



Programa de la asignatura:

# Ingeniería ambiental del agua

**U2** | Técnicas dentro del tren de  
tratamiento





# Unidad 2. Técnicas dentro del tren de tratamiento



Planta de tratamiento de aguas residuales. Tomada de: [www.freepik.com](http://www.freepik.com)



## Índice

Presentación de la Unidad .....	4
Propósitos de la unidad.....	8
Competencia específica.....	9
Actividades .....	9
2.1. Técnicas de tratamiento primario .....	10
2.1.1. Parámetros de diseño en tratamiento primario .....	14
2.1.2. Criterios de selección .....	23
2.1.3. Cuantificación de volumen .....	27
2.2. Técnicas de tratamiento secundario.....	44
2.2.1. Parámetros de diseño en tratamiento secundario.....	46
2.2.2. Criterios de selección .....	53
2.2.3. Cuantificación del volumen.....	59
2.3. Técnicas de tratamiento terciario .....	65
2.3.1. Parámetros de diseño en tratamiento terciario .....	67
2.3.2. Criterios de selección .....	75
2.3.3. Cuantificación de volumen .....	84
Cierre de la Unidad .....	91
Para saber más.....	92
Fuentes de consulta.....	97



## Presentación de la Unidad



Concluida la caracterización del agua e incluso durante la parte final de este proceso, se pueden realizar las pruebas de tratabilidad. Estas pruebas consisten en someter el agua a técnicas de tratamiento que pueden eliminar o reducir los contaminantes y sirven para definir si cada técnica probada alcanza porcentajes de remoción de los parámetros fuera de norma (CONAGUA, 2007a).

Conviene, *a priori*, no eliminar técnicas de tratamiento y efectuar una amplia comparación de la eficiencia de cada técnica en pruebas de laboratorio para ahorrar en gastos de construcción y de operación de la planta potabilizadora o de la planta de tratamiento (Valdés y Vázquez, 2003) ya que sin estas pruebas se pueden cometer errores al presentar variaciones en el gasto y en algunos casos una tendencia al sobre equipamiento, sobredimensionamiento y la automatización, así como a la inclusión de “obras de arte” en las estructuras de alimentación y recolección, lo que encarece y hace más lenta la construcción de las mismas plantas (CONAGUA, 2007a), es por ello que debe seleccionarse adecuadamente cada técnica que conformará un tren completo de tratamiento. En la primera unidad aprendiste que un tren completo de tratamiento, generalmente, consta de pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario. Solo cuando la calidad del agua, después de la potabilización o del tratamiento de aguas residuales lo requiera, se utilizará un tren de tratamiento terciario. A continuación, se presenta un esquema de las etapas de tratamiento en un orden lógico y secuencial.



Figura 1. Esquema de un tren de tratamiento de aguas residuales.



Fuente: CEA, 2013.

En la siguiente tabla se presentan los objetivos de cada técnica para que realices una preselección con base en la remoción del material en que cada técnica es más eficiente.

Tabla 1. Objetivos de cada etapa en un tren de tratamiento.

Etapa	Objetivos del tratamiento
Tratamiento preliminar (pretratamiento)	Remoción de basura Remoción de arena Regulación de caudal
Tratamiento primario	Remoción de material suspendido
Tratamiento secundario	Remoción de materia orgánica biodegradable
Tratamiento terciario	Mejorar el efluente de un tratamiento secundario <ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoción de material suspendido</li> <li>• Remoción de nutrientes (N y/o P)</li> <li>• Remoción de otros contaminantes</li> </ul>
Desinfección	Eliminación de microorganismos patógenos
Tratamiento de lodos	Producir lodo apto para su disposición final: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Remoción de contenido de agua</li> <li>• Producción de lodos que no se descomponga (biosólidos)</li> </ul>

Fuente: CEA, 2013.



