de la instalación, los materiales y equipos de construcción. d) Costo de la mano de obra para la construcción.
2. Costo de operación y mantenimiento.	a) Costo de los insumos b) Costo anual de energía consumida c) Costo de los equipos adicionales para el funcionamiento de la tecnología. d) Costo de mantenimiento e) Costo de mano de obra y personal administrativo
3. Generación de productos y subproductos con un valor agregado.	a) Costos agregados por la venta de agua. b) Costos agregados por generación de metano. c) Costos agregados por la venta de biosólidos.
4. Costos por el tratamiento de subproductos.	a) Costos asociados al tratamiento de lodos residuales.



1. Costo de la solución tecnológica. Se incluyen los siguientes costos:

- a) *Costo de la tecnología que se implementará*
- b) *Costos del terreno requerido.*
- c) *Costos de instalación materiales y equipo de construcción.*
- d) *Costos de la mano de obra para la construcción.*

Además de considerar los costos de tecnología importada, beneficios directos e indirectos resultantes del uso de una tecnología en particular, el valor del uso de periodos cortos de construcción y procesos de construcción.

2. Costo de operación y mantenimiento.

- a) **Costos de los insumos.** En los procesos de tratamiento de agua, el consumo de reactivos constituye un gasto constante ya que se requiere durante todo el periodo de vida útil de la planta, su estimación es complicada debido a que el costo de los reactivos químicos varía en función de la demanda en el mercado.
- b) **Costo anual de la energía consumida.** Los procesos de bajo consumo energético deberán ser favorecidos en la elección. Se debe tomar en cuenta la potencia total instalada en la planta, así como la potencia requerida para su operación.
- c) **Costo de los equipos adicionales para el funcionamiento de la tecnología.** Los procesos con numerosos equipos en operación y con alto grado de instrumentación y automatización generarán una mayor necesidad de mantenimiento del sistema y por tanto serán los más costosos en su operación.
- d) **Costo de mantenimiento.** Para que una PTAR opere adecuadamente durante todo el periodo de vida útil, se requiere tomar en cuenta los aspectos asociados al mantenimiento, los cuales implican remplazo de equipos, limpieza de los mismos y de las instalaciones, costos de almacenamiento de piezas de repuesto, entre otros.



- e) **Costos de la mano de obra y personal administrativo.** Deben tomarse en cuenta los aspectos de carácter administrativo, pues éstos se relacionan directamente con la necesidad de recursos económicos y de organización para operar las plantas de tratamiento. Un sistema de operación compleja requerirá de un nivel de organización mayor, así como requerimientos superiores de personal calificado y por lo tanto un costo mayor asociado a la mano de obra para la operación de la planta.

3. Generación de subproductos con valor agregado.

Estos costos no implican un gasto, por tanto, deberán considerarse como beneficios monetarios cuando se determine la rentabilidad financiera de una PTAR.

- a) Costos agregados si es que el agua es vendida.
- b) Costos agregados por generación de metano.
- c) Costos agregados por la venta de biosólidos.

Analizar el mercado para el agua tratada. Se recomienda una hacer una lista de clientes potenciales, así como su capacidad de compra, también se debe incluir las necesidades de los usuarios potenciales, ya que la existencia de mercado para el agua residual tratada es esencial, en el caso de que el agua tratada sea empleada para riego de áreas verdes o para riego de cultivos.

3.1.2 Descripción de la metodología y mecanismo de calificación.

Definido lo anteriormente mencionado se propone un mecanismo de calificación para evaluar las tecnologías de tratamiento de aguas residuales municipales, en el presente trabajo el proceso de evaluación se lleva a cabo en tres etapas, como se describe a continuación:



Primera Etapa.

Esta primera etapa está enfocada a la selección de alternativas con base en el análisis de las características del municipio y de las tecnologías disponibles, considerando algunos de los criterios técnicos, ambientales y económicos que influyen en la decisión, evaluando con un mismo método y asignado valores comparables entre sí a las variables características tanto del lugar como de las alternativas tecnológicas.

Estas características influyen directamente en la decisión de implementar una tecnología con respecto a otra, y por tanto el valor de importancia que se les otorga depende de las particularidades propias del lugar.

En general, se considera que la solución al problema de tratamiento de aguas residuales más adecuada es aquella que funciona con una mayor eficiencia técnica de la forma más simple y que es menos costosa.

La eficiencia en el funcionamiento de la tecnología depende directamente de los recursos humanos y materiales disponibles en la localidad y en el país. Sin embargo, para una primera elección de tecnologías es importante definir el grado de importancia de las variables de decisión propias del lugar donde se pretende llevar a cabo la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales.

Es recomendable que los objetivos sean los más independientes uno del otro para no evaluar dos veces el mismo objetivo.

Se puede tener más de un criterio para evaluar cada objetivo y se pueden emplear variables discretas o continuas, numéricas u ordinales. Algunas de las variables de decisión son cuantificables, por ejemplo: el costo de la tecnología, el área ocupada, entre otras, o subjetivas. Las variables se pueden comparar entre sí con valores de juicio, por ejemplo: bueno, medio, deficiente, mejor, peor, como ejemplos. Para cada objetivo se pueden utilizar criterios de eficacia, confiabilidad, resistencia, flexibilidad, por mencionar algunos.



Dentro de los criterios que se evalúan, se identifican aquellos que tengan una mayor importancia en la decisión para la selección de las alternativas tecnológicas de acuerdo a los objetivos, éstos pueden estar enfocados en la rentabilidad del proyecto donde se evaluarían en conjunto los aspectos económico-financieros, así como el cumplimiento de la normatividad ambiental, legal.

Las variables características del municipio y de las tecnologías que tienen una función de filtro para una primera selección de alternativas son:

- a) Número de habitantes del municipio, el cual está directamente relacionado con el caudal generado de aguas residuales y con la capacidad económica del municipio.
- b) Cumplimiento con la normatividad ambiental vigente en materia de tratamiento de agua, este criterio está referido al grado de remoción de los principales contaminantes para cumplir con la norma que se requiera.

Tabla 27. Variables filtro para la elección de alternativas tecnológicas.

Variable filtro	Decisión	Normatividad de referencia a cumplir
Remoción de DBO ₅	¿Cumple con la remoción? SI/NO	NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997
Remoción de sólidos suspendidos totales	¿Cumple con la remoción? SI/NO	
Remoción de sólidos sedimentables	¿Cumple con la remoción? SI/NO	
Nitrógeno total	¿Cumple con la remoción? SI/NO	
Fósforo total	¿Cumple con la remoción? SI/NO	
Número de habitantes	¿Tiene capacidad de tratamiento de acuerdo al número de habitantes del municipio? SI o NO	----
Capacidad económica del municipio	SI o NO	----



Los resultados serán comparados y las alternativas que cumplan con lo anteriormente establecido se elegirán para evaluarse en la siguiente etapa.

Para facilitar el proceso de selección de alternativas se presenta una matriz de selección de alternativas tecnológicas para el tratamiento de aguas residuales considerando las variables filtro, esta es el resultado de la integración de la información que se presenta en el capítulo dos (Tabla 28).

Las variables como el requerimiento de energía, de equipos y el requerimiento de área para la construcción de una planta de tratamiento son en la mayoría de los casos factores decisivos en la elección de sistemas de tratamiento por tal motivo se consideraron en el desarrollo de esta matriz, la escala de calificación es cualitativa se utilizan los adjetivos calificativos ALTA, MODERADA y BAJA, el proceso de referencia que se tomo como base de comparación fue lodos activados convencionales.



Tabla 28. Selección de alternativas tecnológicas de acuerdo al cumplimiento de la normatividad vigente, al número de habitantes y a la capacidad económica para municipios de México.

Capacidad de adaptación a tecnologías complejas	Zona (habitantes)	Capacidad económica de los usuarios	Pretratamiento y tratamiento primario recomendados	Tratamiento secundario recomendado	Tratamiento terciario necesario	Requerimiento de área para su construcción	Requerimiento de energía y equipos	Calidad del efluente	Normatividad que cumple de acuerdo a la calidad del efluente
Baja	Municipios rurales <2,500	Baja	Rejillas y desarenadores (en algunos casos se incluye sedimentación primaria)	Zanjas de oxidación	Sedimentación secundaria filtros terciarios desinfección	Moderada/ Alta	Moderada	Alta	Nom-003-SEMARNAT-1997 *
			Rejillas, desarenador y sedimentación primaria	Filtros percoladores	Sedimentación y desinfección	Moderada/ Alta	Baja	Moderada/ Alta	Son adecuadas para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 (tienen una alta calidad para riego directo o descarga a los cuerpos receptores).
			Rejillas, desarenador y sedimentación primaria	Humedales	Sedimentación y desinfección	Moderada/ Alta	Baja	Moderada	Son adecuadas para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 (tienen una alta calidad para riego directo o descarga a los cuerpos receptores).



Capacidad de adaptación a tecnologías complejas	Zona (habitantes)	Capacidad económica de los usuarios	Pretratamiento y tratamiento primario recomendados	Tratamiento secundario recomendado	Tratamiento terciario necesario	Requerimiento de área para su construcción	Requerimiento de energía y equipos	Calidad del efluente	Normatividad que cumple de acuerdo a la calidad del efluente
Media	Urbanos 2,500 a 49,999	Media	Rejillas y desarenadores (en algunos casos se incluye sedimentación primaria)	Zanjas de oxidación lodos activados convencionales lodos activados aireación extendida	Sedimentación (con/sin coagulación-floculación) desinfección <i>Se requiere filtración y desinfección (en el caso de usos con contacto al público)</i>	Moderada/Alta	Moderada/Alta	Alta	NOM-001-SEMARNAT-1996. NOM-003-SEMARNAT-1997.
			Rejillas, desarenador y sedimentación primaria	Lagunas de estabilización	Sedimentación y desinfección	Alta	Baja	Moderada	Son adecuadas para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 (tienen una alta calidad para riego directo o descarga a los cuerpos receptores)
			Rejillas, desarenador y sedimentación primaria	Humedales	Sedimentación	Alta	Baja	Moderada	Son adecuadas para cumplir con la NOM-001-SEMARNAT-1996 (tienen una alta calidad para riego directo o descarga a los cuerpos receptores).



Capacidad de adaptación a tecnologías complejas	Zona (habitantes)	Capacidad económica de los usuarios	Pretratamiento y tratamiento primario recomendados	Tratamiento secundario recomendado	Tratamiento terciario necesario	Requerimiento de área para su construcción	Requerimiento de energía y equipos	Calidad del efluente	Normatividad que cumple de acuerdo a la calidad del efluente
Alta	Municipios no conurbados 50,000 a 499,999	Media/Alta	Sedimentación primaria	Lodos activados convencionales Lodos activados aireación extendida	Sedimentación (con/sin coagulación-floculación) desinfección <i>Se requiere filtración y desinfección (en el caso de usos con contacto al público)</i>	Moderada/Alta	Alta	Alta	NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997
			Rejillas y desarenado	Reactores biológicos en secuencia (no requieren un sedimentador secundario)	Filtración y desinfección (en algunos casos se requiere un tanque de homogenización antes de otros tratamientos terciarios)	Baja	Moderada	Alta	NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997
			Rejillas, desarenado y tratamiento primario avanzado	----- -	Desinfección	Baja	Baja	Moderada**	NOM-001-SEMARNAT-1996
			Rejillas, desarenadores sedimentación primaria	Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)	Postratamiento aerobio: -Lagunas de estabilización -Humedales artificiales -Lodos activados -Filtro percolador	Moderada/Alta	Moderada	Baja (sin tratamientos posteriores) alta (con tratamientos posteriores)	NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997



Capacidad de adaptación a tecnologías complejas	Zona (habitantes)	Capacidad económica de los usuarios	Pretratamiento y tratamiento primario recomendados	Tratamiento secundario recomendado	Tratamiento terciario necesario	Requerimiento de área para su construcción	Requerimiento de energía y equipos	Calidad del efluente	Normatividad que cumple de acuerdo a la calidad del efluente
Alta	Metropolitanos (Zonas Metropolitanas) >500,000	Alta	Rejillas, desarenador y sedimentación primaria	Lodos activados convencionales Lodos activados aireación extendida	Sedimentación (con/sin coagulación-floculación) desinfección se requiere filtración y desinfección (en el caso de usos con contacto al público)	Moderada/Alta	Moderada/Alta	Alta	NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997
			Rejillas y desarenado	Reactores biológicos en secuencia, SBR (no requieren un sedimentador secundario)	Filtración y desinfección (en algunos casos se requiere un tanque de homogenización antes de otros tratamientos terciarios)	Baja	Moderada	Alta	NOM-001-SEMARNAT-1997 NOM-003-SEMARNAT-1997
			Rejillas, desarenado y tratamiento primario avanzado	----- ---	Desinfección	Baja	Baja	Adecuada para cumplir con la nom-001-semarnat-1997	NOM-001-SEMARNAT-1996
			Rejillas, desarenadores sedimentación primaria	Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)	Se recomienda que después de un UASB se utilice un pos tratamiento aerobio: -Lodos activados -Humedales artificiales	Baja/Moderada	Moderada	Baja (sin tratamientos posteriores) Alta (con tratamientos posteriores)	NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997

FUENTE: Elaboración propia a partir de la información en el capítulo dos del presente trabajo.



NOTAS:

- En el caso de los reactores SBR se debe tener en cuenta que son utilizados típicamente para caudales iguales o menores a 5 millones de galones por día (219 litros por segundo). Sin embargo, debido a su principio de funcionamiento el área y la energía que se requieren son muy reducidos en comparación con el tratamiento por lodos activados convencionales (13).
- En el caso del tratamiento primario avanzado se requiere una desinfección ya que sólo cumple con algunos parámetros de la NOM-001-SEMARNAT-1996; se debe considerar que los lodos generados por este tratamiento requieren de un tratamiento especial debido a sus características químicas.
- Conviene aclarar que la tecnología de lodos activados se puede aplicar para cualquier municipio y número de habitantes. Sin embargo se ha observado que es más eficiente para tratar caudales superiores a otras tecnologías de tratamiento secundario y puede ser fácilmente adaptable a las condiciones del municipio en cuestión.

* CUMPLE CON LA NOM-001-SEMARNAT-1996 Y CON LA NOM-003-SEMARNAT-1997

** SÓLO CUMPLE CON LA REMOCIÓN DE ALGUNOS CONTAMINANTES POR TAL MOTIVO REQUIERE DE UNA DESINFECCIÓN POSTERIOR.



Segunda Etapa.

Ya seleccionadas las alternativas de acuerdo a las características del municipio, se definirá el conjunto de criterios y subcriterios que serán considerados dentro de la evaluación de las alternativas.

En el presente trabajo se utilizará el análisis de decisión multi-criterios de suma ponderada por ser de aplicación simple, ya que es el método más sencillo para la selección de tecnologías que le otorga un valor numérico a todas las variables involucradas en el proceso, se debe incluir una matriz de resultados.

a) Establecer la escala de calificación para los criterios y subcriterios.

En este apartado se designa una calificación máxima y una mínima para evaluar los criterios y subcriterios (variables).

Tabla 29. Escala de calificación de los criterios y subcriterios.

Atributo	Calificación (Ci)
Atributo no disponible (no aplica)	0
Calificación mínima (suficiente en este atributo)	1
Calificación media (atributo promedio adecuado)	2
Calificación máxima (excelente en este atributo)	3

FUENTE: Elaboración propia

Con el objetivo de asegurar que la evaluación de las alternativas sea más certera se asignará a continuación una ponderación, es decir, un porcentaje de importancia a los criterios de acuerdo a las características del municipio.

b) Establecer una ponderación de los criterios de selección.

La suma ponderada es el método auxiliar multi-criterios para la toma de decisiones empleado en el presente trabajo, este método propone la asignación de pesos o puntajes a los distintos criterios, ya que la adjudicación de estas ponderaciones tiene una influencia importante en la obtención del resultado final, por eso es recomendable establecer con exactitud dichas ponderaciones o bien



establecer intervalos de estabilidad, será de vital importancia, ya que permite conocer los valores entre los cuales puede variar un peso, permaneciendo constantes los demás, de modo que la ordenación final de títulos no se altere (Brans, 1999).

A partir de lo anterior se tomaran en cuenta las tablas y los indicadores que se presentan en el Capítulo dos del presente trabajo en donde se construyeron tablas que contenga indicadores cuya función es darle un valor a cada criterio justificado con base en aspectos técnicos, ambientales y económicos inherentes a las tecnologías de tratamiento de agua

La asignación de los puntajes para cada variable tiene una importancia relativa de acuerdo a las condiciones del municipio, por la razón anterior se establece una ponderación en un intervalo entre 0-1 unidades o en porcentaje 0-100, se lleva a cabo de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\sum_{j=1}^k P_j = 100$$

Donde:

P_j es el peso o puntaje asignado a cada variable

Por ejemplo (Tabla 30):

Tabla 30. Ejemplo de asignación de ponderaciones para los criterios de selección.

Criterios	Ponderación (%)
Criterios técnicos	35
Criterios ambientales	20
Criterios económicos	45
TOTAL	100

De acuerdo a la tabla anterior se observa que el porcentaje de ponderación para los criterios económicos es del 45 % mayor que el propuesto para los criterios



técnicos y ambientales que es de 35 y 20 % respectivamente, la razón principal para proponer que la ponderación de los aspectos económicos sea mayor que los demás aspectos se debe primordialmente al objetivo principal de implementar una PTAR que es abatir los efectos adversos del medio ambiente y la calidad de vida de las personas. Por lo que independientemente de los beneficios que siempre serán positivos para la sociedad y semejantes, se determina que cualquier tecnología propuesta cumple con el objetivo principal, sin embargo, desde el punto de vista económico se elige la alternativa tecnológica que asegure un uso eficiente de los recursos del país, esto se lleva a cabo al evaluar los costos cuyo resultado se ve reflejado en la rentabilidad de la PTAR.

- c) **Establecer qué parámetros se evaluarán**, los criterios y subcriterios calificados para las alternativas tecnológicas deben ser comparables entre sí (ver Tabla 31). Una vez establecida la escala de calificación y la ponderación de los criterios y subcriterios que se evaluarán, los especialistas asignan a cada uno de estos un valor numérico y se genera la matriz de evaluación para cada caso en particular, en esta segunda etapa de evaluación se calificarán los criterios técnicos y ambientales.

En la siguiente matriz se presentan los resultados de forma ordenada como se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31. Criterios y subcriterios técnicos que se evaluarán.

Criterios técnicos	Ponderación %	Subcriterios técnicos	(Calificación otorgada * %Ponderación)		
			Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Especificaciones técnicas del proceso.	25	a) Eficiencia de remoción de contaminantes.			
		b) Intervalo de flujo en el cual el sistema es aplicable.			
		c) Espacio requerido para su instalación y futuras ampliaciones.			



		d) Especificaciones de los insumos necesarios para que la tecnología opere eficientemente (cantidad, tipo, etc.).			
		e) Generación de residuos (características físicas, químicas y microbiológicas).			
		f) Especificaciones de servicios auxiliares (tipo, consumo y disponibilidad).			
Características relevantes del proceso.	25	a) Condiciones de operación (temperatura, humedad, etc.).			
		b) Tratamientos previos y posteriores.			
		c) Aceptación por parte de la comunidad.			
Características específicas de la tecnología.	25	a) Vida útil			
		b) Disponibilidad de la tecnología (nacional o extranjera).			
		c) Capacidad de ampliación de la tecnología.			
		d) Riesgos implícitos en la tecnología y sistemas de seguridad.			
		e) Compatibilidad con los sistemas de abastecimiento de agua y alcantarillado.			
		f) Consumo anual de energía.			
		g) Grado de complejidad de la tecnología respecto a la población.			
Flexibilidad del proceso.	15	a) Tolerancia a las variaciones de flujo			
		b) Flexibilidad del proceso en cuanto a las variaciones en el suministro de insumos y activos.			
		c) Flexibilidad en cuanto a capacidad de operación en condiciones críticas.			
		d) Flexibilidad en cuanto a número de equipos de relevo necesarios.			
		e) Requerimientos de automatización de la tecnología.			
recursos materiales y	10	a) Disponibilidad local o nacional de equipos.			



		b) Disponibilidad local o nacional de materiales de construcción.			
		c) Insumos y activos locales o nacionales disponibles.			
TOTAL	100				

Después de evaluar los criterios técnicos se evaluarán los criterios ambientales siguiendo la misma secuencia que se utilizó en la matriz anterior (Tabla 32).

Tabla 32. Criterios y subcriterios ambientales que se evaluarán.

<i>Criterios ambientales</i>	<i>Ponderación %</i>	<i>Subcriterios técnicos</i>	<i>(Calificación otorgada * %Ponderación)</i>		
			<i>Alternativa 1</i>	<i>Alternativa 2</i>	<i>Alternativa 3</i>
Criterios ambientales	30	1. Impacto ambiental debió a los lodos residuales generados			
	10	2. Producción de ruido			
	15	3. Emisiones de compuestos peligrosos al medio ambiente			
	20	4. Generación de malos olores			
	25	5. Generación de fauna nociva			
TOTAL	100				



ETAPA 3

En esta etapa se evalúan los criterios económicos de las alternativas que tuvieron un puntaje mayor, se descarta aquella que tuvo el puntaje menor en la etapa anterior.