Es importante señalar que no todas las técnicas requieren del diseño de un elemento constructivo expreso para que funcionen; muchas comparten elementos constructivos, por ejemplo, el carbón activado funciona combinándose como medio de empaque en el filtro de arena. En la Tabla 2 se presentan los elementos constructivos asociados a cada técnica cuando así lo requieren; se indican las técnicas que no necesitan la construcción de algún elemento específico para su aplicación, también se señala qué técnicas pueden combinarse con otras en un mismo elemento constructivo.

Tabla 2. Elementos constructivos por técnica.

Técnica	Elemento constructivo	Referencias
<b>Tratamiento primario</b>		
Igualación	Tanque rectangular	CONAGUA, 2007a Valdés y Vázquez, 2003
Rejillas	Canal de sección rectangular	Calderón, 2013 CONAGUA, 2007b Valdés y Vázquez, 2003
Ajuste de pH	NR, se usa el tanque igualador	CONAGUA, 2007 <sup>a</sup>
Desinfección primaria	NR, se usa el tanque igualador	CONAGUA, 2007a
Desarenadores	Tanques rectangulares o circulares	Calderón, 2013 CONAGUA, 2007a Valdés y Vázquez, 2003
Sedimentación	Tanque circular con base cónica	Calderón, 2013 Valdés y Vázquez, 2003
Flotación	Tanque rectangular	Calderón, 2013
<b>Tratamiento secundario</b>		
Lodos activados	Tanque rectangular	CONAMA, 2013a Valdés y Vázquez, 2003
Discos biológicos	Módulos prefabricados	CIDTA, 2013 CONAMA, 2013b Valdés y Vázquez, 2003
Filtros percoladores	Tanque cilíndrico	Noyola, Morgan y Güereca, 2013 Valdés y Vázquez, 2003
Lagunas de estabilización	Laguna artificial	CONAGUA, 2007d CONAMA, 2013c Sorrequieta, 2004 Valdés y Vázquez, 2003
Procesos biológicos anaerobios	Reactores diversos (ovoides, rectangulares, etcétera)	CONAMA, 2013d Noyola, Morgan y Güereca, 2013. Valdés y Vázquez, 2003



Tratamiento terciario		
Precipitación y coagulación	NR, se usa combinado con la técnica de sedimentación	CONAGUA, 2007a CONAMA, 2013e Rodríguez, et. al., 2006
Adsorción en carbón activado	NR, se usa el tanque de filtro de arena	CONAGUA, 2007a CONAMA, 2013f
Intercambio iónico	NR, se usa el tanque de filtro de arena	CONAGUA, 2007a COMAMA, 2013g Rodríguez, et. al., 2006
Osmosis inversa	NR, se usa módulos prefabricados por el proveedor	CONAGUA, 2007a CONAMA, 2013h Rodríguez, et.al., 2006
Electrodialisis	NR, se usa módulos prefabricados por el proveedor	CONAGUA, 2007a CONAMA, 2013i
Remoción de nutrientes	NR, usa los mismos de las técnicas involucradas	Rodríguez, et. al., 2006
Ozonización	NR, se usa módulos prefabricados por el proveedor	CONAGUA, 2007a Rodríguez, et. al., 2006
Filtración en arena.	Tanque rectangular	Barrientos, Tello, Tito y Palomino, 2010 CONAGUA, 2007a Rodríguez, et. al., 2006
Desinfección	NR, se desinfecta en línea o en un tanque almacenador o regulador existente en línea de distribución	CONAGUA, 2007a CONAGUA, 2007b CONAGUA, 2007c Rodríguez, et. al., 2006 Valdés y Vázquez, 2003

NR: no se requiere la construcción de un elemento exclusivo para esta técnica.

En la tabla anterior encontrarás las referencias a documentos que contienen información más extensa para el cálculo de algunos detalles constructivos de los tratamientos primarios y terciarios. Previo a esto, es muy importante definir el gasto de diseño; es decir, el volumen de agua por unidad de tiempo ( $m^3/s$ ) que se potabilizará o se someterá a tratamiento para conservar el flujo en continuo de agua a través de las diferentes etapas y técnicas en el tren de tratamiento a través de sus tuberías, tanques y diferentes dispositivos. Por ese motivo, en esta segunda unidad se establecen los criterios de selección de las diferentes técnicas y la cuantificación del gasto de agua. La aplicación de estos criterios y cálculos de volumen se pondrán en práctica en las actividades programadas para esta unidad. Recuerda usar los foros para intercambiar experiencias y dudas con tus compañeros(as) y tu docente en línea.



## Propósitos de la unidad



Al término de esta unidad podrás:

- 1** **Analizar** los parámetros de diseño y criterios de selección.
- 2** **Seleccionar** una o varias técnicas de tratamiento de agua de cada etapa de tratamiento primario, secundario o terciario con base en el objetivo final de calidad de agua.
- 3** **Proponer** un tren de tratamiento de agua.



## Competencia específica



**Selecciona** diferentes técnicas de tratamiento de agua para proponer un tren de tratamiento a través del análisis de los parámetros de diseño y criterios de selección.

## Actividades



Las instrucciones de las actividades de aprendizaje, las podrás consultar en el espacio **Avisos importantes**. Toma en cuenta que para esta unidad se han generado actividades colaborativas, individuales, complementarias, autorreflexiones y la evidencia de aprendizaje.



## 2.1. Técnicas de tratamiento primario

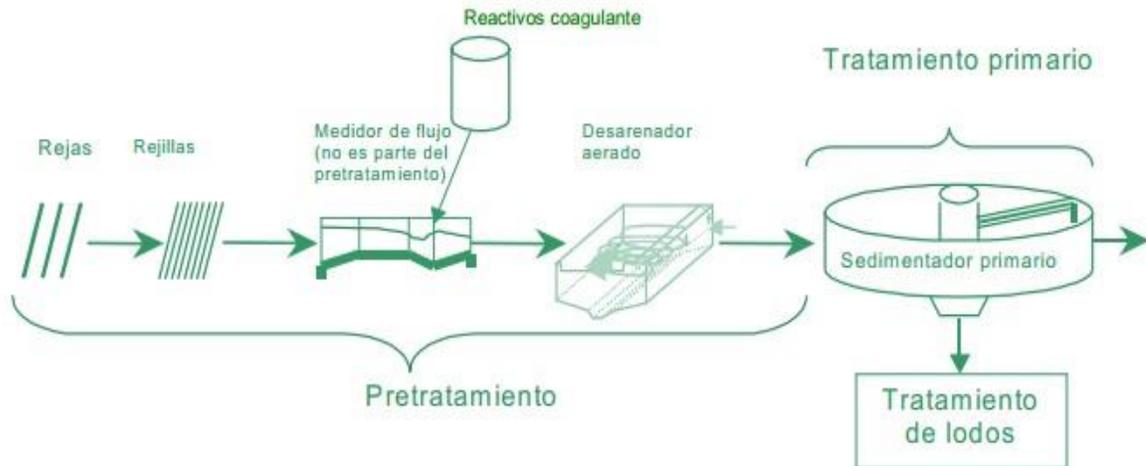
Las técnicas de tratamiento primario se enfocan a la eliminación de aquellos contaminantes que puedan ocasionar problemas de operación y de mantenimiento en el proceso de tratamiento del agua o en los sistemas auxiliares. Ejemplo de ello es la eliminación de contaminantes o basura de gran y mediano tamaño como ramas, piedras, animales muertos, plásticos o bien, problemáticos como arenas, grasas y aceites. El tratamiento se lleva a cabo a través de cribas o rejillas, desarenadores, flotadores o desgrasadores. En algunas situaciones se pueden utilizar trituradores para disminuir el tamaño de ciertos desechos y reincorporarlos al tratamiento (Noyola, Morgan y Güereca, 2013). En la siguiente figura se observa un tratamiento típico primario que puede ser usado en una planta potabilizadora o en una planta de tratamiento de agua residual.



Para darte una idea general de la operación de una planta de tratamiento (PTAR), **observa** el siguiente video: *Diagrama de funcionamiento*. Busca la liga en la sección de *Para saber más*.



Figura 2. Esquema de un tren de pre-tratamiento y tratamiento primario.