Se sigue la misma secuencia de calificación que en la segunda etapa (Tabla 33), para otorgarle una calificación a estos criterios se toma como referencia la información que se presenta en el apartado “Análisis de costos índice para las tecnologías de tratamiento de aguas residuales municipales más utilizadas en México”, capítulo dos del presente trabajo.

Tabla 33. Criterios y subcriterios económicos que se evaluarán.

Criterios técnicos	Ponderación %	Subcriterios técnicos	(Calificación otorgada * %Ponderación)		
			Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costo de la solución tecnológica.	35	a) Costo de la tecnología que se implementará			
		b) Costo del terreno.			
		a) Costo de la instalación, los materiales y equipo de construcción.			
		b) Costo de la mano de obra para la construcción.			
Costo de operación y mantenimiento.	25	a) Costo de los insumos.			
		b) Costo anual por la energía consumida.			
		c) Costo de los equipos adicionales para el funcionamiento de la tecnología.			
		d) Costo de mantenimiento			
		e) Costo de mano de obra y personal			
Generación de productos y subproductos con un valor agregado.	25	a) Costos agregados por la venta de agua.			
		b) Costos agregados por la generación de metano.			
		c) Costos agregados por la venta de biosólidos.			
Costos por el tratamiento de los subproductos.	15	a) Costos asociados al tratamiento de lodos residuales			
TOTAL	100				



Selección de la mejor alternativa.

El paso final es seleccionar la mejor alternativa ésta será la que obtenga una mayor puntuación según el método de suma ponderada, aplicando la siguiente ecuación:

$$\sum_{j=1}^k C_j P_j = C_{TOT} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

P_j es el peso ponderado asignado a cada criterio o subcriterio (variable), este puede ser asignado para el conjunto de criterios o bien a cada criterio o subcriterio.

C_j es la calificación que se le otorga a cada variable.

C_{TOT} es la calificación total para cada alternativa.

Los resultados son presentados de forma jerárquica indicando cuál es el resultado total para cada alternativa evaluada.

En síntesis en la Figura 18 se muestra el diagrama de flujo del mecanismo de selección de tecnología, el cual es de simple aplicación y está sustentada en el análisis de diferentes áreas del conocimiento científico y técnico en materia de tratamiento de aguas residuales municipales.

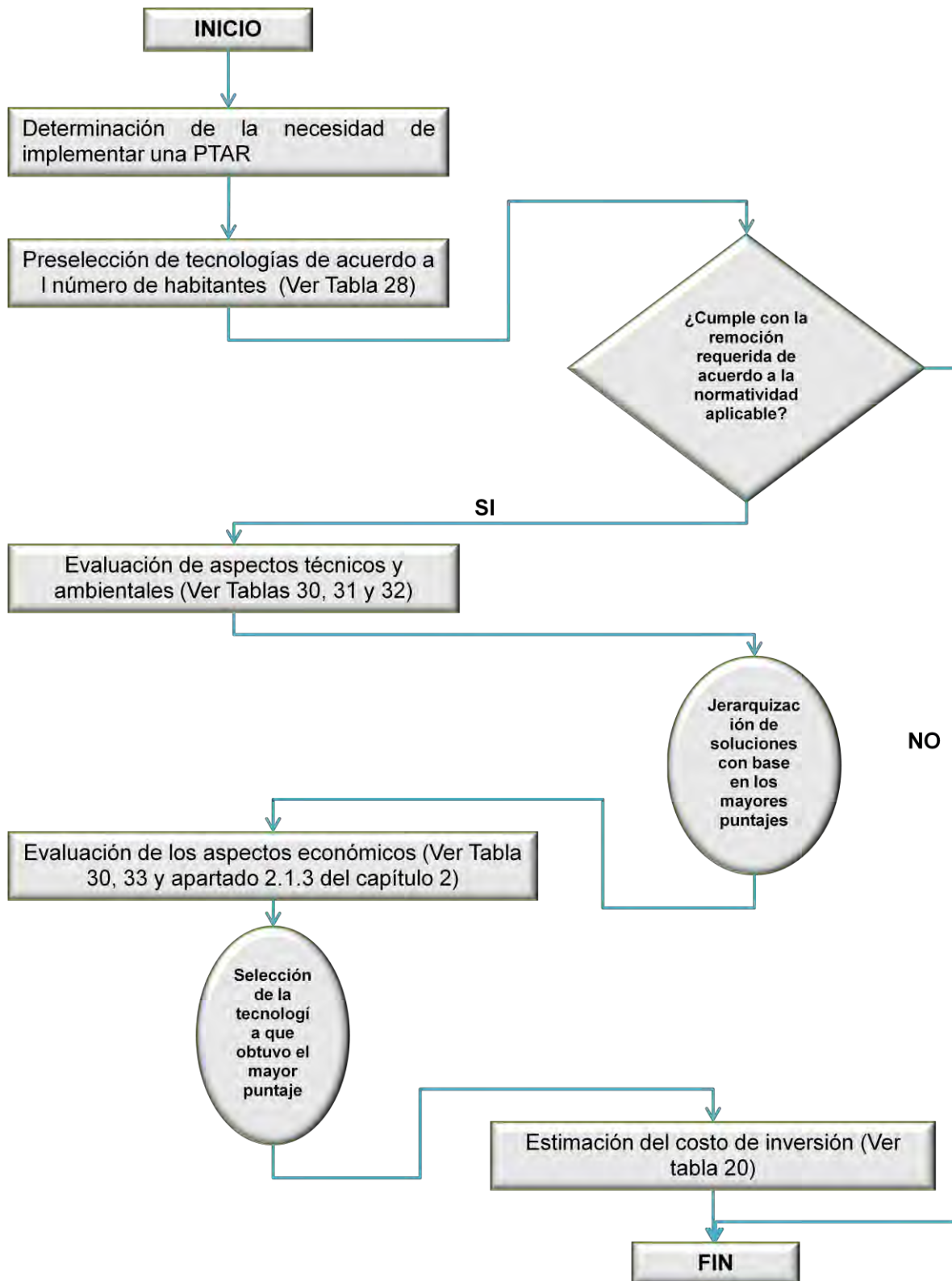


Figura 18. Diagrama de Flujo de la metodología propuesta.



3.1.3 Ejemplo de la aplicación de la metodología de evaluación de alternativas y selección de la mejor alternativa tecnológica para el tratamiento de aguas residuales municipales.

Se tiene un municipio con las siguientes características:

- Tiene un área limitada para la construcción.
- Cuenta con una población de aproximadamente 800,000 habitantes.
- El caudal a tratar es de 2 500 litros por segundo.
- El municipio se encuentra ubicado en el sur de Chihuahua.
- Condiciones climatológicas:
 - a) Clima seco.
 - b) Predomina una temperatura generalmente mayor a 25°C durante épocas calurosas y menores a 15 °C en épocas frías.
- El municipio tiene capacidad para operar un sistema complejo de tratamiento de aguas residuales.
- El área para la construcción de la PTAR está a una distancia adecuada del municipio y en una zona de bajo riesgo.
- La concentración del agua residual es media se encuentra dentro del promedio reportado por algunos autores, los parámetros de calidad y sus valores se encuentran en reportados en la Tabla 9.

El agua tratada se empleará para riego de áreas verdes del municipio por lo que su calidad debe ser alta ya que existe un contacto con la población y debe cumplir con la NOM-003-SEMARNAT-1997.

Aplicación de la metodología.

De acuerdo a las características anteriores y utilizando la matriz antes desarrollada para la selección de alternativas las tecnologías que se pueden aplicar son las siguientes:



Tabla 34. Disponibilidad Tecnologías propuestas para el tratamiento de agua para un caso ejemplo.

Capacidad de adaptación a tecnologías complejas	Zona (habitantes)	Capacidad económica de los usuarios	Pretratamiento y tratamiento primario recomendados	Tratamiento secundario recomendado	Tratamiento terciario necesario	Requerimiento de área para su construcción	Requerimiento de energía y equipos	Calidad del efluente	Normatividad que cumple de acuerdo a la calidad del efluente
Alta	Metropolitanos (Zonas Metropolitanas) >500,000	Alta	Rejillas, desarenador y sedimentación primaria	Lodos activados convencionales Lodos activados aireación extendida	Sedimentación (con/sin coagulación-floculación) desinfección se requiere filtración y desinfección (en el caso de usos con contacto al público)	Moderada/Alta	Moderada/Alta	Alta	NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997
			Rejillas y desarenador	Reactores biológicos en secuencia, SBR (no requieren un sedimentador secundario)	Filtración y desinfección (en algunos casos se requiere un tanque de homogenización antes de otros tratamientos terciarios)	Baja	Moderada	Alta	NOM-001-SEMARNAT-1997 NOM-003-SEMARNAT-1997
			Rejillas, desarenador y tratamiento primario avanzado	----- ---	Desinfección	Baja	Baja	Adecuada para cumplir con la nom-001-semarnat-1997	NOM-001-SEMARNAT-1996
			Rejillas, desarenadores sedimentación primaria	Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)	Se recomienda que después de un UASB se utilice un post tratamiento aerobio: -Lodos activados -Humedales artificiales	Baja/Moderada	Moderada	Baja (sin tratamientos posteriores) Alta (con tratamientos posteriores)	NOM-001-SEMARNAT-1996 NOM-003-SEMARNAT-1997

ENTE: Elaboración propia a partir de la información en el capítulo dos del presente trabajo.

Para simplificar la evaluación en las etapas siguientes de estas tecnologías se elegirán las que se adapten al área disponible y a la calidad requerida, de acuerdo a estos parámetros se eligieron las siguientes alternativas tecnológicas:

1. Lodos activados convencionales.
2. Lodos activados por aireación extendida.
3. Reactores biológicos por lotes (SBR).
4. Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente (UASB)+ Lodos Activados Convencional.

La calificación otorgada en la primera etapa se llevará a cabo tomando como base la información presente en el capítulo 2 y se hará de acuerdo a la escala antes propuesta.

Tabla 35. Escala de calificación.

Atributo	Calificación (Ci)
Atributo no disponible (no aplica)	0
Calificación mínima (suficiente en este atributo)	1



Calificación media (atributo promedio adecuado)	2
Calificación máxima (excelente en este atributo)	3

Se continúa con la primera etapa de evaluación, la calificación otorgada en la primera etapa se llevará a cabo tomando como base la información del capítulo 2 y se hará de acuerdo a la escala antes propuesta.

Tabla 36. Criterios y subcriterios técnicos para la evaluación de alternativas tecnológicas de tratamiento biológico.

Criterios técnicos	Ponderación %	Subcriterios técnicos	Calificación / (Calificación otorgada * %Ponderación)			
			Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Especificaciones técnicas del proceso.	25	a) Eficiencia de remoción de contaminantes.	75	75	50	75
		b) Intervalo de flujo en el cual el sistema es aplicable.	75	75	50	75
		c) Espacio requerido para su instalación y futuras ampliaciones.	25	25	75	25
		d) Especificaciones de los insumos necesarios para que la tecnología opere eficientemente (cantidad, tipo, etc.).	75	75	75	75
		e) Generación de residuos (características físicas, químicas y microbiológicas).	50	75	75	50
		f) Especificaciones de servicios auxiliares (tipo, consumo y disponibilidad).	50	50	25	50
Características relevantes del proceso.	25	a) Estabilidad de operación de la tecnología respecto a las condiciones de operación (temperatura, humedad, etc.).	75	75	75	50
		b) Tratamientos previos y posteriores.	50	50	75	50
		c) Aceptación por parte de la comunidad.	75	50	75	75
especificaciones de la	25	h) Vida útil	75	75	75	75



		i) Disponibilidad de la tecnología (nacional o extranjera).	75	75	50	75
		j) Capacidad de ampliación de la tecnología.	75	75	75	50
		k) Riesgos implícitos en la tecnología y sistemas de seguridad.	75	75	50	75
		l) Compatibilidad con los sistemas de abastecimiento de agua y alcantarillado.	75	75	75	75
		m) Consumo anual de energía.	25	25	50	25
		n) Grado de complejidad de la tecnología respecto a la población.	75	75	50	50
Flexibilidad del proceso.	15	f) Tolerancia a las variaciones de flujo	50	50	75	50
		g) Flexibilidad del proceso en cuanto a las variaciones en el suministro de insumos y activos.	50	50	50	25
		h) Flexibilidad en cuanto a capacidad de operación en condiciones críticas.	75	50	25	25
		i) Flexibilidad en cuanto a número de equipos de relevo necesarios.	50	25	25	25
		j) Requerimientos de automatización de la tecnología.	75	75	50	50
Disponibilidad de recursos materiales y equipos necesarios.	10	d) Disponibilidad local o nacional de equipos.	75	75	75	75
		e) Disponibilidad local o nacional de materiales de construcción.	75	75	75	75
		f) Insumos y activos locales o nacionales disponibles.	75	75	75	75
TOTAL	100		1295	1265	1225	1145

Después de evaluar los criterios técnicos se evaluarán los criterios ambientales siguiendo la misma secuencia que se utilizó en la matriz anterior para otorgar un puntaje (ver Tabla 37).



En la evaluación de criterios ambientales se descarta la tecnología que obtuvo el menor puntaje en la evaluación de criterios técnicos y sólo se evaluarán las que quedan, en este caso son:

- 1) Lodos activados convencionales,
- 2) Lodos activados por aireación extendida, y
- 3) Reactor Biológico Secuencial (SBR).

Tabla 37. Criterios y subcriterios ambientales para la evaluación de alternativas tecnológicas de tratamiento biológico.

Criterios ambientales	Ponderación %	Subcriterios técnicos	(Calificación otorgada * %Ponderación)		
			Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Criterios ambientales	30	1. Impacto ambiental debido a los lodos residuales generados	60	90	30
	10	2. Producción de ruido	30	30	30
	15	3. Emisiones de compuestos peligrosos al medio ambiente	45	45	45
	20	4. Generación de malos olores	45	45	45
	25	5. Generación de fauna nociva	50	50	50
TOTAL	100		230	260	200

ETAPA 3

En esta etapa se evalúan los criterios económicos de las alternativas que tuvieron un puntaje mayor, se descarta aquella que tuvo el puntaje menor en la etapa anterior.

Se sigue la misma secuencia de calificación que en la segunda etapa (ver Tabla 38), para otorgarle una calificación a estos criterios se toma como referencia la información que se presenta en el apartado “Análisis de costos índice para las tecnologías de



tratamiento de aguas residuales municipales más utilizadas en México”, capítulo 2 del presente trabajo.

Siguiendo las mismas indicaciones se descarta la tecnología con el menor puntaje y se califican los criterios económicos para las siguientes alternativas:

1. Lodos activados convencionales.
2. Lodos activados por aireación extendida.

Tabla 38. Criterios y subcriterios económicos para la evaluación de alternativas tecnológicas de tratamiento biológico.

Criterios técnicos	Ponderación %	Subcriterios técnicos	(Calificación otorgada * %Ponderación)	
			Alternativa 1	Alternativa 2
Costo de la solución tecnológica.	35	a) Costo de la solución tecnológica.	105	105
		b) Costo del terreno		
		c) Costo de la instalación, los materiales y equipo de construcción.	105	105
		d) Costo de la mano de obra para la construcción.	105	105
Costo de operación y mantenimiento.	25	a) Costo de los insumos.	75	75
		b) Costo anual por la energía consumida.	75	25
		c) Costo de los equipos adicionales para el funcionamiento de la tecnología.	75	75
		d) Costo de mantenimiento	75	75
Generación de productos y subproductos con un valor agregado.	25	a) Beneficios por la venta de agua.	75	75
		b) Beneficios agregados por la generación de metano. (no se genera de metano)	0	0



		c) Beneficios por la venta de biosólidos (no se comercializan los biosólidos).	0	0
Costos por el tratamiento de los subproductos.	15	a) Costos asociados al tratamiento de lodos residuales	15	45
TOTAL	100		700	685

Se concluye que la selección de una tecnología de tratamiento de aguas residuales para el municipio anterior y de acuerdo a sus características utilizando la metodología propuesta, es el proceso de lodos activados convencionales debido a que el consumo de energía es aproximadamente la mitad del que se requiere para mantener en operación el proceso de aireación extendida (14) este indicador influyó directamente en la calificación otorgada como se observa en la matriz de evaluación de criterios económicos. Sin embargo, aunque una de las principales ventajas que ofrece el proceso de aireación extendida es que el volumen producido de lodos residuales y su costo por disposición son menores al del proceso convencional, estas ventajas no fueron lo suficientemente importantes para que la evaluación se inclinara hacia esa tecnología.

Resultado Final.

Tabla 39. Tabla resumen de los puntajes obtenidos en cada evaluación para los procesos propuestos.

PRIMERA ETAPA	SEGUNDA ETAPA		TERCERA ETAPA
Tecnologías seleccionadas	Puntaje obtenido en la evaluación de criterios técnicos	Puntaje obtenido en la evaluación de criterios ambientales	Puntaje obtenido en la evaluación de criterios económicos
Lodos activados, convencional.	1295	230	700



Lodos activados, aireación extendida.	1265	260	685
Reactor biológico en secuencia	1225	200	
Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB) + Lodos activados, convencional	1145		

El puntaje que obtuvo el proceso de lodos activados convencional fue de 550 mayor que 535 obtenido por el proceso de aireación extendida.

Por tanto el tren de tratamiento propuesto para el municipio en cuestión es el siguiente:

ETAPA DEL PROCESO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	Procesos y equipos
PRETRATAMIENTO	Rejillas, Desarenador
TRATAMIENTO PRIMARIO	Sedimentación primaria
TRATAMIENTO SECUNDARIO	Proceso de lodos activados convencional (reactor biológico + sedimentador secundario)
TRATAMIENTO TERCIARIO	Filtración y desinfección con cloro.



CONCLUSIONES

Actualmente en México, se trata el 30 % del agua residual, esto es menos de la mitad del agua residual total generada a nivel municipal y el tratamiento está referido a las descargas a los cuerpos receptores y un bajo porcentaje de agua tratada es reutilizada alrededor del 50 % del agua tratada es reutilizada debido a la baja calidad obtenida en el efluente de las PTAR municipales. Las instituciones Mexicanas se han enfocado en incrementar la infraestructura para tratar el agua residual de origen municipal y que deje de ser una fuente de contaminación y se transforme en un bien que influya en la mejora de los municipios. Sin embargo, los procesos para llevar a cabo la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales son largos y costosos por lo que aunque la CONAGUA planteó que en el año 2008 la capacidad se incrementaría a 85 500 litros por segundo el caudal de aguas residuales tratadas y con ello solo se logró alcanzar un 40.2% en la cobertura de tratamiento del agua residual a nivel nacional (22). Para el año 2012 se pretende incrementar la cobertura del tratamiento del agua residual hasta un 60% por lo que tanto el mecanismo de selección de tecnologías debe ser lo suficientemente adecuado para obtener un agua tratada que cumpla con los parámetros de calidad expuestos en las normas oficiales mexicanas NOM-001-SEMARNAT-1996 y NOM-003-SEMARNAT-1997 según el uso y disposición del agua tratada.

Del diagnóstico de la situación actual en materia de tratamiento de agua residual se precisa que existen metas a corto plazo, por ejemplo, la construcción de nuevas PTAR municipales para incrementar el volumen de agua residual tratada y asegurar que las alternativas tecnológicas que se seleccionen para ello cumplan con la calidad requerida para su disposición y reutilización, ya que esta acción contribuye al desarrollo de las poblaciones de los municipios y que por si fuera poco al no tratar el agua residual generan una fuente de contaminación constante que se traduce en gastos para la sociedad al tratar de remediar y mitigar los impactos negativos en los cuerpos de agua y en la salud de la población principalmente.



De acuerdo al análisis de uso de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales en México se identificaron los siguientes criterios para la selección de tecnologías:

- a) La viabilidad económica y técnica de la construcción y operación de la PTAR.
- b) La calidad del efluente que es posible obtener de acuerdo al tipo de tecnología comparándola con la calidad exigida en la normatividad para la descarga o reutilización del agua.
- c) La confianza que las tecnologías ofrecen a las autoridades, por haber sido probadas o no en un número suficiente de instalaciones en el mundo.

A partir de lo anterior se llevó a cabo una revisión de las tecnologías que se emplean actualmente en las PTAR municipales por estado de la República Mexicana, de este análisis se definió que el proceso de lodos activados es el mayormente usado en zonas metropolitanas y los costos de inversión en México son de 18000-36000 USD / (L/s), en función del gasto de la planta, mientras que los gastos de operación son de 0.07-0.22 USD/m³, en el caso de lagunas de estabilización los costos varían entre \$0.03 a 0.05 USD/m³ (9), esta rango se considera a no ser que se requiera bombear el agua residual desde una cierta distancia o desnivel.

En síntesis en la actualidad las tecnologías de tratamiento anaerobio, los tratamientos basados en métodos naturales (como ejemplo humedales artificiales y lagunas de estabilización), las plantas con tratamiento primario convencional (sedimentación) y sus respectivas combinaciones, suman 1070 PTAR municipales esto representa el 62.57 % del total de plantas y que tratan el 23.19 % del volumen de aguas residuales generado en todo el país, estos valores indican que las tecnologías se han seleccionado tomando en cuenta bajos costos de inversión y operación, así como un bajo consumo de energía. Sin embargo, también se consideraron otros indicadores asociados a los principales aspectos técnicos y eficiencias de remoción de contaminantes de cada proceso de tratamiento de aguas residuales, estos aspectos son parte del anexo A en donde se desarrollaron fichas técnicas con la información de mayor relevancia de las tecnologías de tratamiento de aguas residuales municipales.