Fuente: CONAMA A, 2013b.

En la figura anterior se presenta un tren de tratamiento primario aplicable a una planta potabilizadora o a una planta de tratamiento de agua residual donde se esquematizan las técnicas que conforman un tratamiento primario en orden secuencial. Recuerda que en la primera unidad se mencionaron las técnicas que conforman un tratamiento primario.

- a. Para las **plantas potabilizadoras**, el tren de tratamiento primario estaría conformado por (AWWA, 2002):
  - **Ajuste de pH.** Es el método más común para reducir la corrosión de los sistemas de potabilización y distribución de agua, éste consiste en probar distintas dosis de reactivos hasta conseguir el pH adecuado. Los reactivos más usados para elevar o hacer más básico al pH, son NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y Ca(OH)<sub>2</sub> y los más aplicados para rebajar o hacer más ácido al pH son HCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Se preparan disoluciones de 1 g/l.
  - **Desinfección primaria.** Es un proceso clave en cualquier sistema de tratamiento de agua. Por ello, en la producción de agua segura para consumo humano es importante destacar consideraciones especiales antes de su implementación. En ocasiones se utiliza dos veces esta técnica de tratamiento en el tren completo; es decir, se usa al inicio para reducir el efecto infeccioso y al final para asegurar la desinfección hasta que el agua potabilizada llegue a la casa de los consumidores.



- **Coagulación–floculación.** La coagulación es la adición de compuestos químicos al agua para alterar el estado físico de los sólidos disueltos, coloidales o suspendidos a fin de facilitar su remoción por precipitación o filtración. La coagulación va ligada a la floculación que es la aglomeración de partículas desestabilizadas en el proceso de coagulación química a través de medios mecánicos o hidráulicos (SSA, 2000).
- **Sedimentación.** Es la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido. A los sedimentadores también se les denomina clarificadores y cuando se trata de separar las partículas sedimentables se les denomina desarenadores.

Ahora revisarás las técnicas de tratamiento primario para las plantas de tratamiento de aguas residuales. En este nivel, una porción de sólidos y materia orgánica suspendida es removida del agua residual utilizando la fuerza de gravedad como principio. Las cifras de remoción comúnmente alcanzadas en aguas residuales municipales son del 60% en sólidos suspendidos y de 30% en la demanda bioquímica de oxígeno (DBO<sub>5</sub>). Esta remoción generalmente se lleva a cabo por sedimentación, y es considerada como la antesala para el tratamiento secundario (Noyola, Morgan, y Güereca, 2013).

#### Recuerda que:

**DBO<sub>5</sub> (Demanda Bioquímica de Oxígeno).** Es La cantidad de oxígeno (medido en mg/l) que es requerido para la descomposición de la materia orgánica por bacterias, bajo condiciones de una prueba estandarizada, en un tiempo de cinco días e incubada a 20°C. Se utiliza para medir la cantidad de contaminación orgánica en aguas residuales. Frecuentemente se refiere solo como DBO (CONAGUA, 2012).

- b. Para las **plantas de tratamiento de agua residual**, el tren de tratamiento primario está conformado por (Fuentes, 2010):
  - o **Rejillas.** Los primeros dispositivos que encuentran las aguas residuales al entrar en una planta son las rejas para realizar un cribado. Las aguas residuales llegarán por gravedad hasta el lugar donde será construida la planta



de tratamiento. Los materiales sólidos que frecuentemente encuentran su destino en el sistema de alcantarillado se separan pasando las aguas a través de rejillas hechas con varillas de hierro paralelas. El propósito fundamental de los dispositivos de cribado es proteger a las bombas y otros equipos electromecánicos y prevenir el atascamiento de válvulas (Valdés y Vázquez, 2003).