Los aspectos e indicadores por tipo de tecnología se identificaron y presentaron en las tablas 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 y 17 estos aspectos están directamente relacionados con un funcionamiento eficiente, así como con el impacto ambiental positivo y negativo que pueden tener, otros aspectos relevantes son los relacionados con las características de las tecnologías de tratamiento como la eficiencia de remoción de los principales contaminantes del agua, la generación de lodos residuales, la capacidad económica y educativa de la población para la implementación y operación de la una PTAR municipal de acuerdo a la tecnología que utilice, los costos y los requerimientos de operación y mantenimiento, la estimación de costos de inversión, así como el área requerida para la construcción de una PTAR de acuerdo al proceso o tecnología en la que esté basada.

Para obtener las bases teóricas y desarrollar un mecanismo de evaluación y selección que permitiera elegir la mejor tecnología de tratamiento de aguas residuales municipales, se revisaron y analizaron las metodologías de mayor aplicación que se presentaron en el apartado 2.2 del presente trabajo, de esta revisión se obtuvieron criterios y variables que deben ser evaluadas para garantizar el funcionamiento eficiente de esa tecnología de acuerdo con las características del municipio y a los objetivos propuestos para el tratamiento de aguas. El resultado de esta actividad es la base que permitió estructurar la metodología propuesta en el presente trabajo y la selección del método de calificación por sumas ponderadas, este método es de fácil aplicación y permite otorgarle un valor numérico tanto a las variables cualitativas como a las cuantitativas para obtener un resultado válido y comparable entre las alternativas tecnológicas evaluadas.

Al concluir con la revisión y análisis de las tecnologías de tratamiento se definieron y clasificaron los criterios técnicos, ambientales y económicos que se consideraron en el desarrollo de este trabajo (Tabla 25 y 26). En general los criterios fueron enfocados en la calidad de efluente que es posible obtener con cada tecnología, cumpliendo con las



normas ambientales aplicables, la viabilidad técnica y económica para la implementación de la tecnología correspondiente, operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales, tomando en cuenta la institucionalización de las tecnologías ya que estas han sido probadas en un número suficiente de instalaciones en México y en el mundo.

Los criterios empleados tienen el objetivo principal de ayudar a la toma de decisiones cuando se requiere seleccionar una tecnología. Por lo que son parte esencial de la metodología propuesta.

En conclusión la propuesta metodológica es un mecanismo de selección de tecnologías viables para una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales cuyo principio general es asegurar la mejor solución a un problema actual que se presente en un municipio en materia de tratamiento de agua residual, ya que toma en cuenta sus características económicas y sociales; y de acuerdo a las características de la tecnología son calificadas empleando los criterios tecnológicos, ambientales y económicos aplicables (ver Tabla 25,26 y apartado 3.1.1.2) mediante el método de suma ponderada se obtiene un resultado numérico comparable. El resultado final se obtiene evaluando a las alternativas tecnológicas que han sido elegidas de acuerdo al número de habitantes, la capacidad económica del municipio y al espacio requerido para la construcción de una PTAR. Para aplicar la propuesta metodológica se desarrolló un ejemplo, en donde se otorgó una calificación en una secuencia de tres etapas en donde los criterios técnicos, ambientales y económicos fueron calificados de acuerdo a los indicadores desarrollados en el capítulo dos y tuvieron la función de filtros para que al final se obtenga un resultado numérico que indique cuál es la tecnología más adecuada para implementarse en el municipio en cuestión.

El mecanismo de evaluación desarrollado es de simple aplicación, las calificaciones otorgadas están sustentadas en el análisis de los principales procesos de tratamiento de aguas residuales empleados en México y el mundo, este análisis contemplo la



revisión de la situación en materia de tratamiento de aguas residuales en los diferentes estados del país.

Finalmente, al utilizar la presente propuesta metodológica para elegir e implementar una tecnología técnica, ambiental y económicamente viable, es evidente que los costos para la sociedad debidos a la preservación de los recursos hídricos y a la mitigación de la degradación del agua disminuirán y en consecuencia los beneficios se incrementarán, sumado a los aspectos anteriores el desarrollo de los municipios en cuestión no estará condicionando debido a los impactos negativos por no contar con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales municipales.



BIBLIOGRAFÍA

1. **CONAGUA.** *Estadísticas del Agua en México.* México : SEMARNAT, 2008.
2. **UNEP/WHO/HABITAT/WSSCC.** Guidelines on Municipal Wastewater Management. A practical guide for decision-makers and professionals on how to plan, design, and finance appropriate and environmentally sound municipal wastewater discharge systems. s.l., UNEP/GPA Coordination Office : The Hague, The Netherlands (2004), 2004.
3. *Sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales en América Latina: Realidad y Potencial.* **Moscoso, Cavallini Julio, et.al.** 2002, Organización Panamericana de la Salud, págs. 1-12.
4. **CONAGUA.** *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento.* México : Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2009.
5. *Lodos residuales: estabilización y manejo.* **Oropeza, García Norma.** Chetumal, Quintana Roo : s.n., 2006, Caos Conciencia, págs. 51-58.
6. *Manejo de lodos residuales en México.* **Cardoso, Vigueros Lina, et al.** 2000, XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, págs. 1-7.
7. **Metcalf & Eddy, Inc.** *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse.* New York : Mc Graw Hill, 2003.
8. **Davis, Mackenzie L. Davis, et. al.** *Ingeniería y ciencias ambientales.* México : McGraw-Hill Interamericana, 2005.
9. **Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales. Guía.** *Guía. Gestión para el manejo, tratamiento y disposición final de las aguas residuales municipales .* Colombia : Ministerio del Medio Ambiente, 2002.
10. **USEPA.** Chemical Precipitation. [En línea] September de 2000. http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/chemical_precipitation.pdf.
11. **Calderón, Mólgora César G.** *SERIE AUTODIDÁCTICA DE MEDICIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA.* . México : La Gerencia de Recaudación y Control de la Subdirección General de Administración del Agua. CNA, 2001.
12. **USEPA.** Zanjias de oxidación. [En línea] Septiembre de 1999. http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/cs_00_013.pdf.



13. —. Reactores secuenciales por tandas. [En línea] http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/cs_99_073.pdf.
14. **Ramalho, R. S.** *Tratamiento de Aguas Residuales*. México : Editorial Reverté, S. A., 1996.
15. **USEPA.** Trickling filters. [En línea] September de 2000. http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/trickling_filter.pdf.
16. —. Humedales de flujo libre superficial. [En línea] Septiembre de 2000. http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/cs_00_024.pdf.
17. —. Humedales de flujo subsuperficial. [En línea] Septiembre de 2000. http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/wetlands-subsurface_flow.pdf.
18. **Mantilla, Morales Gabriela, et. al.** Costos índice de sistemas de tratamiento de agas residuales en México. s.l., México : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2002.
19. *Selección de Tecnología para el tratamiento de agua. Validación del modelo conceptual.* **Alberto Galvis C., Viviana Vargas F.** 1997, Instituto Cinara, Universidad del Valle , págs. 1-11.
20. **Souza, Ing. Marco Antonio Almeida de.** METODOLOGIA DE ANALISIS DE DECISIONES PARA SELECCIONAR ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO Y USO DE AGUAS RESIDUALES. s.l., Brasilia - DF, brasil. : Universidad de Brasilia. Dpto de Ingenieria civil. Campus Universitario - Asa Norte. 71910 - 090, 1997.
21. **ILAC.** *Iniciativa Latinoamericana y Caribeña para el Desarrollo Sostenible. Indicadores de seguimiento: México 2005.* México : PNUD-SEMARNAT-INEGI, 2005.
22. **CONAGUA.** *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y tratamiento de aguas residuales en operación.* México : s.n., 2007.
23. **Valdez, Enrique César y Vázquez González, Alba B.** *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales.* México : Fundación ICA, 2003.
24. **Cheremisinoff, Nicholas P.** *Handbook of Water and Wastewater. Treatment Technology.* Butterworth Heinmann : Pollution Engineering, 2002.
25. http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/cs_00_023.pdf.
26. http://www.epa.gov/OW-OWM.html/mtb/cs_00_024.pdf.



27. **Romero Rojas, Jairo Alberto.** *Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y principios de diseño.* Colombia : Escuela colombiana de Ingeniería, 2005.
28. **Ramalho, R.S.** *Tratamiento de aguas residuales.* Barcelona : Reverté S.A., 1996.
29. *Guía de selección de tecnología para el tratamiento de aguas residuales domésticas por métodos naturales.* **Bernal, D.P. et al.** Colombia : Instituto Cinara, 2002.
30. **Brans, Jean Pierre.** *Promethee Methods.* Belgium : Centrum voor Statistiek en Operationeel Onderzoek, 1999, págs. 1-37.
31. **François Brikké, Maarten Bredero.** *Linking technology choice with operation and maintenance in the context of community water supply and sanitation.* Geneva, Switzerland : World Health Organization and IRC Water and Sanitation Centre, 2003.
32. **Pedro Fierro, Evan K. Nyer.** *The Water Encyclopedia. Hydrologic Data and Internet Resources.* Boca Raton : Taylor & Francis, 2007.
33. <http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/impactos/mexicon/R-0032.pdf>. [En línea]
34. <http://www.pantarewater.com/default.asp?content=3,186,184,o,o,cribado,oo.html>. [En línea]
35. **Agency, United States Environmental Protection.** <http://www.epa.gov/OW-OWM.html/mtb/screens.pdf>. [En línea] EPA, September de 1999.
36. **Eckenfelder, W.W. and Ford, D.L.** *Water Pollution Control: Experimental Procedures for Process Design.* . Austin and New York : Pemberton Press Jenkins Publishing Co. , 1970.
37. **CIETME.** *Tratamiento avanzado de aguas residuales .* Madrid : CIETMAT, 2006. vol. 2.
38. **IRC.** Selección de tecnología en sistemas de tratamiento de agua para consumo humano y para el control de la contaminación por aguas residuales domésticas. *FAQ sheet sobre selección de tecnología por Cinara, Colombia.* [En línea] Noviembre de 2005. <http://www.es.irc.nl/page/26735>.
39. **USEPA.** Chemical Precipitation. [En línea] September de 2000. http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/chemical_precipitation.pdf.
40. —. Fine Bubble Aeration. [En línea] September de 1999. <http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/fine.pdf>.



41. —. Folleto informativo de tecnología de biosólidos. *Aplicación de biosólidos al terreno*. [En línea] Septiembre de 2000. <http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/cs-00-064.pdf>.
42. —. Onsite Wastewater Treatment System Manual. Office of Water, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency : s.n., Febrero de 2002.
43. **Williams, Paul**. *Waste treatment and disposal. second Edition*. s.l. : John Wiley & Sons, Ltd., 2005. 0-470-84912-6.
44. *Tipología de los municipios de México*. **Orozco, Barbosa, Jaime**. 1993, Gaceta Mexicana de Administración Pública Estatal y Municipal, págs. 41-45.
45. **USEPA**. Anaerobic Lagoons. [En línea] September de 2002. <http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/alagoons.pdf>.
46. —. Facultative Lagoons. [En línea] September de 2002. <http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/faclagon.pdf>.
47. —. Aerated, Partial Mix Lagoons. [En línea] September de 2002. <http://www.epa.gov/owmitnet/mtb/apartlag.pdf>.
48. **Zaror, Claudio Alfredo**. *“Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos”*. Universidad de Concepción, Chile : Universidad de Concepción, 1991.
49. **Turovsky, Izrail S. y Mathai, P. K.** Wastewater Sludge Processing. s.l. : WILEY-INTERSCIENCE, 2006.
50. **Subdirección General de Agua Potable, Drenaje y Saneamiento, CONAGUA**. *Metodologías de Evaluación Socioeconómica para Proyectos de Agua Potable, Alcantarillado, Saneamiento y Protección a Centros de Población* . México : Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2008.
51. *Modelo de costos para el tratamiento de las aguas residuales en la región*. **Salas, Quintero D., et-al.** 037, Pereira, Colombia : Universidad Tecnológica de Pereira, 2007, Vol. XIII.
52. **Ministerio del Medio Ambiente**. *Gestión para el Manejo, Tratamiento y Disposición Final de las Aguas Residuales Municipales, Guía*. Colombia : s.n., 2002.
53. **Barbosa, Jaime Orozco**. *Tipología de los municipios de México*. 1993. págs. 41-45.



54. **Manuel, Morgan-Sagastume Juan, López Hernández, Jorge y Noyola Robles, Adalberto.** *Matriz de decisión para la selección de tecnología relacionada con el tratamiento de aguas residuales.* 1998. págs. 1-16.



ANEXOS

A.1 Pretratamiento

A 1.1. Cribado

Descripción de la tecnología

✓ **Principio de operación**

El cribado es la primera operación que se debe considerar en una planta de tratamiento de aguas. Es un método físico que remueve los contaminantes más voluminosos, ya sean flotantes o suspendidos, intercepta los cuerpos gruesos antes de que dañen o vuelvan más lentos los procesos depurativos (Calderón, 2001).

Tipos o distintos arreglos

Las cribas se clasifican en función del tamaño de partícula removida, la captación de los cuerpos se realiza a través de dos tipos de cribas o rejillas metálicas con tamices que van de 4-6 cm, para el cribado grueso, y de 0.2 a 0.5 cm para el cribado fino. También pueden clasificarse de acuerdo a su colocación en fijas o móviles.

Otro tipo es el microcribado, comercialmente se encuentran microcribas estáticas y de tambor rotativo. Las estáticas, además, pueden ser vibratorias o con puente móvil y, paradójicamente, pueden tener rejilla móvil.

El cribado sirve como instrumento de protección del equipo electromecánico.

✓ **Esquema de proceso**

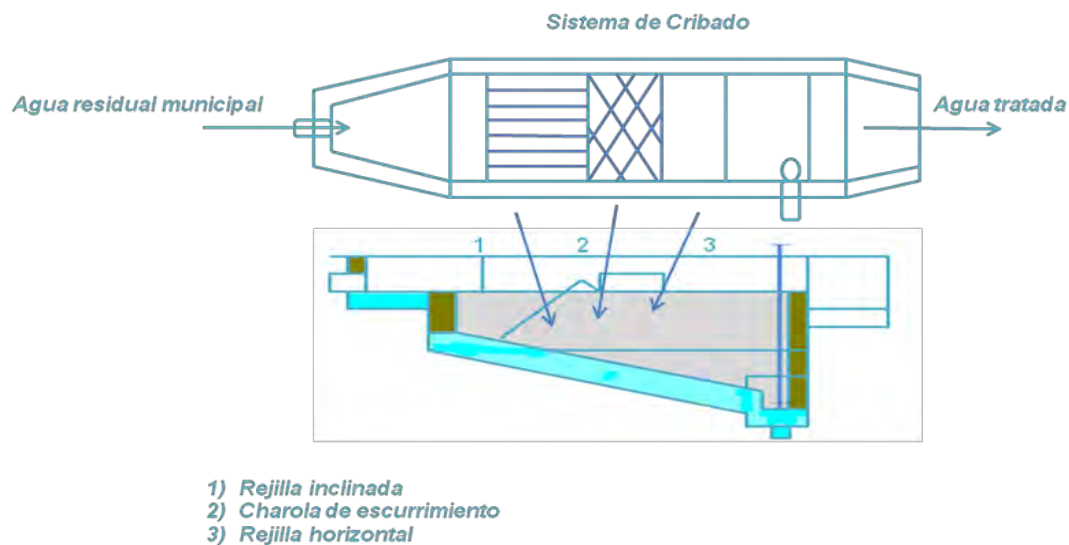


Figura 19. Esquema de Cribado

Aplicación de la tecnología



✓ **Tipo de contaminantes removidos**

La abertura de las barras se define en función del tipo de basura presente en el agua residual (ver Tabla 40)

Tabla 40. Clasificación del tipo de rejillas de acuerdo a su abertura.

Tipo de tamiz	Abertura (mm)	Observaciones
Rejillas gruesas.	51 a 153	Su uso estará definido por la basura presente. En algunas plantas sólo se emplean las rejillas finas.
Rejillas.	19 a 51	La abertura más común es de 25 mm.
Desmenuzadores	6 a 19	La abertura está en función de la capacidad hidráulica de la unidad. No remueven los sólidos, sino los reduce en tamaño y tienen que ser removidos por las unidades subsecuentes. Su uso no es frecuente en México.
Tamiz fijo (estático).	2,3 a 6,4	Aberturas menores a 2,3 mm son usadas en el pre-tratamiento y/o pueden sustituir al tratamiento primario. Son muy útiles cuando se tienen limitaciones de espacio. En México, no es frecuente encontrarlas en plantas municipales, pero sí en instalaciones industriales.
Tamiz ajustable.	0,02 a 0,3	Se utilizan para la remoción de sólidos muy pequeños y que no pueden ser eliminados por otros métodos, tales como la decantación o la degradación biológica

FUENTE: Adaptado de WPCF y ASCE, 1982.

En general permiten el paso de papeles, excretas y materiales finos, reteniendo en cambio materias de mayor tamaño, como piedras, palos, trapos, materiales grandes en suspensión, etc.

✓ **Ventajas de su aplicación**

Puede llegarse a eliminar entre un 5 y un 25 % de sólidos en suspensión. Reducir los sólidos en suspensión de distintos tamaños que trae consigo el influente de aguas residuales, evitar la obstrucción de los conductos, proteger los equipos y reducir al mínimo la absorción de oxígeno.

En el caso del microcribado se utiliza porque ahorran mucho espacio y en algunas aplicaciones muy particulares son especialmente aptas. Por ejemplo, para remover picos, pedazos de hueso y plumas de pollo en efluentes de rastros avícolas; semillas de chile, cascarilla de diversos granos e incluso levaduras y lodo granular de reactores con lechos de lodos anaerobios de flujo ascendente.

Limitantes para su aplicación

✓ **Clima**

No tiene problemas de condiciones climáticas, es aplicable para cualquier caso.

✓ **Condiciones geográficas**



Son ampliamente utilizados en todo el país y en el extranjero.

✓ **Disponibilidad de la tecnología**

Las unidades de cribado más usuales, para las plantas de tratamiento de agua residual municipal son las rejillas. El sistema de cribado es normalmente una elección en muchas organizaciones e instalaciones de tratamiento. Tienen menos éxito en la eliminación de sólidos finos de aguas pluviales.

Generación de residuos

✓ **Características de los residuos generados**

Los productos generados se separan, el material cribado se seca y generalmente se envía a un relleno sanitario, ya que se trata de botellas y bolsas de plástico, trapos, papeles, palos, ramas y hojas.

✓ **Cantidad de residuos generados**

La eficiencia de remoción aumenta, a medida que el tamaño y la concentración de los sólidos son mayores y la dimensión de la rejilla disminuye. Tiene proyecciones que contiene de 10-20 por ciento de sólidos secos que normalmente tienen una densidad que van de 640 a 1100 kilogramos por metro cúbico(11).

Insumos requeridos

✓ **Energía**

La energía usada para los sistemas de cribado es utilizada principalmente para las rejillas rotatorias, y la cantidad dependerá del diseño de ésta.

✓ **Reactivos químicos**

No se ocupa ningún reactivo para este proceso.

Operación y mantenimiento

✓ **Instrumentación y Control**

Las rejillas pueden ser de limpieza manual o automática. La activación de las rejillas automáticas puede ser programada (el mecanismo corre cada determinado periodo entre 10 y 15 minutos), o bien mediante un electronivel antes de la rejilla: cuando el nivel del agua sube, se activa el mecanismo. La instrumentación que incluye normalmente es: Arranque manual / parada. Arranque automático / parada en el temporizador. Marcha automática / paro diferencial en la cabeza. Activación mecánica en la limpieza de las rejillas.

✓ **Consideraciones especiales para el mantenimiento**

Es importante para las unidades de sistema de detección de pulverización estar funcionando correctamente para evitar que los sólidos se sequen y se peguen a las rejillas, éstas pueden ser limpiadas con agua a alta presión o agentes de limpieza. Los sistemas Cribado deberán ser inspeccionados periódicamente para asegurarse de que las cadenas de rodillos y los mecanismos de funcionamiento están lubricados.



La medición del flujo no es parte del Pretratamiento, ni es indispensable que esté colocado en esta etapa; sin embargo, debe existir por lo menos un medidor de flujo en toda la planta de tratamiento. El objetivo de los equipos que se usan para medir el caudal de agua residual es conocer las variaciones de flujo y esto permite determinar la cantidad de reactivos a emplear (cuando sea el caso) y predecir los lodos que se van a generar, por tal motivo es recomendable colocarlos antes de la planta entre las rejillas y el desarenador o antes del sedimentador primario.

A 1.2. Desarenado

Descripción de la tecnología

✓ Principio de operación

La función de los desarenadores es eliminar la arena del agua residual para proteger los equipos mecánicos de la abrasión y el desgaste, evitar la obstrucción en las tuberías o canales por la acumulación de partículas de arena, y reducir la acumulación de material inerte en los tanques de aeración y lodo digerido, evitando pérdidas en el volumen de dichos reactores.