- **Desarenadores.** Cuando se desea remover partículas cuyo tamaño permita su sedimentación por gravedad, los sedimentadores se denominan desarenadores donde se remueven sólidos suspendidos y sedimentables, así como materia orgánica presente en el agua residual. Los materiales inertes densos como arena, trozos de vidrio, limo y piedras se llaman arena o piedrilla. Si esos materiales no se eliminan del agua, erosionan las bombas y demás dispositivos mecánicos, lo que les causa demasiado desgaste. Además, tienden a asentarse en esquinas y su acumulación en ciertas áreas del tanque provoca cambios de dirección en el flujo de agua, por lo tanto, se reduce la capacidad de flujo y al final se tapan los tubos y canales de la planta de tratamiento (Valdés y Vázquez, 2003).
- **Flotación.** Emplea una corriente de aire para separar sólidos, grasas y aceites. La flotación por aire disuelto, además de eliminar materia sólida y líquida de densidad inferior a la del agua, es capaz de eliminar sólidos de densidad superior. Todo flotador dispone, además, de una purga de decantados a través de la cual se eliminan las partículas pesadas (CEPIS/OPS, 2004).
- **Igualación.** Después de las rejillas y del desarenador, el agua residual pasa a los tanques de igualación, éstos se construyen para regular caudales, homogeneizar la calidad del agua y para compensar en un tiempo determinado los flujos de aportaciones y consumos. A partir de ellos, se bombea con un gasto constante (volumen constante por unidad de tiempo) hacia las diferentes técnicas. La igualación de flujo no es una técnica de tratamiento en el sentido estricto porque no se aplica una operación unitaria, solo es un tanque donde se mezcla el agua a diferentes tiempos y se iguala la calidad para mejorar la eficacia de los procesos secundarios y avanzados de tratamiento de aguas residuales. Con este tanque de igualación se garantiza un volumen constante al influente (entrada) a la planta de tratamiento de aguas residuales (CONAGUA, 2007a).



Hasta en este momento revisaste las características básicas de las técnicas primarias. En los siguientes apartados se expone más información acerca de los parámetros de diseño; es decir, de las características de cada técnica, asimismo, podrás observar sus aplicaciones en un tren completo de tratamiento y los cálculos para la cuantificación del volumen.

### 2.1.1. Parámetros de diseño en tratamiento primario

Los parámetros de diseño corresponden a características constructivas u operativas que se deben considerar en la aplicación de cada técnica de tratamiento (CONAGUA, 2007a). Por ello, a continuación, se mencionan los más importantes por cada técnica de tratamiento primario:

**Ajuste de pH.** El valor óptimo debe hallarse entre seis y ocho. El ajuste de pH se realiza en un tanque que puede ser de igualación. El valor del pH debe encontrarse en determinados valores para que el proceso sea óptimo, ya que:

- Favorece la acción del coagulante-floculante.
- Permite la precipitación de metales disueltos como hidróxidos.

Para controlar el pH se debe controlar la presencia de hidróxidos metálicos solubles; por ello, la sustancia más usada es el hidróxido de sodio en concentraciones adecuadas para llegar a los valores óptimos. Normalmente se usa una dosificación controlada con un electrodo sensor de pH en tiempo real (CONAGUA, 2007a).

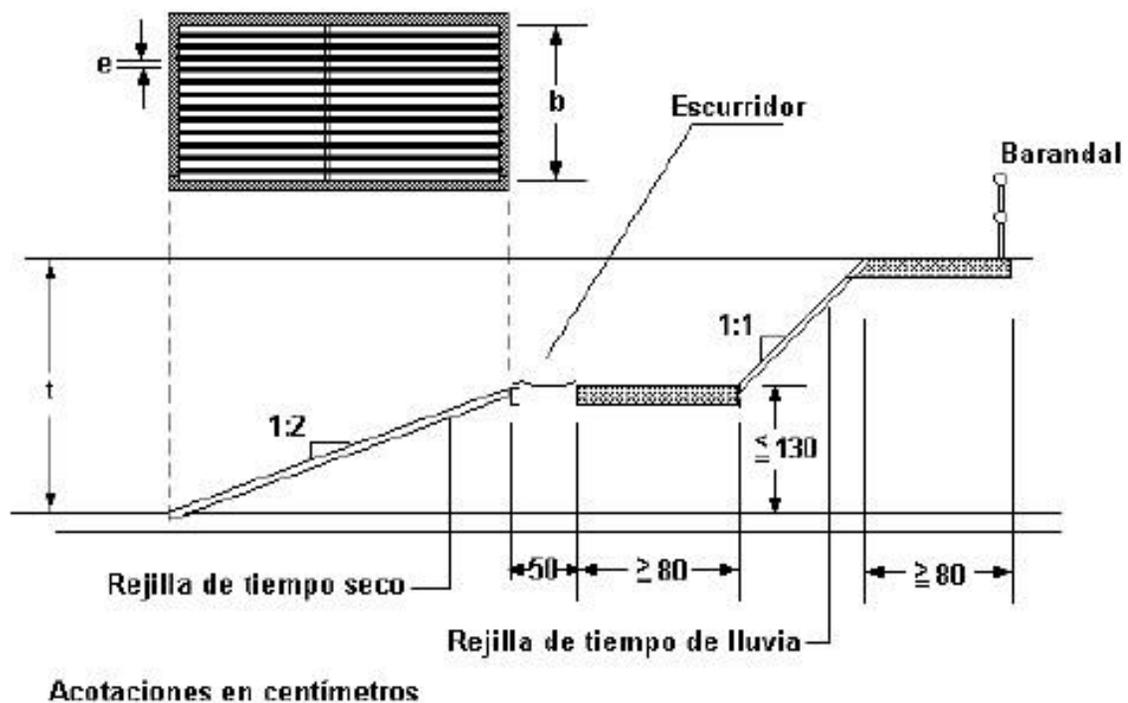
**Rejillas.** Las rejillas (o rejillas) se pueden clasificar como rejillas de basura, de limpieza manual o mecánica. Las rejillas de basura tienen aberturas grandes de 40 a 150 mm, y su objetivo es evitar que pasen a la planta objetos muy grandes, como troncos. Las rejillas de limpieza manual tienen aberturas de 25 a 50 mm. No se emplean con frecuencia las rejillas de limpieza manual, ya que es un trabajo arduo y lento. Las rejillas de limpieza mecánica tienen aberturas de 5 a 50 mm. Las velocidades máximas de entrada a las rejillas van de 0.6 a 1.2 m.s<sup>-1</sup> (Valdés y Vázquez, 2003).

Se debe tener cuidado durante la época de lluvia, ya que la velocidad del flujo se incrementa. Bajo estas condiciones se recomienda que la velocidad máxima sea de 2.0 m/s. Se deben diseñar dos canales con la finalidad de dividir el gasto y, en consecuencia, disminuir la velocidad de flujo en tiempo de lluvia



Independientemente del tipo de reja, se instalan dos canales en paralelo con rejas para que una de ellas pueda salir de servicio para limpieza y reparación. Observa las siguientes figuras que muestran todo lo anterior.

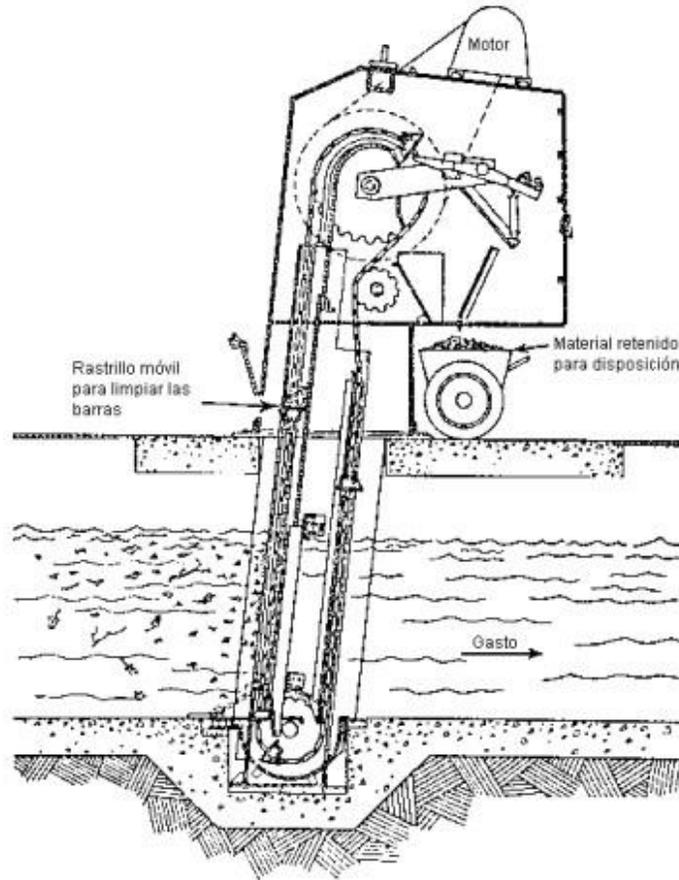
Figura 3. Ejemplo de proporciones de una rejilla de limpieza manual.



Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.



Figura 4. Esquema de una rejilla de limpieza mecánica.



Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.

En la rejilla de limpieza manual la basura se acumula sobre la rejilla y dependerá de la cantidad de ésta la frecuencia con el que el operador limpie dicha rejilla. A diferencia de la rejilla de limpieza mecánica (Figura 3), esta limpieza se realiza mediante unas canastillas manejadas a través de un motor, en donde constantemente se depositan la basura y la saca al exterior del agua.

**Desarenadores.** Para la remoción de sólidos gruesos se utiliza el cribado en la fase inicial del tratamiento (pretratamiento) y la sedimentación se usa para reducir el contenido de arenas y sólidos densos en equipos conocidos como desarenadores. El equipo mecánico y electromecánico se desgasta con mayor rapidez debido a la arena. Durante la época de lluvias se arrastra gran cantidad de este material por lo que es



necesario que su diseño considere el manejo eficiente del agua en esta época, ya que es cuando más se requiere de los desarenadores.

Existen tres tipos básicos de desarenadores: los de flujo horizontal (control de velocidad y de nivel constante), los aireados y los de vórtice (Calderón, 2013):

- **Desarenadores de control de velocidad.** La arena en el agua residual tiene una (densidad) gravedad específica entre 1.5 y 2.7, mientras que la densidad de la materia orgánica es ligeramente superior que la del agua. Por ello, la sedimentación diferencial es un mecanismo seguro para la separación de la arena.
- **Desarenadores rectangulares de nivel constante.** 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.
- **Desarenadores aireados.** Se emplean para una remoción selectiva de arena. Son tanques con flujo en espiral que se genera 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.
- **Desarenadores de vórtice.** Trabajan con un flujo tipo vórtice, aprovecha las fuerzas centrífuga y gravitacional. El agua a tratar se introduce en forma tangencial cerca del fondo y sale en forma tangencial a través de la abertura en la parte superior del tanque. Dentro de la unidad se crea un vórtice libre. De acuerdo con su tamaño, densidad y fuerza de arrastre, algunas partículas son retenidas dentro del vórtice mientras que otras son arrastradas fuera del equipo.



Para revisar más sobre desarenadores puedes leer las páginas 20 a 23 del documento publicado por la SEMARNAT y CONAGUA del *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Consúltalo en la liga:  
<http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro25.pdf>



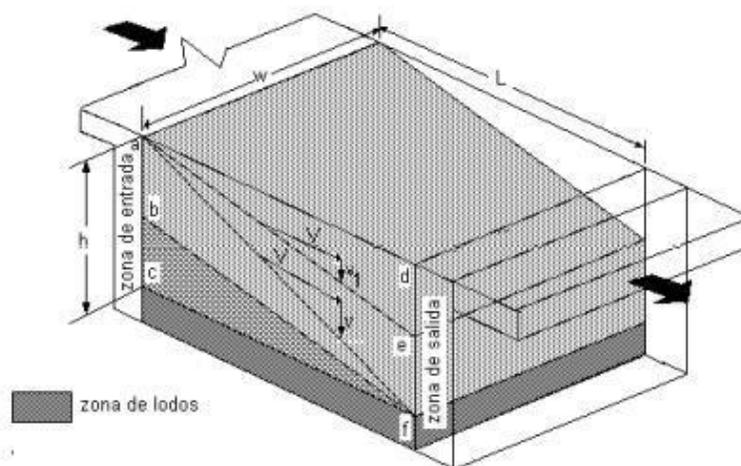
El diseño de los desarenadores se basa en el concepto del tanque ideal. Toda partícula que entra al tanque tiene una velocidad horizontal igual a la del líquido y una vertical ( $v_t$ ), igual a la velocidad final de sedimentación definida por la Ley de Stokes (Valdés y Vázquez, 2003).