La ubicación más frecuente de los desarenadores es después de las rejillas y antes del sedimentador primario. En algunas ocasiones, el desarenador se coloca antes del cribado, esto no es recomendable, también llegan a instalarse antes de las bombas de agua residual situación que no es recomendable ya que es frecuente que el sistema de alcantarillado sea tan profundo que situar el desarenador antes del bombeo no es costeable y se opta por bombear el agua con todo y arena, teniendo en cuenta que las bombas requerirán mayor mantenimiento (11).

✓ Tipos o distintos arreglos

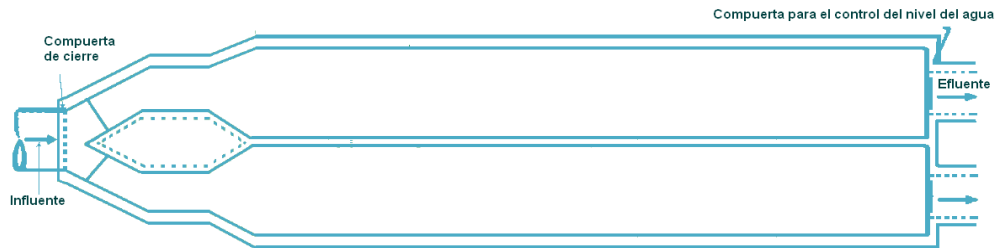
Existen tres tipos básicos de desarenadores:

- a) **Desarenadores de flujo horizontal** (control de velocidad y de nivel constante), son utilizados en instalaciones de pequeñas poblaciones y consisten en un ensanchamiento del canal del pretratamiento de forma que se reduzca la velocidad de flujo y decanten las partículas.
 1. Los *desarenadores con control de velocidad* son canales de sedimentación largos y estrechos que cuentan con secciones de control a la entrada y salida del mismo (ver Figura 20).
 2. Los *desarenadores rectangulares de nivel constante*, estos desarenadores son propiamente, tanques de sedimentación donde la arena y la materia orgánica sedimentan conjuntamente. Este tipo de desarenadores se controla mediante deflectores ajustables que aseguran una velocidad uniforme transversal al tanque (ver Figura 21).
- b) **Desarenadores aireados** se emplean para la remoción selectiva de arena. Son tanques con flujo espiral generado por la acción de difusores de aire instalados en uno de los lados del tanque, a una altura de 0.6 a 0.9 m, a partir del fondo. Las partículas de arena presentes en el agua residual, al entrar al desarenador sedimentan con diferente velocidad ya que ésta depende del tamaño, gravedad específica y la velocidad de rotación o agitación en el tanque. La Figura 22 ilustra la trayectoria del flujo de agua dentro del desarenador y las trayectorias que puede seguir la arena en su interior.



- c) **Desarenadores de vórtice**, son llamados así debido a que trabajan con un flujo tipo vórtice y aprovechan la fuerza centrífuga y gravitacional (Figura 23). El agua a tratar se introduce en forma tangencial cerca del fondo y sale de la misma forma, a través de la abertura en la parte superior del tanque. Dentro de la unidad se crea un vórtice y algunas partículas son retenidas dentro de éste (11).

✓ **Esquemas de proceso**



FUENTE: Noyola et al., 2000

Figura 20. Planta de un desarenador de doble canal

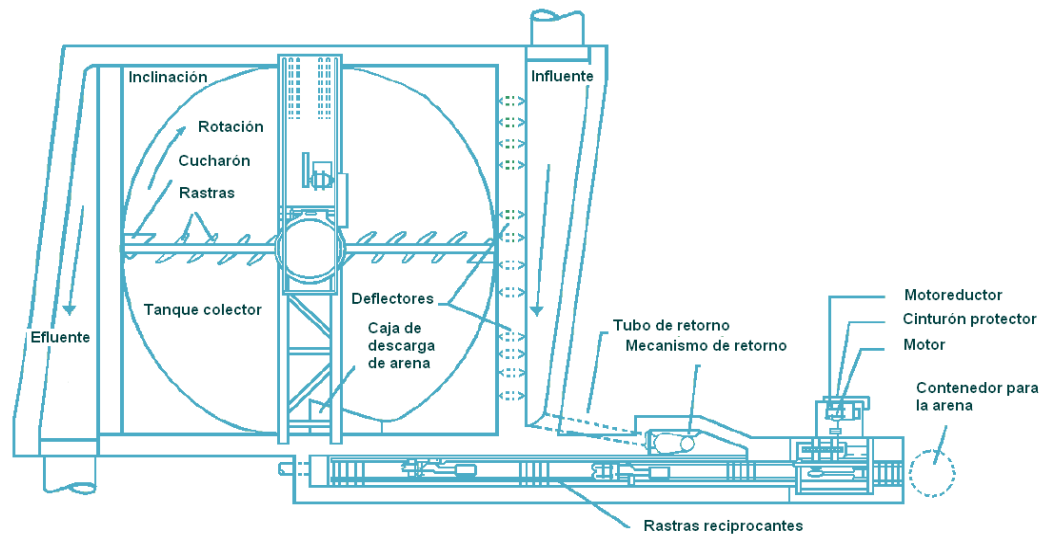
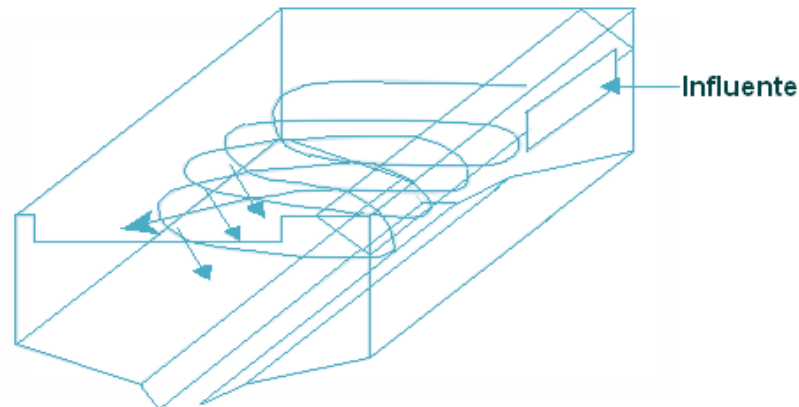


Figura 21.

FUENTE: Noyola et al., 2000.

Figura 22. Vista en planta de un tanque desarenador a nivel constante



FUENTE: Metcalf & Eddy, 1990.

Figura 23. Trayectoria del agua y las partículas en un desarenador aireado.

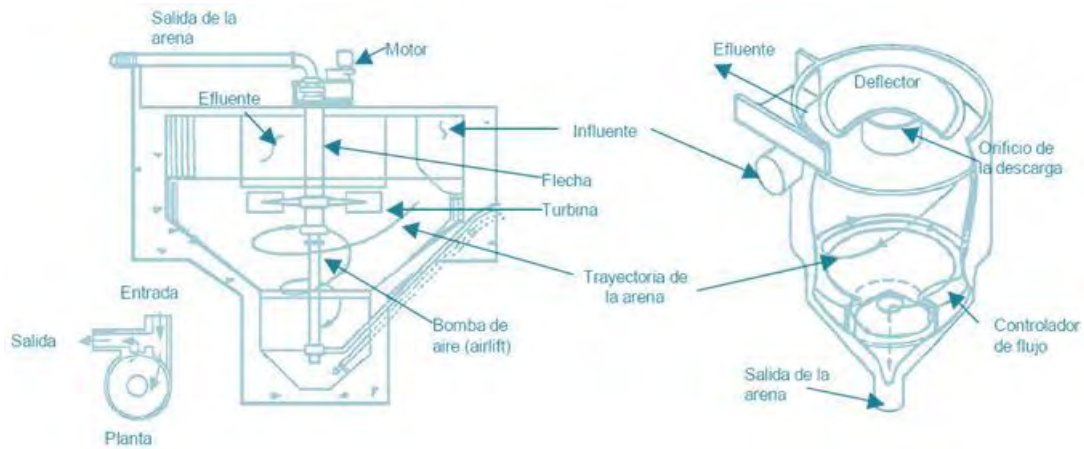


Figura 24. Desarenadores tipo vórtice: a) Unidad PISTA (de Smith & Loveless) y b) Unidad taza de té (de Eutek)

Aplicación de la tecnología

✓ **Tipo de contaminantes removidos**

Tabla 41. Contaminantes removidos por tipo de desarenador.

Tipo de desarenador	Contaminantes removidos
Flujo horizontal	Estos equipos se usan para remover arena, grava, partículas u otro material sólido pesado que tenga velocidad de asentamiento o peso específico bastante mayor que el de los sólidos orgánicos degradables de las aguas residuales.
Aireado	
De vórtice	



✓ ***Ventajas de su aplicación***

Los desarenadores protegen el equipo mecánico del desgaste anormal y reduce la formación de depósitos pesados en tuberías, canales y conductos. Además minimizan la frecuencia requerida de limpieza de los digestores, en aquellos casos en que se presenta una acumulación excesiva de arena en dichas unidades.

Limitantes para su aplicación

✓ ***Clima***

No tiene ningún problema, trabaja a condiciones normales.

✓ ***Condiciones geográficas***

Se puede ocupar esta tecnología en cualquier zona.

✓ ***Disponibilidad de la tecnología***

El principal problema en este sistema es que se tienen flujos que varían y a veces es necesario tener flujos altos debido al tipo de arenas que se presentan, otro problema es que ocupan mucho espacio y es necesario dividir el flujo para reducir el área.

✓ ***Contaminantes que dañarían al sistema***

El equipo no sufre deterioro por abrasión, ya que las partes mecánicas se encuentran por arriba del nivel del agua (11).

Generación de residuos

✓ ***Características de los residuos generados***

La arena removida, incluye una gran cantidad de impurezas y de material orgánico putrescible. Por ello, si no se dispone rápidamente, se presentarán olores desagradables y el material atraerá insectos y roedores (vectores). Posiblemente el método más económico de disposición sea en un relleno sanitario, o también por incineración.

✓ ***Cantidad de residuos generados***

La cantidad de arena varía mucho de una a otra localidad. Depende de las condiciones y el tipo de alcantarillado, de la frecuencia de lavado de las calles, del tipo de residuos industriales. La cantidad de arena a disponer, de un desarenador de aguas residuales oscila entre 4-200 mL/m³ de agua tratada, con un valor típico de 15mL/m³.

Insumos requeridos

✓ ***Energía***

La energía requerida en este sistema es mínima, sólo se necesita energía para el sistema de bombeo dentro del desarenador. En el caso en el que el desarenador fuese de tipo aireado se necesita energía por la cantidad de aire suministrado.

✓ ***Reactivos químicos***

No se ocupa ningún reactivo químico en esta operación.

Operación y mantenimiento



✓ **Instrumentación y Control**

No necesita equipos de control.

✓ **Consideraciones especiales para el mantenimiento**

Los desarenadores pueden ser del tipo de limpieza mecánico o de limpieza manual, dependiendo de si cuentan o no con equipo mecánico.

A 1. 3. Igualación

Descripción de la tecnología

✓ **Principio de operación**

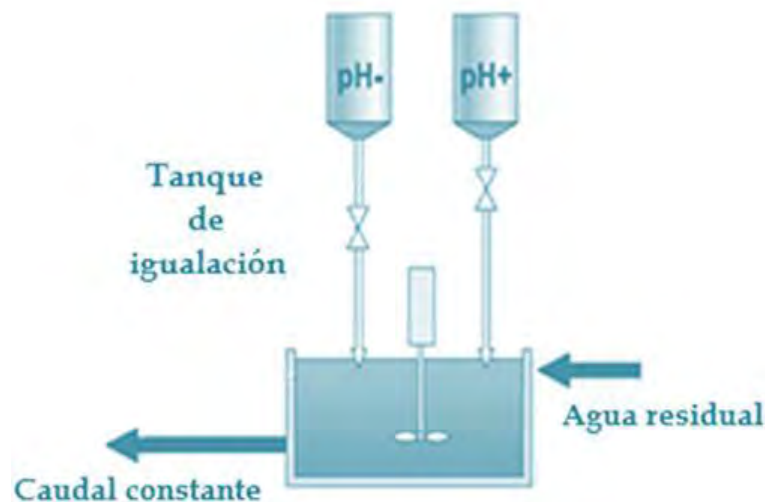
El igualamiento consiste en amortiguar las variaciones de caudal para lograr un caudal aproximadamente constante. Tiene, entre otros, los siguientes propósitos:

- Superar los problemas operacionales causados por las variaciones de caudal.
- Proveer un control adecuado de pH para minimizar los requerimientos posteriores de dosificación en procesos de neutralización.
- Permite descarga de caudales muy variables al alcantarillado municipal.
- Proveer un flujo continuo en plantas de residuos industriales con operación de procesos intermitentes.

✓ **Tipos o distintos arreglos**

En general los arreglos no difieren ya que todos estos sistemas siguen el mismo principio.

✓ **Esquema de proceso**



Aplicación de la tecnología

✓ **Tipo de contaminantes removidos**



El objetivo de este sistema no es remover contaminantes, sólo mantener un flujo constante.

✓ ***Ventajas de su aplicación***

- 1) Mejora la tratabilidad del agua residual.
- 2) Minimiza cargas choque sobre tratamiento biológico.
- 3) Diluye sustancias inhibidoras.

- 4) Estabiliza el pH.
- 5) Mejora la eficiencia y, por tanto la calidad del efluente.
- 6) Uniformiza la carga de sólidos sobre el sedimentador secundario y mejora el espesamiento de los lodos.
- 7) Con tratamiento químico hace más fácil la dosificación de los reactivos y mejora la confiabilidad y rendimiento del proceso.

Limitantes para su aplicación

✓ ***Clima***

No tiene ningún efecto negativo sobre este sistema.

✓ ***Condiciones geográficas***

La ubicación óptima depende del tipo de alcantarillado, de las características del agua residual, de las condiciones físicas del sistema de conducción y del tipo de tratamiento.

✓ ***Disponibilidad de la tecnología***

En algunos casos puede ser más adecuado colocarlo después del tratamiento primario.

✓ ***Contaminantes que dañarían al sistema***

Si se coloca antes del tratamiento primario, puede requerir mezcla para prevenir la sedimentación de sólidos y proveer aireación para evitar malos olores.

Generación de residuos

✓ ***Características de los residuos generados***

Los tanques de igualamiento requieren generalmente mezcla, para asegurar un igualamiento adecuado y para prevenir asentamiento de sólidos sedimentables en el tanque.

✓ ***Cantidad de residuos generados***

El punto anterior indica que no existe ninguna generación de residuos.

Insumos requeridos

✓ ***Energía***

Se utiliza un sistema de aireación que sirve para la oxidación de compuestos reducidos, y su nivel de potencia recomendado es de 4 a 8 W/m³, para equipos de aire difuso con una tasa de 10 a 15 L de aire por metro cúbico por minuto. También se requiere energía para el motor que se utiliza para el mezclado dentro del tanque.

✓ ***Reactivos químicos***



Se utilizan reactivos ácidos y básicos para poder control el pH dentro de tanque de igualación.

Operación y mantenimiento

✓ Instrumentación y Control

Básicamente lo único que necesita es un sistema de control para poder regular el pH y alcalinidad del afluente.

✓ Consideraciones especiales para el mantenimiento

En lo que respecta al mantenimiento del equipo únicamente es necesario hacer una limpieza profunda del tanque.

A.2 Tratamientos primarios.

Un tratamiento primario generalmente consiste en procesos físicos que involucran cribado mecánico, remoción de arena y sedimentación cuyo objetivo es la remoción de aceites y grasas, sólidos suspendidos sedimentables y flotantes; de manera simultánea se remueve cerca del 30% de la DBO, 25% de nitrógeno Kjeldahl y fósforo total. Los coliformes fecales se reducen solamente en uno o dos órdenes de magnitud, si se requiere que el efluente sea apto para uso agrícola éstos deben reducirse en cinco o seis órdenes de magnitud.

A.2.1 Sedimentación

Descripción de la tecnología

✓ Principio de operación.

Los sedimentadores primarios generalmente se diseñan para tener un tiempo de retención hidráulico de 1 ½ a 2 ½ horas y una carga hidráulica de 32 a 50 m³/m²*d (0.37 y 0.58 mm/s). La carga hidráulica es el volumen del agua que pasará sobre la superficie horizontal del tanque en un día y este parámetro se equipara con la velocidad terminal de las partículas.

✓ Tipos o distintos arreglos.

Existen dos tipos básicos de sedimentadores: los circulares y los rectangulares. El principio de funcionamiento es el mismo, en ambas estructuras se crearán las condiciones para que las partículas se depositen en el fondo.

a) Sedimentadores rectangulares.

Los tanques rectangulares pueden ser implementados como una sola instalación o varias, con una pared en común entre todas ellas, lo que requiere de un área disponible menor.

b) Sedimentadores circulares.

Los equipos circulares son usados como sedimentadores primarios o secundarios y para el espesamiento de lodos. En este tipo de tanque el modelo de flujo es radial.

Cada uno de ellos utiliza algún método de recolección y extracción de lodos.



✓ **Esquema de proceso**

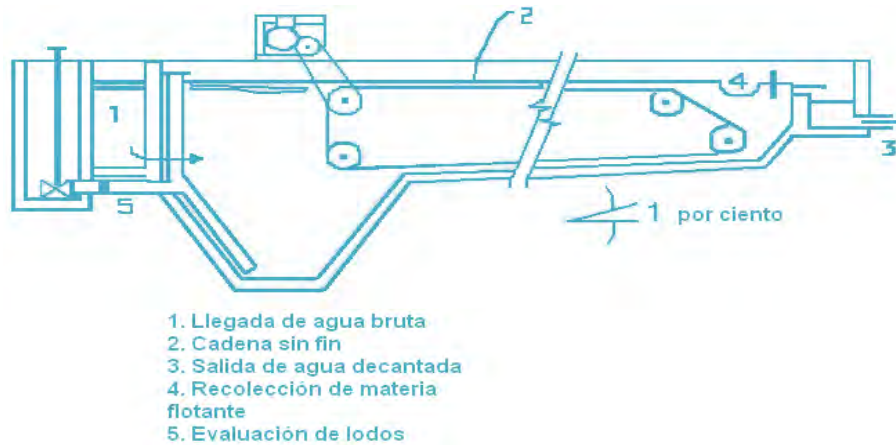


Figura 25. Esquema de un Sedimentador rectangular

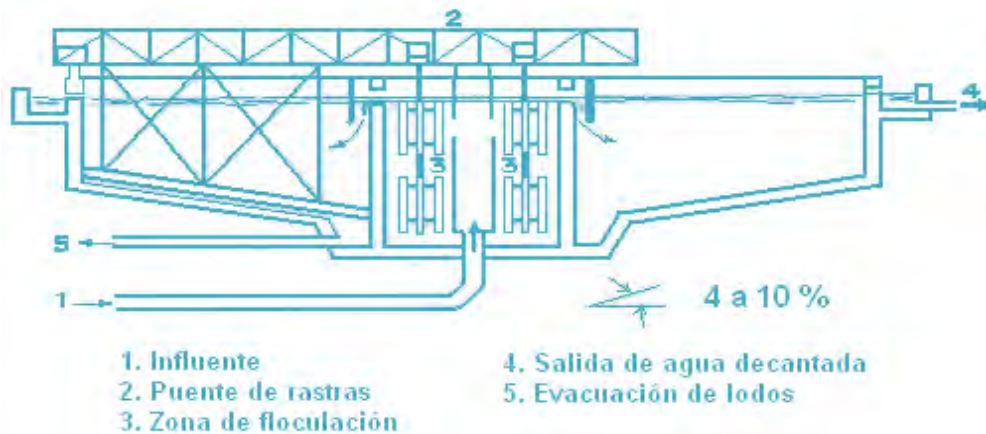


Figura 26. Esquema de un Sedimentador circular

Aplicación de la tecnología

✓ **Tipo de contaminantes removidos.**

Se remueven sólidos sedimentables, material flotante, crecimientos biológicos de reactores primarios y secundarios, floculados y sólidos precipitados químicamente.

✓ **Ventajas de su aplicación**

Las ventajas son la obtención de un efluente clarificado y de lodos con una concentración de sólidos más fácilmente manejable en el proceso general de la planta de aguas residuales.

Limitantes para su aplicación

✓ **Clima**



Debe considerarse la temperatura ya que influye en la viscosidad del agua y por tanto afecta directamente la eficiencia del sedimentador.

✓ **Condiciones geográficas**

El viento es un factor a considerarse ya que se reduce la capacidad volumétrica.

✓ **Otros**

Los parámetros de diseño, profundidad, área, tiempo de retención, etc.

Generación de residuos

✓ **Características de los residuos generados**

Los residuos de este proceso son efluentes clarificados, lodos activados y espumas.

✓ **Cantidad de residuos generados**

La cantidad depende de los detalles del proceso como el flujo del afluente o su velocidad.

Insumos requeridos

✓ **Energía**

Se requiere de energía para los equipos de recolección y extracción de lodos y espumas.

✓ **Reactivos químicos**

Depende del tipo de sedimentación por ejemplo se puede añadir algún tipo de polímero para promover el asentamiento.

Operación y mantenimiento

El mantenimiento no es caro, ni muy complejo en todo caso los equipos anexos son los que lo necesitarían, recolectores de lodos, bombas, etc. Pero el manual de usuario de dichos equipos proporcionará las medidas requeridas.

A.2.2 Coagulación/Floculación

Descripción de la tecnología

Es la neutralización iónica de los sólidos suspendidos utilizando compuestos químicos con el objetivo de aglomerarlos y obtener una mejor clarificación del agua.

✓ **Representación esquemática**



Figura 27. Esquema de la remoción de contaminantes mediante la dosificación de agentes coagulantes.

Aplicación de la tecnología



✓ **Tipo de contaminantes removidos**

- ✓ Se remueven partículas con un tamaño entre 0.01 y 1µm. **Ventajas de su aplicación**

La eficiencia del proceso depende del pH del agua residual a partir de éste se podemos seleccionar el coagulante que convenga más.

La ventaja que tiene el proceso es una mejor clarificación del agua al aumentar la velocidad de sedimentación de las partículas.

Limitantes para su aplicación

✓ **Condiciones geográficas**

La zona geográfica afecta directamente las características del agua que se tratará, y por tanto afectará también su pH, que es un factor determinante en la selección de los coagulantes.

Las temperaturas bajas reducen la eficiencia.

Generación de residuos

✓ **Características de los residuos generados**

El lodo generado tiende a hacerse más espeso sin embargo si se diseña bien el proceso puede ser tratado fácilmente; también si la clarificación no es buena pueden provocar que el agua contenga compuestos metálicos como el manganeso que pueden llegar a depositarse en las tuberías o equipos posteriores lo que puede afectar al proceso y al equipo.

Insumos requeridos

✓ **Energía**

Se requiere equipo (por tanto energía) para llevar a cabo la coagulación/floculación que deberá ser diseñado dependiendo de los resultados de las pruebas de jarras.

✓ **Reactivos químicos**

Se requiere de:

- Sales de Fe^{3+} como Cl_3Fe o $Fe_2(SO_4)_3$
- Sales de Al^{3+} normalmente es $Al_2(SO_4)_3$ o Policloruro de aluminio.
- Polielectrólitos, que son polímeros orgánicos naturales o sintéticos, no iónicos (poliacrilamidas) aniónicos (ácidos poliacrílicos) o catiónicos (polivinilaminas).

Operación y mantenimiento

✓ **Consideraciones especiales para el mantenimiento**

Cuidar que no se obstruyan los orificios de las tuberías por donde pasa los coagulantes y agregarlos en el momento de mayor turbulencia. Lubricar partes mecánicas, limpieza periódica de la unidad (debe vaciarse), verificar la formación de flóculos, verificar las “zonas muertas” del agua para evitar incrustaciones, verificar si hay un exceso en la velocidad del agua ya que pueden romperse los flóculos.



A.2.3 Flotación

Descripción de la tecnología

Es la separación de las partículas sólidas presentes en una fase líquida, introduciendo a dicha fase burbujas diminutas de un gas, normalmente aire. En general los sólidos cuando tienen una densidad relativamente baja y son finos, pueden ser separados también como espuma o materia flotante. Para ello, se agrega aire al agua con materia en suspensión para provocar que las burbujas de aire se adhieran al sólido y se eleven a la superficie.

✓ **Tipos o distintos arreglos.**

Para crear las burbujas microscópicas (diámetros menores a 100 nm) se utilizan dos procedimientos:

- Agua de dispersión. El agua se satura de aire en un tanque de alta presión (de 4 a 7 kg/cm²), posteriormente la mezcla se inyecta en el tanque de flotación, que está a presión atmosférica. El aire se desprende de la mezcla formando burbujas diminutas que se adhieren a la materia en suspensión. El agua de dispersión que normalmente oscila de 5 a 15% del volumen del agua tratada en la flotación por aire disuelto, es suficiente para remover en forma efectiva sólidos suspendidos con concentraciones de 400 a 500 mg/L. si la concentración de sólidos es mayor se tiene que aumentar la cantidad de burbujas mediante el aumento en el agua de dispersión.
- Inyección de agua a presión. En la succión de la bomba centrífuga que se usa para elevar el agua en la flotación por aire disuelto. Con este método, toda el agua que se tratará con la flotación por aire disuelto se presuriza a razón de 4 a 3 kilogramos por centímetro cuadrado.

Ambos procedimientos tienen costos semejantes.

- Inyección directa. El aire o gas que se utiliza se agrega directamente al agua a través de difusores. Esta modalidad no ofrece buenos resultados para remover materia en suspensión; sin embargo, si el desecho está en forma de espuma se pueden lograr mejores resultados.
- Flotación al vacío. El agua se satura con aire a presión atmosférica y después el agua residual saturada entra en un tanque al vacío en donde el aire se libera y eleva los sólidos suspendidos. Es menos frecuente la flotación por aire disuelto.

✓ **Esquema de proceso**

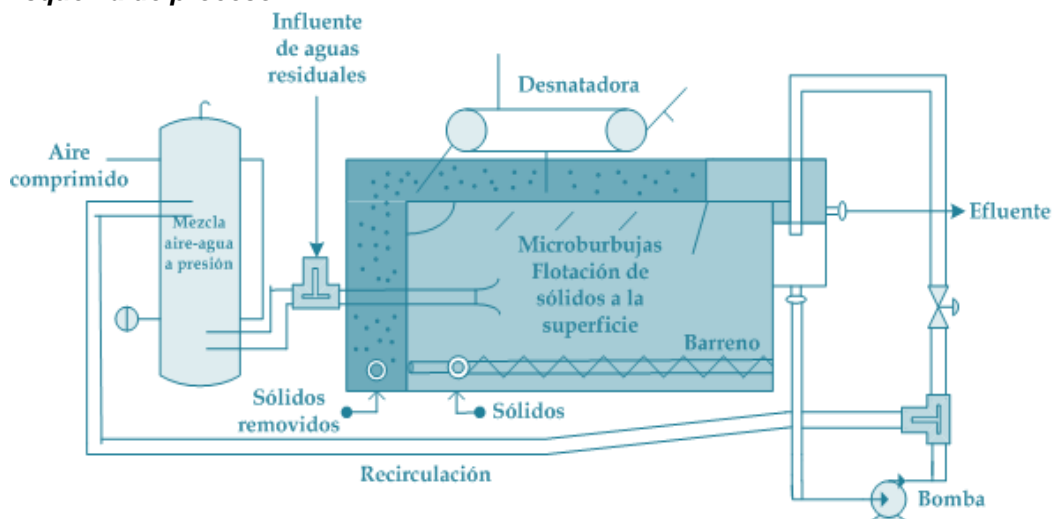


Figura 28. Esquema de la separación de contaminantes por flotación

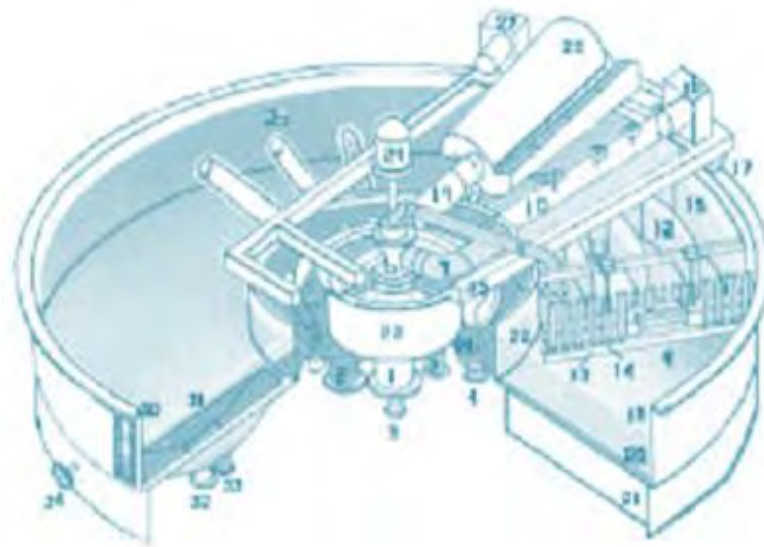


Figura 29. Flotador por aire disuelto (DAF).

Aplicación de la tecnología

✓ Tipo de contaminantes removidos

Este método es muy aplicado para tratar las aguas residuales de industrias alimenticias, de lavado de autos, entre otras ya que se remueven principalmente sólidos suspendidos, aceites emulsificados, grasas y metales pesados como zinc, cromo, cadmio.

✓ Ventajas de su aplicación

Si se reduce la concentración de aceites y grasas a 2 mg/L de agua residual la eficiencia es bastante alta ya que puede llegar a obtenerse agua limpia. Otra manera de aumentar la eficiencia es realizar el proceso con ayuda de coagulantes, lo que mejora la clarificación. Entre las ventajas que presenta es que puede llevarse a cabo hasta en 15 minutos.

Este método de dispersión de agua se utiliza para tratar grandes volúmenes de agua (11).

Limitantes para su aplicación

✓ Disponibilidad de la tecnología.

Los costos de operación son altos debido a la compresión de aire requerida. Hay un parámetro llamado A/S¹ del cual depende el diseño del proceso ya que a partir de él se conocen las dimensiones, los flujos

¹ A/S es la relación entre el aire utilizado y los sólidos presentes en el agua residual; es un parámetro fundamentalmente utilizado. (10)



tanto de agua como de aire, la presión necesaria, entre otras; si este parámetro no se calcula correctamente la eficiencia de la remoción por flotación será baja (14).

Generación de residuos.

✓ Características de los residuos generados.

El principal producto generado se conoce como “nata” y son todos los materiales que se encuentran en la superficie del líquido, éstos deben removerse mecánicamente.

Insumos requeridos.

✓ Energía.

Se requiere energía y equipo para la compresión del aire, y para un equipo de remoción de la “nata” generada una vez que termina el proceso, en algunos casos se agrega una bomba para recirculación.

✓ Reactivos químicos.

Generalmente se requiere del uso de coagulantes y floculantes para ayudar a la formación de sólidos de mayor tamaño y que tengan la capacidad de atrapar el aire. Pueden utilizarse coagulantes como alúmina, cloruro férrico y polielectrólitos.

Operación y mantenimiento.

En la succión de la bomba centrífuga que se usa para elevar el agua en la flotación por aire disuelto, el aire se presuriza a razón de 3 a 4 kilogramos por centímetro cuadrado. Las consideraciones respecto al mantenimiento son similares a las mencionadas en los procesos previos, por ejemplo hay partes mecánicas que necesitan ser lubricadas como el removedor de nata, la limpieza del contenedor, el mantenimiento general de una bomba, y del sistema de compresión de aire.

A.2.4 Tratamiento primario avanzado.

Descripción de la tecnología.

Es conocido como tratamiento fisicoquímico en la etapa primaria, es un sistema en el cual se agregan sales metálicas y/o polímeros al agua residual cruda para provocar que las partículas en suspensión se desestabilicen, entren en contacto entre si y, de esta forma, aumenten su tamaño para que sean fácilmente removidas a través de sedimentadores o sistema de flotación por aire disuelto.

✓ Tipos o distintos arreglos.

Las configuraciones más frecuentes de los sistemas fisicoquímicos son tres:

El tratamiento primario avanzado, el tratamiento químico primario y el tratamiento químico secundario (este se lleva a cabo en la etapa secundaria). La Figura 29 esquematiza los diferentes tipos de trenes de tratamiento.

Se observa que en cualquiera de las modalidades es necesario que exista un dispositivo que permita hacer la mezcla rápida del coagulante. Puede tratarse de un canal Parshall, de un desarenador aireado, de un mezclador estático en línea (para conductos cerrados) o un tanque de mezclado. Se deberá contar con un dispositivo que dosifique el polímero al agua.

El tratamiento primario avanzado, normalmente, es una adecuación que se hace a un sedimentador primario para aumentar la eficiencia del sistema.



El tratamiento fisicoquímico primario tiene generalmente un tanque para la floculación y un sedimentador o un sistema de flotación por aire disuelto.

✓ **Esquema de proceso**

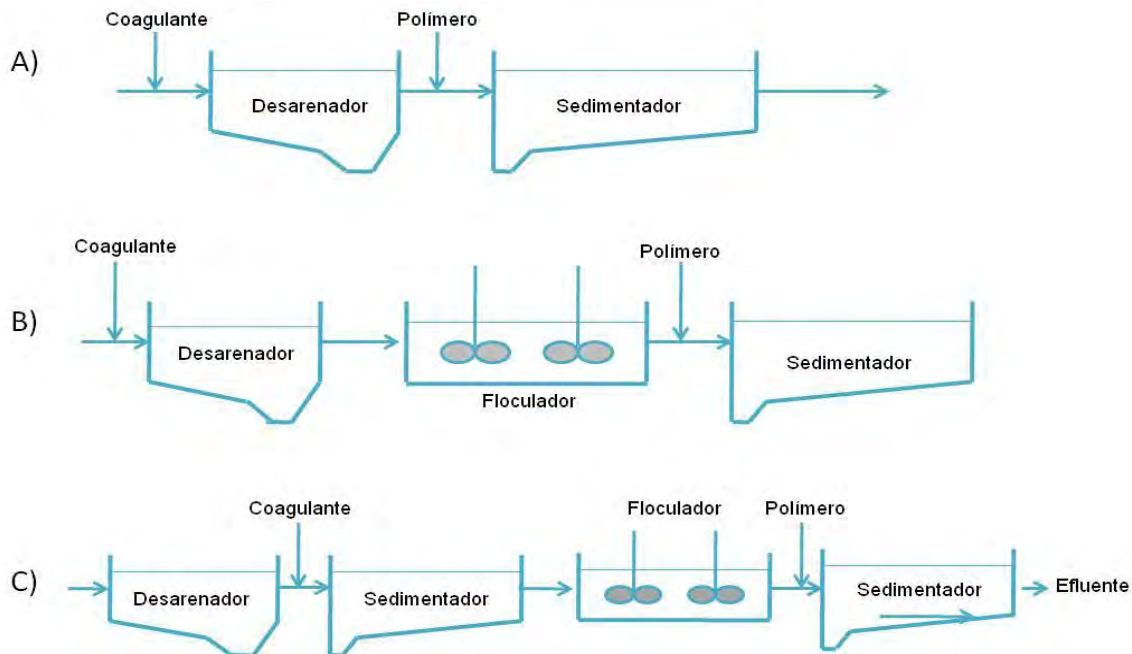


Figura 30. Variantes del tratamiento fisicoquímico de las aguas residuales.

Aplicación de la tecnología.

✓ **Tipo de contaminantes removidos.**

Las partículas de menor tamaño pueden ser removidas mediante un tratamiento fisicoquímico y su tamaño está entre 0.08 y 0.1 mm y hasta el 75% de la materia orgánica. Estos niveles de remoción sólo se alcanzan en condiciones muy específicas, por ejemplo, en lugares donde el alcantarillado es relativamente corto y la temperatura media del agua residual es baja.

✓ **Ventajas de su aplicación.**

- La potencialidad del tratamiento fisicoquímico se basa en el hecho de que gran parte de los contaminantes en las aguas residuales municipales están en forma suspendida o coloidal.
- Mediante la aplicación del tratamiento fisicoquímico se logra aumentar la remoción de sólidos suspendidos y de DBO en las instalaciones de sedimentación primaria o de flotación y sin la intervención de procesos biológicos.
- Se acondiciona el agua residual que contiene desechos tóxicos o no biodegradables.
- Aumenta la eficiencia del sedimentador biológico.
- Se emplea como pretratamiento de agua con el fin de aumentar la eficiencia de los procesos subsiguientes.
- Disminuye el contenido de fósforo en el agua.
- Permite el tratamiento de agua en climas muy fríos.



- Acondiciona el agua residual para riego.

Limitantes para su aplicación

Largos periodos de retención y temperaturas altas del agua residual pueden provocar la degradación de las partículas, ya sea por fuerzas de arrastre, solubilización e hidrólisis enzimática. Bajo estas últimas condiciones la fracción separable por coagulación floculación es menor (11).

Generación de residuos

✓ Características de los residuos generados

La producción de lodo primario aumenta en comparación con el lodo producido por el tratamiento primario convencional. Harleman (1992) calcula que usando cloruro férrico y un polielectrolito la producción de lodo del tratamiento primario avanzado es 64% más alta que en el tratamiento primario convencional. Es necesario tener en cuenta este incremento en la producción de lodo, ya que éste tiene que ser tratado. Este lodo que contiene sales metálicas, materia orgánica y polielectrolitos puede ser tratado con los mismos métodos que se utilizan para tratar los lodos de desecho de la sedimentación primaria y de los procesos biológicos.

Se puede decir que el efecto de las sustancias precipitantes de los lodos en la hidrólisis biológica es muy pequeño y de poca importancia práctica (11).

Insumos requeridos

✓ Energía

Tiene el mismo requerimiento energético que un sistema de sedimentación convencional. En algunos casos se requiere de un mezclador mecánico, aunque puede utilizarse uno estático.

✓ Reactivos químicos

Se suministran floculantes y coagulantes como sales metálicas y/o polímeros

Operación y mantenimiento

Para que el proceso sea eficiente, es necesario controlar tanto la mezcla rápida como la mezcla lenta. Estas dos variables se deben combinar para dar un resultado óptimo, formar un flóculo de buen tamaño, capaz de sedimentar, que minimice el consumo de reactivos y maximice la remoción de la materia particulada.

Otro factor que se debe controlar es el pH, ya que las sales metálicas utilizadas para la estabilización de las partículas actúan de forma más eficiente en ciertos intervalos de pH.

La forma más eficaz de controlar el proceso es a través del muestreo continuo y el análisis del efluente mediante la prueba de jarras.



A.3 Tratamientos secundarios

El tratamiento secundario tiene como objetivo eliminar la materia orgánica disuelta en las aguas residuales, para transformar la materia orgánica biodegradable (reduce DBO) y el nitrógeno Kjeldahl en dióxido de carbono, agua y nitratos se emplean millones de microorganismos. Los microorganismos encargados de esta transformación son bacterias que se desarrollan en un ambiente aerobio y/o anaerobio. Si el proceso requiere oxígeno es aerobio y generalmente este es suministrado por aeración mecánica. En aguas residuales con temperaturas relativamente elevadas se puede aplicar un proceso anaerobio, ya que se favorece la transformación de la materia orgánica en una mezcla de metano y dióxido de carbono (biogás).

Tanto en el tratamiento primario como en el secundario se generan lodos en un volumen menor al 0.5 % del flujo de agua residual tratada.

La clasificación de las tecnologías depende de los fenómenos naturales que se llevan a cabo en estos sistemas de tratamiento de agua residual para remover los contaminantes. Cuando tales procesos ocurren en ambientes controlados, en forma secuencial y a tasas aceleradas de reacción, se denominan sistemas mecanizados, por el contrario si los procesos de transformación ocurren en forma simultánea y con las velocidades de reacción normales, se dice que son sistemas no mecanizados o naturales de tratamiento (11). En la Tabla 42 se presenta la clasificación de las tecnologías de tratamiento biológico de acuerdo a lo mencionado anteriormente.

Tabla 42. Clasificación de las tecnologías de tratamiento secundario.

Método de conversión	Tecnología mecanizada	Tecnología no mecanizada
Aerobio	Lodos activados	Lagunas facultativas de estabilización
	Filtro percolador	Lagunas de estabilización
	Disco rotatorio	Acuicultura (p., ej., producción de algas, estanques para patos o peces)
	Lagunas aireadas	Construcción de humedales
Anaerobio	Reactor anaerobio de flujo ascendente (UASB)	Lagunas anaerobias
	Filtro anaerobio (de flujo ascendente)	

FUENTE: (2).

A.3.1 Lodos activados.

Descripción de la tecnología.



✓ **Principio de operación.**

Se introducen las aguas residuales a depurar, con materia orgánica biodegradable, en un reactor donde se mantiene, en suspensión, un cultivo bacteriano aerobio, el cual lleva a la biodegradación de la materia orgánica. El oxígeno que se necesita para crear el medio aerobio se aporta por medio de difusores o aireadores, que a su vez, sirven para mantener el líquido mezclado en un régimen de mezcla completa. La estabilidad del material orgánico que entra a un estanque aerobio se logra por las bacterias aerobias (8).

Los lodos activados en todas sus variantes son sistemas aerobios de biomasa en suspensión.

El proceso consta de cinco componentes básicos: el tanque de aeración, el sistema de aeración, el sedimentador secundario, la línea de recirculación y la línea de purga de lodos.

Todas las variantes cuentan con estos elementos excepto el proceso por lotes que no tiene un tanque especial para la sedimentación, sino que ésta ocurre en el reactor.

Entre las variantes que se pueden encontrar en México están en el proceso convencional, aeración extendida, zanja de oxidación, aeración modificada, alimentación escalonada, contacto-estabilización, oxígeno puro, aeración a contracorriente y proceso por lotes.

✓ **Tipos o distintos arreglos.**

Reactor de lodos activados convencional es un sistema de lodos activados en el cual se realiza la homogenización de caudales de entrada en un tanque y posteriormente se lleva a un reactor biológico en el que se remueven los componentes indeseables para después pasar el efluente a un sedimentador secundario donde se remueve el resto de materia indeseable. Existen variaciones en el proceso de lodos activados básicamente son las siguientes:

Estabilización por contacto: En este sistema el agua residual y el lodo activado son mezclados brevemente (20 - 30 minutos), tiempo necesario para que los microorganismos adsorban los contaminantes orgánicos en solución. El licor mezclado es sedimentado y derivado a otro tanque de aeración por un periodo de 2 a 3 horas para luego ser mezclado con el afluente ingresando al primer tanque de aireación.

Aireación por etapas: Esta modificación consiste en que el flujo de agua residual es introducido al tanque aireador por varios puntos. En los puntos de alimentación se esparce la demanda de oxígeno en el aireador resultando en una mayor eficiencia en el uso del oxígeno.

Aireación extendida: Su diagrama de flujo es esencialmente el mismo que un sistema de mezcla completa excepto que no tiene sedimentador primario. El tiempo de retención hidráulico varía de 18 a 36 horas. Este periodo de aeración permite que la carga orgánica de las aguas residuales sean digeridas y adicionalmente el lodo sea parcialmente digerido en el tanque aireador, permitiendo su disposición sin ser necesaria una gran capacidad de digestión. Una variación del sistema de aeración extendida es la llamada zanja de oxidación (14).



➤ **Esquema de proceso.**

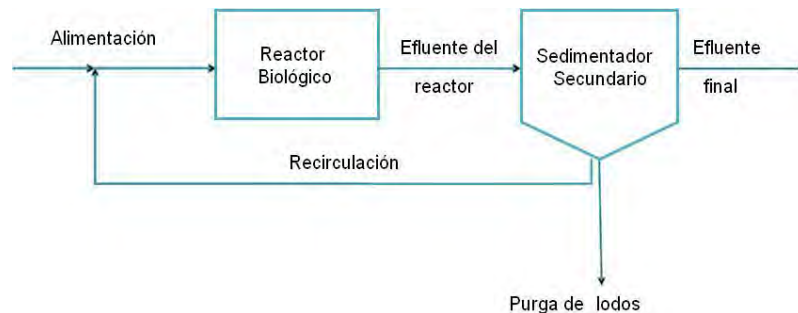


Figura 31. Esquema del proceso de lodos activados.

Aplicación de la tecnología.

✓ ***Tipo de contaminantes removidos.***

En este proceso se remueve principalmente la materia orgánica disuelta en el agua cruda de entrada disminuyendo considerablemente la DBO.

✓ ***Eficiencia de remoción.***

En general el rendimiento de eliminación de los componentes contaminantes mediante el tratamiento con lodos activados es de:

Tabla 43. Rendimiento de eliminación del constituyente para lodos activados.

Tratamiento	Rendimiento de eliminación del constituyente, porcentaje					
	DBO ₅	DQO	SS	P	N-Org	NH ₃ -N
Lodos Activados	85-95	80-85	80-90	10-25	15-50	8-15

FUENTE: Metcalf & Eddy. 1996

✓ ***Ventajas de su aplicación.***

- Baja generación de malos olores.
- Es un sistema que permite controlar diferentes calidades del afluente
- Las variables de operación son conocidas y controlables.
- Requieren de áreas moderadamente pequeñas.
- Requiere de infraestructura adicional de sedimentación.

Limitantes para su aplicación.

Los factores que afectan el proceso son varios, por lo que se debe tener un control de las siguientes variables:

- Tipo de reactor.
- Tiempo de retención hidráulica.
- Carga hidráulica.
- Carga orgánica.



5. Capacidad de Aeración.
6. Tiempo medio de retención celular.
7. Relación alimento/microorganismo.
8. Relación de recirculación de fango.
9. Factores ambientales (temperatura, humedad, etc.).

Generación de residuos.

Las plantas de tratamiento de agua producen varias corrientes de desecho (residuales que se pueden dividir, en cinco categorías generales.

1. Lodo sedimentado formado durante la eliminación de turbiedad mediante sales de aluminio o hierro.
2. Agua para retro-lavado del filtro de los sólidos que contiene.
3. Lodos de ablandamiento.
4. Corrientes contaminantes de aire generado en los procesos de Aeración

Los residuos generados son denominados lodos activos que son masa microbiana activa.

Insumos requeridos.

En este proceso se consumen alrededor de 9 kWh/cápita (Ramalho, 1996).

Se requiere sembrar un cultivo de microorganismos que serán los encargados de eliminar la materia orgánica de las aguas residuales.

Operación y mantenimiento.

Se deben controlar algunas condiciones de operación, poniendo especial atención en mantener los niveles de oxígeno disuelto en el tanque de aeración. Se debe regular la cantidad de lodos retornados, controlar los la cantidad de lodos purgados.

A.3.2 Zanjas de oxidación.

Descripción de la tecnología.

✓ Principio de operación.

Las zanjas de oxidación son una modificación del sistema biológico de lodos activados convencional en el cual se utiliza un tiempo extenso de retención de sólidos con la finalidad de remover los compuestos orgánicos biodegradables. Estos sistemas funcionan normalmente en un régimen de mezcla completa, pero en algunas ocasiones pueden ser modificados para simular las condiciones de flujo pistón. Tienen una configuración de anillo, óvalo o tanque en forma de herradura dentro de los cuales se encuentran uno o múltiples canales. Por esta razón las zanjas de oxidación también se conocen como reactores de tipo carrusel. Además, cuentan con aireadores montados en forma vertical u horizontal que permiten la circulación del agua, la transferencia de oxígeno y la aireación en el sistema completo (12).

Previo a utilizar estos sistemas es necesario realizar un pretratamiento al agua residual (cribado y desarenado). Asimismo, en algunas ocasiones se incluye un sistema de sedimentación primaria antes de las zanjas de oxidación. Sin embargo, este no es el diseño típico. Una vez realizado el tratamiento, el



efluente de las zanjas de oxidación es clarificado en un sedimentador secundario. Finalmente, se utiliza un sistema de filtración y desinfección para cumplir con los requerimientos de descarga (23).

✓ **Tipos o distintos arreglos.**

Varios fabricantes han desarrollado modificaciones al diseño de las zanjas de oxidación para la remoción de nutrientes en condiciones de reciclado o en fases entre los estados anóxico y aerobio. Mientras que los mecanismos de operación difieren de un fabricante a otro. En general el proceso consiste de dos tanques separados de aeración, el primero anóxico el segundo aerobio.

✓ **Esquema del proceso**

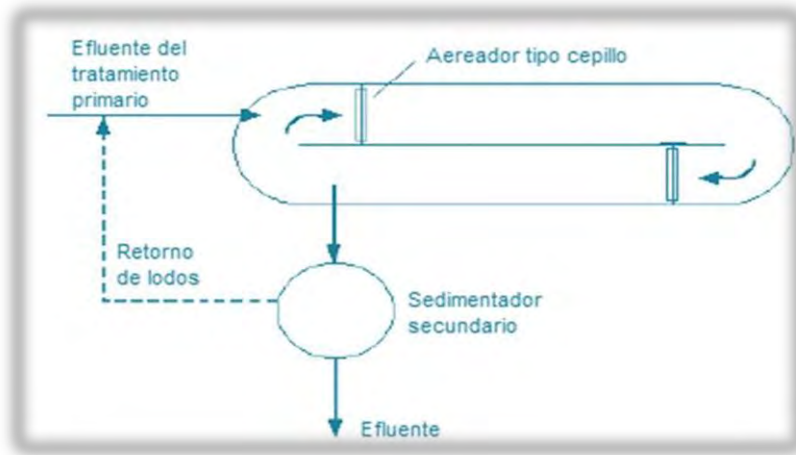


Figura 32. Esquema del proceso de lodos activados (zanjas de oxidación).

Figura 33.

Aplicación de la tecnología.

✓ **Tipo de contaminantes removidos.**

Tabla 44. Eficiencia de remoción de zanjas de oxidación.

Constituyente	Promedio mensual del afluente (mg/L)	Promedio mensual del efluente (mg/L)	Porcentaje de remoción (%)
DBO ₅	226	8.86	96
SST	207	5.23	97
N total	34.5	1.99	94

FUENTE: Zanjas de Oxidación, EPA 1999.

✓ **Ventajas de su aplicación.**

La principal ventaja de las zanjas de oxidación es su capacidad de lograr los objetivos de remoción de contaminantes con requerimientos operacionales reducidos y a bajos costos de operación y mantenimiento.

Ventajas específicas:



- Tienen un nivel mayor de confiabilidad y desempeño con relación a otros procesos biológicos debido a que el nivel constante de agua y la descarga continua reducen la tasa de desborde del vertedero y eliminan la sobrecarga periódica de efluente.
- El tiempo extendido de retención hidráulica y la mezcla completa minimizan el impacto el impacto de cargas contaminantes extremadamente altas o de sobrecargas hidráulicas.
- Produce menos lodos que otros sistemas debido a la extensa actividad biológica durante el proceso de lodos activados.
- La eficiencia de operación en cuanto al uso de energía da como resultado la reducción de consumo de electricidad en relación con otros procesos biológicos de tratamiento.
- Son fácilmente adaptables para la nitrificación y desnitrificación.

Limitantes para su aplicación.

Las concentraciones de sólidos suspendidos en el efluente son relativamente altas en comparación con otras modificaciones del proceso de lodos activados.

Requiere de una superficie de terreno más grande que otras opciones de tratamiento con lodos activados. Esto puede ser muy costoso, restringiendo la factibilidad de uso de las zanjas de oxidación en áreas en donde el costo de la adquisición de terrenos es relativamente alto.

Generación de residuos .

Se generan lodos primarios si la planta tiene sedimentadores primarios antes de las zanjas de oxidación. La producción de lodos en las zanjas por los procesos de oxidación va de 0.2 a 0.85 kg de SST por cada kg de DBO aplicado. La generación típica de lodos es de 0.65 kg de SST por kg de DBO aplicado. Estos valores son menores que los de instalaciones convencionales de lodos activados debido al tiempo de extendido de los sólidos.

Insumos requeridos.

Las necesidades de energía son bajas. La mayoría de las aplicaciones no requieren compuestos químicos, pero se pueden añadir sales metálicas para mejorar la remoción del fósforo.

Operación y mantenimiento.

El mantenimiento que requieren es relativamente reducido en comparación con otros procesos de tratamiento secundario.

El control por parte de los operadores es mínimo.

A.3.3 Reactores de lecho móvil.

Descripción de la tecnología.

Este tipo de reactores están rellenos con empaques de diferentes materiales sintéticos los cuales pueden estar suspendidos en el licor mezclado o estar fijos en el tanque de aireación del proceso de lodos activados. Puede considerarse como una variante del proceso de lodos activados convencional por lo que se le conoce también como “proceso de lodos activados con biopelícula fija integrada”.



El medio sólido que se utiliza como soporte, está dispuesto dentro de un depósito, a través del cual percola el agua residual y en donde el aire circula libremente a través de los espacios porosos. La biodegradación se produce al hacer circular libremente el agua residual y el aire en contracorriente. La circulación del aire se puede realizar en forma natural o forzada.

Las superficies mojadas del medio sólido de relleno desarrollan una película microbiana, que en general tiene un espesor menor de 3 mm, ya que con espesores mayores no se puede asegurar la incorporación del oxígeno. El agua residual escurre por la superficie del relleno en una delgada capa que está en contacto por un lado con la película microbiana y por otro, con el aire que ocupa los espacios que ha dejado el relleno.

El oxígeno aportado por el aire disuelto en el agua residual a depurar en movimiento, es transferido desde la capa líquida a la película microbiana, donde los nutrientes que trae consigo el agua residual se difunden hacia el interior de la película biológica para ser metabolizados por la población microbiana.

La principal diferencia que se presenta en los diferentes arreglos es el tipo de empaque y el material utilizado para su fabricación. Los tipos de relleno se clasifican en dos grupos:

1. Medios minerales o convencionales.
2. Medios especialmente fabricados, generalmente plásticos, que a menudo se suelen llamar de alta carga.

✓ **Esquema de proceso**

La Figura 32 muestra el diagrama de proceso de un reactor de lecho empacado, mientras que en la Figura 33 se muestran algunos empaques usados en los reactores.

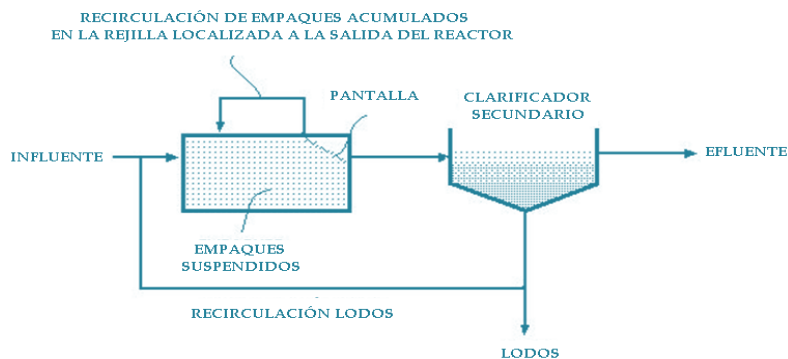


Figura 34. Proceso de lodos activados con biopelícula integrada



Figura 35. Materiales de soporte o empaques empleados en sistemas de lecho empacado (Aqwise, año).



Aplicación de la tecnología.

Existen dos aplicaciones principales para las cuales se emplean los sistemas de lecho empacado. La primera de ellas y la más común es para la remoción de DBO (demanda bioquímica de oxígeno) acompañada por la nitrificación y desnitrificación de la corriente de agua residual. Para lograr este fin los sistemas son diseñados en varias etapas y corresponden a reactores de tipo anóxico aerobio. Si además se requiere la remoción de fósforo, ésta es llevada a cabo al adicionar químicos después del reactor de lecho empacado.

✓ Ventajas de su aplicación

Una de las ventajas de los reactores de lecho empacado en comparación con otros sistemas, es que:

- Sólo se consume energía en la transferencia del agua residual al reactor biológico y en la recirculación.
- Mejoran la capacidad y la calidad del efluente
- Se pueden obtener remociones eficientes de nutrientes
- Mejoran el índice volumétrico de lodos (IVL) logrando la obtención de una mayor reducción de sólidos y carga en el sedimentador secundario
- Se tiene una producción baja de lodos.

Limitantes para su aplicación.

Dentro de sus limitantes se puede mencionar que:

- Es indispensable que el material de empaque tenga una alta relación superficie a peso, con una buena superficie porosa (o de libre paso en el caso de materiales plásticos) para permitir el paso del aire.
- Debe ser resistente al clima y no sufrir daño o desintegración por su exposición al agua, aire, frío, o a los organismos biológicos que crecen en su superficie.

Generación de residuos.

Los residuos generados son materia orgánica compuesta por microorganismos activos.

Insumos requeridos.

Los requerimientos de energía son bajos ya que en la mayoría de los casos la aireación es por medios naturales.

En cuanto a reactivos, sólo se requiere de la adición de químicos cuando se desea remover fósforo.

Operación y mantenimiento.

Su correcto funcionamiento depende del diseño (que en todo caso es siempre empírico), del material de relleno y de las condiciones externas, pudiendo únicamente controlar las condiciones externas así como la recirculación.



La presencia del material de empaque en los reactores de aireación, puede requerir drenaje periódico de los tanques y remoción de los empaques para su limpieza.

A.3.4 Filtros percoladores.

Descripción de la tecnología.

✓ Principio de operación.

Son sistemas de tratamiento aerobio que remueven principalmente la materia orgánica de las aguas residuales, mediante microorganismos. Generalmente son de forma circular aunque en la práctica también se pueden encontrar rectangulares, hexagonales y octogonales; contienen un lecho empacado, el empaque descansa sobre un bajodren que permite el paso del agua hacia los canales colectores. El agua residual se distribuye mediante brazos giratorios, escurre por la película biológica y ocurre una adsorción y asimilación biológica de la materia contaminante.

La película biológica va engrosándose y llega un momento en que se desprende del soporte, esta película se separa del efluente en el sedimentador secundario.

El medio de soporte puede ser natural, tal como piedras de río o plástico.

✓ Tipos o distintos arreglos.

Es frecuente que los filtros percoladores se instalen en serie para lograr una buena remoción de materia carbonácea y también la nitrificación del efluente. Las disposiciones más comunes para los sistemas de filtros percoladores son las siguientes:

- 1. Sistema de filtro único.** Puede trabajar con o sin reciclado del efluente. El reciclado del efluente está indicado para obtener una calidad mayor. Si la DBO es mayor de 500 mg/L el reciclado resulta recomendable.
- 2. Filtración doble alternativa.** El primer filtro es responsable de la mayor parte de la eliminación de la DBO, el segundo mejora la calidad del efluente, en consecuencia la mayor parte del crecimiento de limo sucede en el primer filtro. Por este sistema se obtiene una calidad mayor que empleando un filtro único.
- 3. Filtración en dos etapas.** El primer filtro es grueso, relleno generalmente con un material sintético cuya función es separar los contaminantes.

Tipos de filtros.

Existen diferentes tipos de filtros los cuales son diseñados para remover diferentes cargas de DBO según el contenido de materia orgánica en el agua residual.

1. Filtros de tasa baja.
2. Filtros de tasa intermedia.
3. Filtros de tasa alta.
4. Filtros de desbaste.

✓ Esquema de proceso

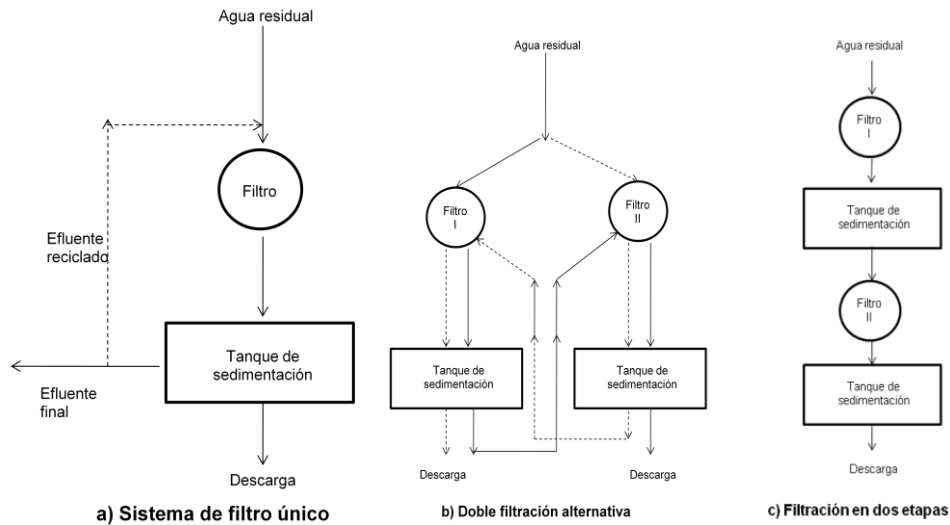
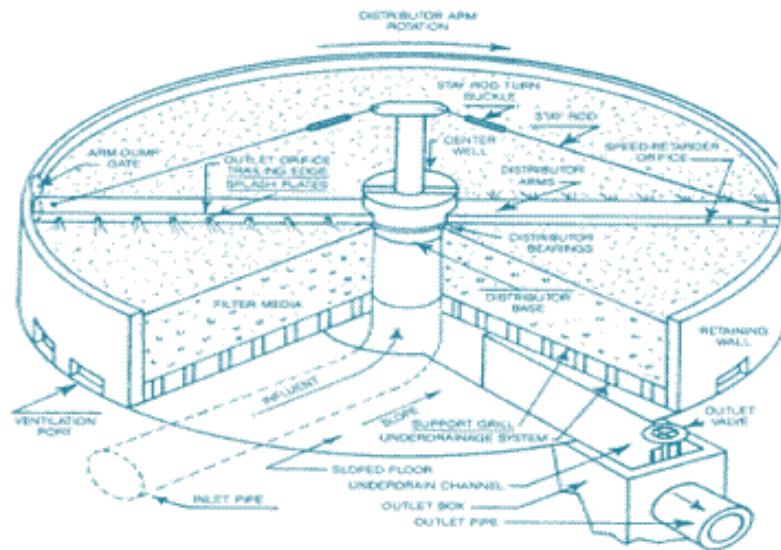


Figura 36. Sistemas más comunes de filtros percoladores(14).



FUENTE: Metclaf & Eddy (2003).

Figura 37. Filtro percolador típico.

Aplicación de la tecnología.

✓ **Tipo de contaminantes removidos.**

Remueve la materia orgánica presente en las aguas residuales y en algunos casos también se utilizan para llevar a cabo procesos de nitrificación.



✓ **Eficiencia de remoción.**

Tabla 45. Eficiencia de remoción de los filtros percoladores(7).

Tratamiento	Rendimiento de eliminación del contaminante, porcentaje.					
	DBO	DQO	SS	P ^b	N-Org ^c	NH ₃ -N
Filtros percoladores	65-80	60-80	60-85	8-12	15-50	8-15

Tabla 46. Tasas de remoción de DBO₅ para los tipos de filtros(24).

Tipo de filtro	Remoción de DBO ₅ , porcentaje
Filtro de Tasa baja	80-90
Filtro de Tasa intermedia	50-70
Filtro de Tasa alta	65-85
Filtro de desbaste	40-65

✓ **Ventajas de su aplicación.**

- Los filtros percoladores no necesitan energía para la aeración.
- Son de operación sencilla.
- Respuesta lenta y recuperación más rápida de los cambios bruscos de la DBO.
- La nitrificación es casi total.
- Puede lograrse una desinfección excelente si se dimensiona correctamente.
- Son menos sensibles a la presencia de sustancias tóxicas en el afluente.
- *Son apropiados para comunidades pequeñas y medianas.*

La ventaja de los filtros percoladores en relación con otros sistemas, es que sólo se consume energía en la transferencia del agua residual al reactor biológico y en la recirculación.

Limitantes para su aplicación.

✓ **Factores que afectan el proceso y se deben controlar:**

1. Tipo y profundidad del medio filtrante.
2. Carga hidráulica.
3. Carga orgánica.
4. Ventilación.
5. Disposición por etapas.
6. Caudal de recirculación.
7. Distribución del caudal.

✓ **Limitantes para su aplicación.**

- Necesidades de terreno más grandes que los sistemas convencionales.
- Necesita de una sedimentación primaria eficaz.
- Adaptación limitada a las sobrecargas hidráulicas.
- Se requiere de un tratamiento adicional para cumplir con los estándares de calidad de agua.
- Si se generan excesos de biomasa que disminuyen la eficiencia del proceso.
- Se generan olores desagradables.



- Se considera que una desventaja es la presencia de una pequeña película líquida de gran superficie sobre la zona húmeda de los discos expuesta al aire ambiente, lo que lleva al peligro de congelación en el caso de climas fríos. En tales casos las unidades de tratamiento deben alojarse en un edificio cerrado lo que incrementa el costo del tratamiento.
- Indispensable el control de los periodos de reposo y alimentación.

Generación de residuos.

Se genera biomasa.

Insumos requeridos.

Los requerimientos de energía para la operación son bajos.

Reactivos químicos:

Se requieren aditivos para ajustar el pH mediante neutralización hasta un valor óptimo entre 7 y 9, debido a que el exceso de alcalinidad o acidez perturba el proceso biológico.

Operación y mantenimiento.

La velocidad de giro de los brazos distribuidores de agua va de 0.3 a 5 vueltas por minuto, dependiendo de la carga superficial.

En general los filtros percoladores operan a tiempos de residencia hidráulica muy bajos, es decir, menos de una hora.

Consideraciones especiales para el mantenimiento.

1. La inyección del agua residual debe ser lo más uniformemente posible a fin de evitar atascos y paradas inoportunas para el buen funcionamiento del lecho. Para ello se utilizan los aspersores, que pueden ser fijos o móviles.
2. El agua residual debe haber sido sometida previamente a un proceso de sedimentación antes de entrar al reactor, lo que permite aprovechar al máximo su capacidad.
3. Se deberán realizar los análisis al agua correspondientes, y comprobar si estos resultados están dentro de las variaciones normales que se pueden presentar en un filtro percolador o muy próximas a ellas. Caso contrario, puede haber problemas de funcionamiento.
4. Necesita poco personal de mantenimiento. Aplicación simple.

A.3.5 Humedales.

Descripción de la tecnología.

Los humedales son zonas que se encuentran inundadas temporal o periódicamente. Permiten el tratamiento de aguas residuales con bajas cargas de materia orgánica por lo que son ampliamente utilizados en aguas residuales de tipo doméstico. Sus componentes principales son: Un soporte o material de empaque, las plantas y los microorganismos. Los procesos de remoción se pueden llevar a cabo por medios físicos, químicos y biológicos. Dentro de los procesos biológicos los microorganismos y las plantas tienen una función importante para la remoción de los contaminantes sobre todo para la remoción de materia orgánica. Esto se debe a las características especiales que tienen las plantas de los



humedales tales como cañas y juncos que transfieren sustanciales cantidades de oxígeno atmosférico a través de su raíces, promoviendo una extraordinaria cantidad y diversidad de especies de microorganismos que prosperan en el suelo alrededor de las mismas (25), (26) y (7).

Los humedales pueden clasificarse como humedales naturales y humedales artificiales. A su vez, los humedales artificiales se clasifican en superficiales o subsuperficiales, dependiendo de los niveles de agua que se manejan en ellos. En los humedales de tipo superficial el nivel de agua se encuentra por arriba de la superficie del soporte, mientras que en los humedales de tipo subsuperficial el nivel del agua se encuentra por debajo de éste, evitando con ello la proliferación de mosquitos (27).

La Figura 36 muestra un diagrama representativo de los diferentes arreglos para humedales.

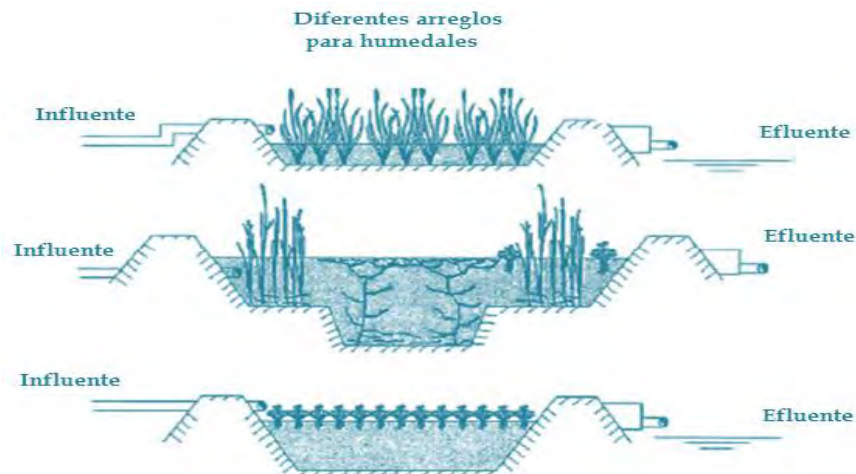


Figura 38. Diferentes arreglos de humedales. De arriba hacia abajo, humedales de tipo superficial, subsuperficial y flotantes(17).

El diagrama de flujo del proceso completo a utilizar incluyendo los humedales se muestra en la Figura 37.

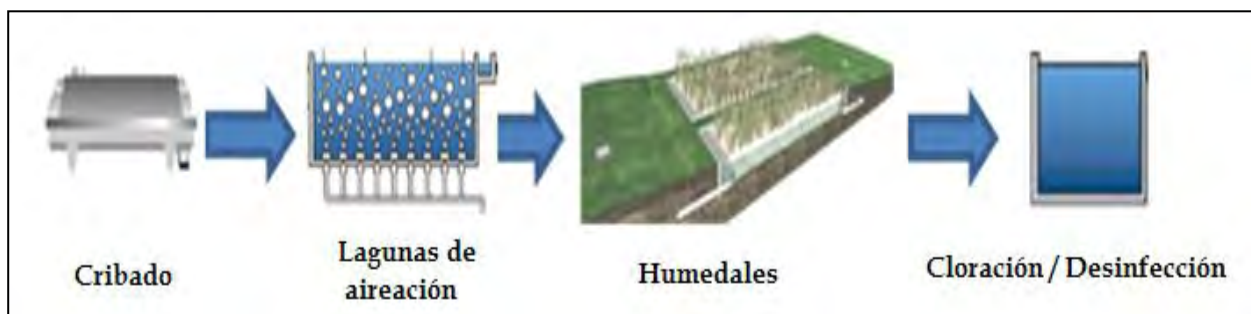


Figura 39. Esquema de proceso que incluye el uso de humedales(23).

Aplicación de la tecnología.

Los principales contaminantes que se remueven en estos sistemas son los siguientes: se remueve en forma confiable la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y demanda química de oxígeno (DQO), además de los sólidos suspendidos. También se pueden producir bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo con tiempos de retención suficientemente largos (siendo mejor la remoción de nitrógeno), pueden



removerse algunos metales eficazmente y reducirse en un orden de magnitud los coliformes fecales (25),(26).

✓ ***Ventajas de su aplicación.***

- Se integran al paisaje natural mejorando las condiciones del mismo.
- Es una tecnología económica, de fácil operación y mantenimiento.
- No producen malos olores.
- Proporcionan un tratamiento efectivo de manera pasiva.
- No producen biosólidos ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición.
- Se remueven los contaminantes de manera efectiva con tiempos de retención razonables, solamente en el caso de nitrógeno y fósforo los tiempos de retención hidráulica necesarios serán significativamente mayores.

Limitantes para la aplicación.

1. Los mecanismos de remoción de fósforo y nitrógeno en todos los tipos de humedales artificiales requerirán largos periodos de retención hidráulica y dimensiones mayores de los sistemas para lograr niveles bajos de ambos contaminantes en los efluentes (25),(26).
2. El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento, por lo que pueden acumularse con el tiempo.
3. La eficiencia de remoción puede verse afectada por el clima.
4. En algunas ocasiones no se cumplen los estándares de calidad de las descargas debido a la presencia de coliformes fecales haciendo necesario el implementar un proceso de desinfección posterior al tratamiento en los humedales.

Generación de residuos.

Los residuos que se pueden generar son principalmente restos de vegetación y cantidades muy bajas de lodos residuales. Sin embargo, estos pueden ayudar a mejorar las eficiencias de remoción de los contaminantes ya que ayudan al crecimiento de las plantas y microorganismos proporcionando los nutrientes que estos necesitan para su desarrollo y reproducción.

Operación y mantenimiento.

Para los humedales de tipo subsuperficial, en caso de que se requiera la remoción de nitrógeno y fósforo, será necesario incluir la instalación de tuberías de aireación en el fondo del lecho del sistema para la oxigenación mecánica; así como el uso de un filtro percolador integrado para la nitrificación del amoníaco en el agua residual.

Algunos puntos que se deben tomar en cuenta para su mantenimiento son los siguientes:

Se requiere control hidráulico y de profundidad del agua, la limpieza de las estructuras de entrada y descarga, la inspección del crecimiento y poda de las plantas, el control de mosquitos y vectores de enfermedades y el monitoreo rutinario. También será necesario el realizar ajustes periódicos en la profundidad del agua en el humedal(25), (26).



A.3.6 Reactor de lecho de lodos con flujo ascendente (UASB).

Descripción de la tecnología.

El influente es alimentado y homogéneamente distribuido por el fondo del reactor y asciende a través de una cama de lodos anaerobios, los cuales son expandidos por la velocidad ascendente del flujo. En la parte superior de la zona de digestión se encuentra el separador gas-sólido-líquido (GSL), el cual está constituido por mamparas deflectoras y campanas, con las cuales se separa y descarga el biogás generado y se previene el lavado de la biomasa activa. En la zona superior del separador GSL (zona de sedimentación) se pule el efluente por la sedimentación de la biomasa y sólidos que hayan logrado pasar a este nivel del reactor. Finalmente, el efluente es descargado en el nivel superficial del agua por medio de canaletas.

La Figura 38 muestra un diagrama representativo de las partes que conforman un reactor de lecho de lodos con flujo ascendente.

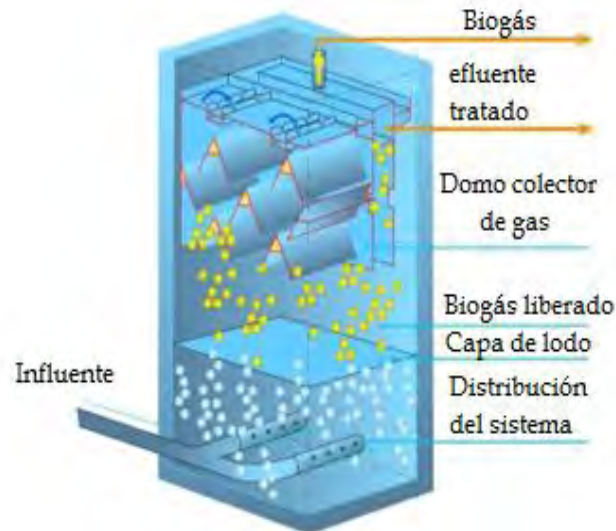


Figura 40. Partes constitutivas de un reactor UASB.

El diagrama del proceso completo a utilizar incluyendo al UASB se muestra en la Figura 39.



Figura 41. Esquema de proceso.



Aplicación de la tecnología.

Se pueden obtener buenas remociones de materia orgánica remanente medida como DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y DQO (demanda química de oxígeno), además de remover patógenos y huevos de helmintos (28).

✓ *Ventajas de su aplicación.*

- No requiere de ningún tipo de soporte para la retención de biomasa, ni agitación mecánica.
- Con un inóculo apropiado puede ponerse en marcha casi inmediatamente.
- Se obtienen buenas eficiencias de remoción de huevos de helminto (alrededor del 90%).
- La producción de lodos en exceso es baja.
- El lodo generado tiene muy buenas características de compactación y está ya parcialmente estabilizado.
- El biogás producido puede en ciertos casos ser un subproducto energético valioso.
- Conserva los nutrientes en el efluente (N y P), punto atractivo en caso de reúso en riego.
- El proceso en sí, no requiere de suministro de energía eléctrica (muy bajos requerimientos energéticos en comparación con tratamientos convencionales).
- Es un proceso simple y económico en operación y mantenimiento.
- Soporta periodos sin alimentación (semanas e inclusive meses).
- Puede aplicarse a pequeña y gran escala.
- Construcción simple y de bajo costo, con muy limitados requerimientos de equipo electromecánico.

Limitantes para su aplicación:

1. Se requiere de un postratamiento para remover en mayor grado la materia orgánica.
2. Poca experiencia en la aplicación del reactor a gran escala.
3. Arranque lento si no se cuenta con el inóculo (muestra de microorganismos introducidos al reactor) adecuado. Se ha comprobado que para aguas residuales domésticas o municipales el reactor puede arrancarse sin inóculo, aunque en un tiempo mayor, del orden de 8 meses.
4. Se requiere de un postratamiento para obtener un efluente con mejores características.
5. Condiciones que dañarían al sistema: el pH, la velocidad de ascensión, la presencia de sólidos suspendidos en el reactor, una alta concentración de aminoácidos, algunas sustancias que produzcan espuma, altas concentraciones de grasa.

Generación de residuos.

- 1) Biogás (CH₄ metano): producto gaseoso que puede ser empleado como combustible.
- 2) Lodo: su composición puede ser valorizado debido al contenido de materia orgánica y mineral, pudiendo emplearse como biofertilizante y mejorador de suelos.

Los valores de eficiencias de remoción de demanda química de oxígeno (DQO) demanda bioquímica de oxígeno (DBO) y los sólidos suspendidos totales (SST), obtenidos al variar el tiempo de residencia en los reactores, son de alrededor del 60-75%, con tiempos de retención relativamente bajos (TRH = 4-6 h). A pesar de estos resultados, las concentraciones de DBO y SST en el efluente están por arriba de 50 mg/L. El reactor UASB es capaz de remover huevos de helmintos y quistes de protozoarios con eficiencias que varían de 75 a 90 %.



Insumos requeridos.

No requiere de un gran consumo de energía eléctrica. Como equipo adicional sólo se requiere de una bomba de alimentación para el influente.

Operación y mantenimiento.

Se debe de tener un control estricto en el diseño hidráulico. Un buen diseño de un reactor que trate aguas residuales municipales debe partir de la carga hidráulica como parámetro de diseño fundamental y no de la carga orgánica, como sucede con reactores que tratan aguas concentradas. Además, se requiere de indicadores de presión, flujo, temperatura, y el monitoreo de parámetros.

Algunos puntos que se deben tomar en cuenta para su mantenimiento son los siguientes:

- Se debe de monitorear el sistema de distribución de la entrada y salida del agua residual.
- Se recomienda el uso de sistemas externos de captura de sólidos para evitar pérdida de la biomasa en el sistema.
- Se debe de monitorear el sistema gas sólido.
- Puede incluirse un tanque de sedimentación o empaques en el domo del reactor para una mejor captura de los sólidos y para prevenir la pérdida de lodos del sistema debido a variaciones en las características y densidad de la cama de lodo.

A.4 Tratamiento terciario.

La aplicación de un tratamiento terciario obedece a la necesidad de remover materia orgánica, sólidos suspendidos y disueltos y otras sustancias a niveles mucho más estrictos que los alcanzados por un sistema secundario convencional, siendo las causas principales:

- Reusar el agua en aplicaciones industriales (11).
- Utilizar el agua para aumentar la disponibilidad en fuentes de suministro ya sean superficiales o subterráneas; en este caso es necesario remover metales pesados, orgánicas refractarios y otras sustancias potencialmente tóxicas, así como microorganismos (11).
- Remover nutrientes y otras sustancias en descargas en cuerpos receptores sensibles (11).

Para cumplir con los aspectos anteriormente mencionados se emplean diversas tecnologías. Sin embargo, el proceso terciario más empleado para las aguas residuales municipales es la desinfección con cloro y sus variantes dependiendo de los parámetros de calidad que se requieran en el efluente final, por esta razón a continuación se analizan los procesos de desinfección.

Además de resolver problemas difíciles de contaminación, esos procesos mejoran la calidad de la descarga hasta el punto en que resulta adecuado para muchos propósitos de reutilización.

A.4.1 Desinfección.

Descripción de la tecnología.

La desinfección del efluente es el último paso del tratamiento secundario del agua residual, cuyo propósito es la destrucción o inactivación de los microorganismos u organismos patógenos que pudieran haber sobrevivido al proceso de tratamiento y que puedan ser causantes de enfermedades, debido a que el agua es uno de los principales medios por el que se transmiten. Los organismos causantes de enfermedades pueden ser clasificados en bacterias, virus y protozoos entre otros. La desinfección se



hace imprescindible para la protección de la salud pública, si es que el efluente es descargado en un cuerpo receptor usado para nadar o para el consumo humano.

Para llevar a cabo la desinfección se pueden utilizar distintos tratamientos: Tratamiento físico (calor, radiación), ácidos o bases, etc. Pero fundamentalmente se utilizan agentes oxidantes, entre los que cabe destacar el clásico Cl_2 y algunos de sus derivados, o bien procesos de oxidación avanzada (O_3 , fotocátalisis heterogénea).

La utilización de desinfectantes persigue tres finalidades: producir agua libre de patógenos u organismos vivos, evitar la producción de subproductos indeseables de la desinfección y mantener la calidad bacteriológica en la red conducción posterior.

Los reactivos más utilizados son los siguientes:

Cloro:

El cloro es el desinfectante más usado para el tratamiento del agua residual doméstica porque destruye los organismos a ser inactivados mediante la oxidación del material celular. El cloro puede ser suministrado en muchas formas que incluyen el gas de cloro, las soluciones de hipoclorito y otros compuestos clorinados en forma sólida o líquida.

Ozono:

Cuando el ozono se descompone en agua, los radicales libres del peróxido de hidrógeno (HO_2) y del hidróxido (OH) que se forman tienen gran capacidad de oxidación y desempeñan un papel activo en el proceso de desinfección. En general se cree que las bacterias son destruidas debido a la oxidación protoplasmática, dando como resultado la desintegración de la pared de la célula (fisuramiento o lisis de la célula).

UV:

El sistema de desinfección con luz ultravioleta (UV) transfiere energía electromagnética desde una lámpara de vapor de mercurio al material genético del organismo (ADN o ARN). Cuando la radiación UV penetra en las paredes de la célula de un organismo, destruye la habilidad de reproducción de la célula, ya que penetra al material genético de los microorganismos y retarda su habilidad de reproducción.

La Figura 40 muestra el diagrama del proceso de desinfección con cloro:

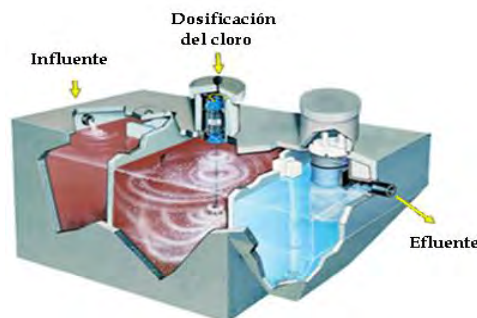


Figura 42. Diagrama del proceso de desinfección con cloro



La Figura 41 muestra el diagrama del proceso de desinfección con ozono:

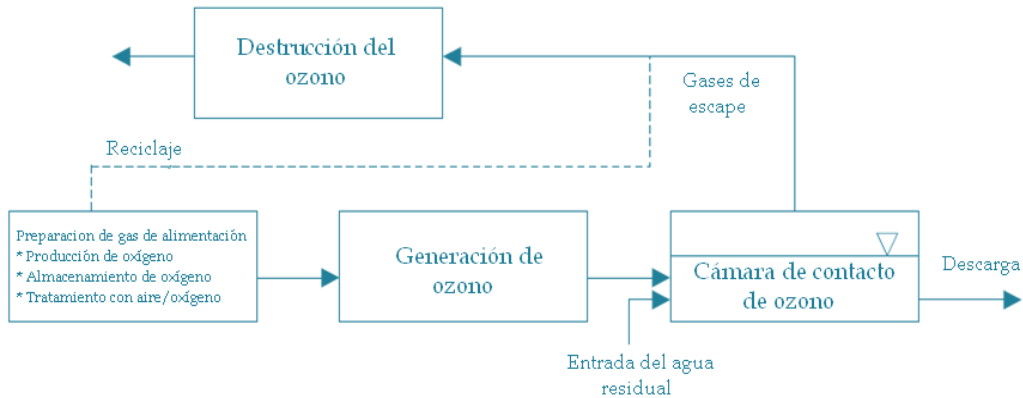


Figura 43. Diagrama del proceso de desinfección con ozono

La Figura 42 muestra el diagrama del proceso de desinfección con UV:

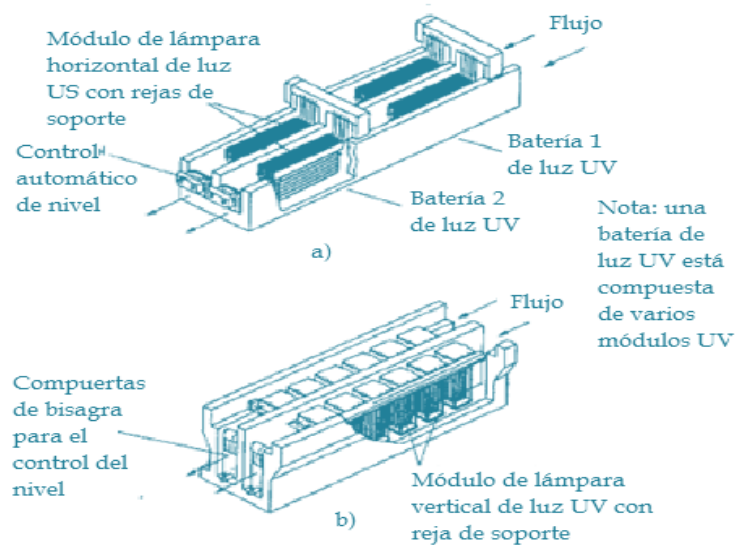


Figura 44. Diferentes arreglos de lámparas UV.

Se pueden tener los siguientes arreglos para la desinfección: cloro, ozono y UV.

✓ **Arreglos con cloro:**

El cloro puede ser suministrado en muchas formas que incluyen el gas de cloro (Cl_2), las soluciones de hipoclorito [$\text{Ca}(\text{OCl})_2$], [NaOCl] y otros compuestos clorinados en forma sólida o líquida.

En sistemas con caudales de trabajo pequeños se utiliza como desinfectante el hipoclorito sódico, fabricado a partir del Cl_2 .



Otro compuesto usado como desinfectante es el ClO_2 , por ser más oxidante que el cloro, no reacciona con amonio, por tanto no forma cloraminas y la posibilidad de formación de trihalometano es mucho menor que con Cl_2 .

Al llevarse a cabo las siguientes reacciones:

Ecuación 1

Ecuación 2

El ácido hipocloroso y el ión hipoclorito se relacionan:

Ecuación 3

Obteniéndose el cloro libre residual que es el desinfectante primario. El HOCl es el desinfectante más efectivo, pues se produce en una relación uno a uno con la adición de Cl_2 gas junto con una reducción de pH que limita la conversión a OCl^- .

El uso de hipocloritos está indicado en áreas densamente pobladas, que requieren grandes cantidades de cloro, o bien si se tienen condiciones de riesgo; esto es debido a que aunque su costo sea mayor con respecto al Cl_2 licuado, el gas Cl_2 es muy fuerte, tóxico a los humanos y más pesado que el aire por lo que se expande lentamente a nivel del piso, lo que provoca extrema precaución en su manejo y transporte.

En general si la concentración de cloro es pequeña, elimina a los microorganismos penetrando la célula y reaccionando con las enzimas y protoplasma; si la concentración es grande, el microorganismo se destruye debido a la oxidación de la pared celular.

Los procesos avanzados de oxidación tienen una elevada capacidad oxidante de los radicales HO^\cdot y se diferencian por la forma en que generan esos radicales, los más comunes son combinaciones de ozono, peróxido de hidrógeno, radiación ultravioleta y fotocatalisis.

✓ Arreglos con ozono:

El ozono es un oxidante y agente germicida de virus muy fuerte. Los mecanismos de desinfección asociados con el uso de ozono incluyen: oxidación o destrucción directa de la pared de las células, daño a los componentes de los ácidos nucleicos, ruptura de las uniones carbono-nitrógeno que conduce a la despolimerización, y reacciones con subproductos radicales de la descomposición del ozono.

Cuando el O_3 se descompone en agua, los radicales libres del peróxido de hidrógeno y del hidróxido que se forman tienen gran capacidad de oxidación (las bacterias son destruidas por oxidación protoplasmática, lo que ocasiona la desintegración de la pared de la célula) y desempeñan un papel activo en el proceso de desinfección.

Procesos homogéneos sin aporte externo de energía: (1) Ozonización en medio alcalino, (2) Ozonización con peróxido de hidrógeno.

Procesos homogéneos con aporte externo de energía: (1) Ozonización y radiación ultravioleta, (2) Ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta, (3) Ozonización y ultrasonidos.

Procesos heterogéneos: (1) Ozonización catalítica, (2) Ozonización fotocatalítica.



Método de ozonización en medio alcalino: A valores de pH elevados, la velocidad de autodescomposición de ozono en agua se incrementa y con ella la velocidad de generación de radicales, con lo cual la oxidación de los compuestos orgánicos en el efluente se produce por la combinación de dos mecanismos: (1) reacción entre la molécula orgánica y el ozono disuelto, (2) los radicales hidroxilo tienen la función de ser oxidantes.

Método de ozonización con peróxido de hidrógeno: la adición de peróxido de hidrógeno combinado con el ozono provoca la iniciación de un ciclo de descomposición que resulta en la formación de un mol de radicales hidroxilo por cada mol de ozono que se descompone.

Método de ozonización catalítica: ofrece la ventaja de la facilidad de separación del producto. Los principales catalizadores que se utilizan son los óxidos de metales de transición.

Los procesos de ozonización eliminan contaminantes patógenos, y la ozonización terciaria elimina materia orgánica refractaria.

✓ **Arreglos con UV:**

Los componentes principales del sistema son lámparas de vapor de mercurio, reactor y balastos electrónicos. La fuente de luz UV son lámparas de arco de mercurio de baja o mediana presión y de intensidad baja o alta. La longitud de onda óptima para desactivar microorganismos se encuentra en el intervalo de 250 a 270 nm. La intensidad de radiación emitida por la lámpara se disipa a medida que la distancia de la lámpara aumenta. Las lámparas de baja presión emiten luz monocromática a una longitud de onda de 253.7 nm. Las longitudes estándar de las lámparas de baja presión son de 0.75 y 1.5 m y sus diámetros van de 1.5 a 2.0 cm. Con una temperatura ideal de la pared de la lámpara de entre 95 y 122°F.

Procesos Homogéneos con aporte externo de energía: (1) Energía procedente de radiación ultravioleta, (2) Ozonización y radiación ultravioleta, (3) Peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta, (4) Ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta, (5) Foto-Fenton.

Procesos Heterogéneos: (1) Ozonización fotocatalítica, (2) Fotocatálisis heterogénea.

Método ozono-ultravioleta: La rapidez de las reacciones fotoquímicas se incrementa mediante la adición de ozono, peróxido de hidrógeno, o ambos. Este proceso debe llevarse a cabo en longitudes de onda de 250 nm.

Método Foto-Fenton ($Fe^{2+}/H_2O_2/UV$): Es un tratamiento fotocatalítico basado en la producción de radicales hidroxilo mediante el reactivo Fenton. La rapidez de degradación de contaminantes orgánicos con sistemas Fenton se incrementa por la irradiación de luz.

Proceso fotocatalítico con TiO (óxido de titanio): La radiación provoca la excitación de electrones en la banda de valencia del sólido, lo que origina la formación de huecos con un potencial de oxidación muy elevado. En estos huecos se produce la oxidación de compuestos orgánicos absorbidos, además en ellos tiene lugar la descomposición del agua para originar radicales hidroxilo que participan en las reacciones de degradación de la materia orgánica. Se usan longitudes de onda de 380 nm.

En la Figura 43 se muestra el diagrama de flujo del proceso de desinfección.



Figura 45. Esquema del proceso típico de tratamiento de aguas residuales municipales con desinfección.

Aplicación de la tecnología.

Con el uso de cloro:

Se eliminan microorganismos patógenos como bacterias, virus, protozoarios y helmintos; elimina nutrientes con base en nitrógeno, gérmenes, hierro y sulfuro de hidrógeno.

Con el uso de ozono:

Se eliminan microorganismos patógenos como bacterias, virus, protozoarios y helmintos; y materia orgánica refractaria.

Con el uso de UV:

Se inactivan microorganismos, con el fin de retardar su reproducción.

En general los organismos removidos por estos tres métodos son:

Tabla 47. Principales microorganismos removidos en el proceso de desinfección(29).

Bacterias	Protozoos	Helmintos	Virus
Salmonella typhi	Balantidium coli	Ascaris lumbricoides	Virus entéricos
Escherichia coli	Cryptosporidium parvum	T. solium	Hepatitis A
Leptosipira	Entamoeba histolytica	Trichuris trichiura	Agente de Norwalk
Salmonella	Giardia lamblia		Rotavirus
Shigella			
Vibrio cholerae			

✓ **Ventajas de su aplicación.**

a) Cloro:

- 1) La cloración es una tecnología bien establecida.
- 2) En la actualidad la cloración es más eficiente en términos de costo que la radiación UV o la desinfección con ozono.
- 3) El cloro residual que permanece en el efluente del agua residual puede prolongar el efecto de desinfección aún después del tratamiento inicial y puede ser medido para evaluar su efectividad.
- 4) La desinfección con cloro es confiable y efectiva para un amplio espectro de organismos patógenos.
- 5) El cloro es efectivo en la oxidación de ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos.
- 6) La cloración permite un control flexible de la dosificación.
- 7) El cloro puede eliminar ciertos olores molestos durante la desinfección.



b) UV:

- 1) La desinfección con luz UV es eficaz para la desactivación de la mayoría de los virus, esporas y quistes.
- 2) Es un proceso físico, lo cual elimina la necesidad de generar, manejar, transportar, o almacenar productos químicos tóxicos, peligrosos o corrosivos.
- 3) No existe ningún efecto residual que pueda afectar a los seres humanos o cualquier organismo acuático.
- 4) La desinfección con luz UV es de uso fácil para los operadores.
- 5) Tiene un período de contacto más corto en comparación con otros desinfectantes (aproximadamente de 20 a 30 segundos con la utilización de las lámparas de baja presión).
- 6) El equipo de desinfección con luz UV requiere menos espacio que otros métodos.

c) Ozono:

- 1) El ozono es más eficaz que la utilización del cloro para la desinfección o destrucción de virus y bacterias.
- 2) El proceso de ozonización utiliza un periodo corto de contacto (aproximadamente de 10 a 30 minutos).
- 3) No existen residuos peligrosos que necesiten ser removidos después del proceso de ozonización porque el ozono se descompone rápidamente.
- 4) Después del proceso de ozonización, los microorganismos no crecen nuevamente, a excepción de aquellos que están protegidos por las partículas en la corriente de agua residual.
- 5) El ozono es generado dentro de la planta, existiendo así muy pocos problemas de seguridad industrial asociados con el envío y el transporte.
- 6) El proceso de ozonización eleva la concentración de oxígeno disuelto (OD) del efluente, lo cual puede eliminar la necesidad de reaireación y también puede incrementar el nivel de OD en la corriente de agua receptora.

Limitantes para su aplicación.

a) Cloro:

- 1) Todas las formas de cloro son muy corrosivas y tóxicas aún a bajas concentraciones. Como consecuencia, el almacenamiento, el transporte y el manejo presentan riesgos cuya prevención requiere normas más exigentes de seguridad industrial.
- 2) Al reaccionar con los compuestos orgánicos presentes en el agua puede producir mal olor.
- 3) Al reaccionar con los compuestos orgánicos presentes en el agua produce compuestos carcinógenos.
- 4) Materia orgánica suspendida, algunos contaminantes reaccionan con el método de desinfección.
- 5) El nivel total de sólidos disueltos se incrementa en el agua efluente.
- 6) El cloro residual es inestable en presencia de altas concentraciones de materiales con demanda de cloro, por lo cual pueden requerirse mayores dosis para lograr una desinfección adecuada.
- 7) Algunas especies parásitas han mostrado resistencia a dosis bajas de cloro.
- 8) Limitantes: la temperatura, la alcalinidad y el contenido de nitrógeno.
- 9) Sustancias que afectan el desempeño: Amoniaco, nitritos, nitratos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO), dureza del agua, hierro, pH y sólidos suspendidos.
- 10) El cloro residual es inestable en presencia de altas concentraciones de materiales con demanda de cloro, por lo cual pueden requerirse mayores dosis para lograr una desinfección adecuada.

b) UV:



1. Se ha observado que la radiación UV está directamente relacionada con la concentración de componentes coloidales y de partículas en el agua residual.
2. El consumo de energía es muy alto.
3. Los factores que afectan la intensidad son: La edad de las lámparas, la formación de depósitos en las lámparas y la configuración y ubicación de las lámparas en el reactor.
4. Las sustancias que afectan el desempeño de la luz UV son: El amoníaco, los nitritos y nitratos, la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), la dureza de materiales húmicos, el hierro, el pH y los sólidos suspendidos totales.
5. La baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos virus, esporas y quistes.
6. Puede haber peligro de electrocución.
7. Algunas veces los organismos pueden reparar o invertir los efectos destructivos de la radiación UV mediante un “mecanismo de reparación”, también conocido como fotoreactivación o, en ausencia de radiación, como “reparación en oscuro”.
8. Un programa de mantenimiento preventivo es necesario para controlar la acumulación de sólidos en la parte externa de los tubos de luz.
9. La turbidez y los sólidos suspendidos totales (SST) en el agua residual hacen que la desinfección con luz UV sea ineficaz. El uso de la desinfección con lámparas UV de baja presión no es tan efectivo en el caso de efluentes secundarios con niveles de SST mayores a 30 mg/L.
10. La desinfección con luz UV no es tan económica como la desinfección con cloro, pero los costos son competitivos cuando la cloración requiere eliminación de cloro y se cumple con los códigos de prevención de incendios.

c) Ozono:

1. La baja dosificación puede no desactivar efectivamente algunos virus, esporas o quistes.
2. Se requieren equipos complicados y sistemas de contacto eficientes.
3. El ozono es muy reactivo y corrosivo, requiriendo así de materiales resistentes a la corrosión tales como el acero inoxidable.
4. El proceso de ozonización no es económico para las aguas residuales con altas concentraciones de sólidos suspendidos (SS), demanda bioquímica del oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), o carbono orgánico total (COT).
5. El ozono es extremadamente irritante y posiblemente tóxico.
6. El costo del tratamiento puede ser relativamente alto en cuanto a la inversión de capital y la demanda de energía eléctrica.

Los contaminantes que pueden dañar al sistema son la materia orgánica suspendida y algunos contaminantes reaccionan con el método de desinfección.

Generación de residuos.

- El cloro residual, aún a bajas concentraciones, es tóxico a los organismos acuáticos y por ello puede requerirse la eliminación de cloro.
- El cloro oxida ciertos tipos de materiales orgánicos del agua residual generando compuestos más peligrosos (tales como los metanos trihalogenados [MTH]).
- La radiación UV mineraliza las sustancias orgánicas; no genera residuos.
- Se requiere de un tratamiento posterior para desclorar el agua. La descloración es el proceso de remoción de los residuos libres y combinados de cloro para reducir la toxicidad residual luego de la cloración y antes de su descarga. Esto puede elevar los costos totales de cloración desde un 30% hasta un 50 %; la remoción promedio es del 66 % del total de cloro.



Insumos requeridos.

Para los tratamientos con UV y ozono, se requiere de energía eléctrica.

Ozono: La mayoría de las plantas de tratamiento de aguas residuales pueden generar el ozono mediante la aplicación de una corriente alterna de alto voltaje (6 a 20 kilovoltios) a través de una brecha entre placas dieléctricas de descarga en donde se encuentra un gas de alimentación que contiene el oxígeno. El uso de energía es optimizado para un rendimiento controlado de la desinfección. El uso de energía aproximado es de 90 kW para desinfectar 1 mgd de agua residual.

UV: El costo promedio anual del consumo de energía eléctrica es de 3300 dólares.

En cuanto a reactivos químicos se requieren:

- Cloro: la dosis de cloro varía con base en la demanda de cloro, las características del agua residual y los requisitos de descarga del efluente. Sin embargo, generalmente las dosis se encuentran en el intervalo de 5 a 20 mg/L.
- Para el tratamiento con UV:
 - Ácido cítrico
 - Vinagre
 - Hidrosulfito de sodio, para su mantenimiento.

Operación y mantenimiento.

Cloro:

- Monitoreo de parámetros (huevos de helmintos, coliformes, cloro residual).
- Desensamble y limpieza de los diversos componentes del sistema una vez cada seis meses.
- Remoción de depósitos de hierro y manganeso usando, por ejemplo, ácido clorhídrico.
- Mantenimiento de las bombas de rebombeo.
- Inspección y limpieza anual de las válvulas y resortes.
- Cumplimiento con las recomendaciones de O/M de los fabricantes.
- Evaluación y calibrado de equipos tal como lo recomienda el fabricante de los equipos.
- Desarrollo de un plan de respuesta a emergencias para el almacenaje del gas de cloro.
- Cuando se utiliza cloro es muy importante almacenar en forma segura y apropiada todos los agentes químicos de desinfección.
- El gas de cloro se almacena normalmente en tanques de acero (cilindros de 68.4 libras o contenedores de una tonelada) y es transportado en vagones de ferrocarril o en carrotanques.
- La solución de hipoclorito de sodio debe ser almacenada en tanques de fibra de vidrio o de acero con recubrimiento de caucho.
- El hipoclorito de calcio se envía en barriles carrotanques y debe ser almacenado con mucha precaución.

UV:

- Monitoreo de parámetros (huevos de helmintos, coliformes).
- Las actividades apropiadas de operación y mantenimiento de un sistema de desinfección con luz UV aseguran que suficiente radiación sea transmitida a los organismos para inactivarlos.
- Todas las superficies entre la radiación UV y los organismos a ser desactivados deben estar limpios, y los balastos, las lámparas y el reactor deben estar funcionando con una eficiencia máxima.
- La limpieza inadecuada es una de las causas más comunes de la ineficiencia de los sistemas de desinfección con luz UV.



- Los tubos de cuarzo requieren ser limpiados regularmente mediante limpiadores mecánicos, de ultrasonido, o químicos.
- La frecuencia de limpieza es individual y muy específica para cada caso, ya que algunos sistemas necesitan ser limpiados más frecuentemente que otros.
- La limpieza química se realiza comúnmente con ácido cítrico. Otros agentes de limpieza incluyen soluciones de vinagre y el hidrosulfito de sodio.
- Una combinación de agentes de limpieza debe ser probada para encontrar el agente más conveniente y que más se ajuste a las características del agua residual sin generar productos peligrosos o tóxicos.
- Los sistemas con reactor sin contacto se limpian con mayor eficacia por medio del hidrosulfito de sodio.
- La vida promedio útil de las lámparas fluctúa entre 8,760 a 14,000 horas de funcionamiento, y generalmente las lámparas se reemplazan después de 12,000 horas de uso.
- El balastro debe ser compatible con las lámparas y se debe ventilar para protegerlo del calor excesivo, lo cual puede reducir su vida útil u ocasionar incendios. Aunque el ciclo de vida de los balastros es de aproximadamente 10 a 15 años, normalmente los balastros se reemplazan cada 10 años.

Ozono:

- No deben existir conexiones con fugas dentro o en los alrededores del generador de ozono.
- El operador debe monitorear regularmente las subunidades apropiadas para asegurar que no estén recalentadas. Por tanto debe verificar rutinariamente que no existan escapes puesto que una fuga muy pequeña puede causar concentraciones inaceptables de ozono en el ambiente.
- Es importante que las tuberías del generador de ozono, de distribución, de contacto, del gas de escape y de entrada a la unidad de destrucción de ozono sean purgadas antes de abrir los diversos sistemas o subsistemas.
- Al ingresar a la cámara de contacto de ozono, el personal debe estar consciente de que existe un potencial de deficiencia de oxígeno o de gas de ozono atrapado a pesar de que se realicen los mejores esfuerzos de limpieza del sistema.
- El operador debe estar enterado de todos los procedimientos de operación de emergencia y deben tener todo el equipo de seguridad industrial disponible para su utilización.
- Abastecer al generador de ozono con un gas limpio de alimentación que tenga un punto de condensación igual o menor a -60 °C. Si el gas alimentado tiene humedad, la reacción de ozono y la humedad puede generar una condensación muy corrosiva en el interior del ozonizador.
- La producción del generador puede ser disminuida por la formación de los óxidos de nitrógeno (tales como ácido nítrico).
- Mantener el flujo requerido del enfriador del generador (aire, agua u otro líquido).
- Lubricar el compresor o el soplador de acuerdo con las especificaciones del fabricante.
- Hacer monitoreo del sistema de alimentación y distribución de ozono para asegurar que el volumen necesario tenga suficiente contacto con las aguas residuales.

Existen otros procesos de tratamiento avanzado de aguas residuales, ya que aún después del tratamiento secundario, la coagulación, la sedimentación y la filtración pueden persistir en la descarga algunos materiales orgánicos solubles resistentes a la descomposición biológica, para remover estas sustancias también llamadas compuestos orgánicos refractarios se utiliza el proceso de filtración en medios porosos como membranas cuyo tamaño de poro determina los contaminantes removidos, otro proceso es la adsorción con carbón, en este proceso la remoción se lleva a cabo por el principio de adsorción en un medio granular(23).