#### Recuerda que:

**La Ley de Stokes** establece que la velocidad de sedimentación es proporcional a la diferencia de densidades de los materiales respectivos (partícula, fluido), a la fuerza de gravedad y al cuadrado del radio de la partícula e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido (Delgado, Gutiérrez, Salazar, Guevara, Mercad, y Pereira, 2013).

A continuación, observa en la figura 4 un esquema de un tanque de desarenador, en donde se pueden revisar las capas de arena para que la partícula pueda ser eliminada. La resultante de sus velocidades de sedimentación y horizontal debe conducirla al fondo del tanque antes de alcanzar la denominada zona de salida. Se recomienda que la velocidad horizontal sea menor que la velocidad de arrastre para que no se re suspendan las partículas.

Figura 5. Tanque de desarenador ideal.



Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.



**Flotación.** En esta técnica se trata de que los sólidos, cuya densidad es menor que la del agua, floten en la superficie y se retiren por decantación. Para la flotación se utilizan sustancias espumantes y microburbujas de aire. La *flotación* es un proceso de clarificación primaria particularmente efectivo para tratar aguas con baja turbiedad, altamente coloreadas y con gran contenido de algas. Consiste en la separación de las partículas naturales presentes en el agua cruda, coaguladas o floculadas mediante el uso de sales de aluminio o de hierro y de polímeros (CEPIS/OPS, 2004).

Por tanto, se puede decir que el objetivo de esta técnica de tratamiento primario es doble: reducción de materias flotantes y reducción de sólidos suspendidos.

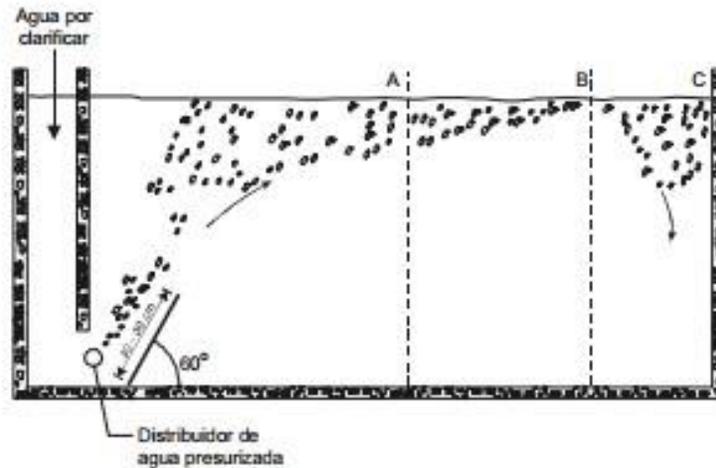
La creación de microburbujas en el proceso se realiza a través de los siguientes pasos, de acuerdo con CONAGUA (2007d):

1. **Agua de dispersión.** El agua se satura de aire en un tanque de alta presión (de 4 a 7 kg/cm<sup>2</sup>). 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 entre 5 y 15% del volumen de la 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; es decir, se debe aumentar el agua de dispersión.
2. **Inyección de aire a presión.** Es 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 3 a 4 kilogramos por centímetro cuadrado.

En la siguiente figura se muestra una cámara de flotación en donde puedes observar cómo en este tanque se distribuye el agua presurizada (agua a dispersión).



Figura 6. Cámara de flotación rectangular.



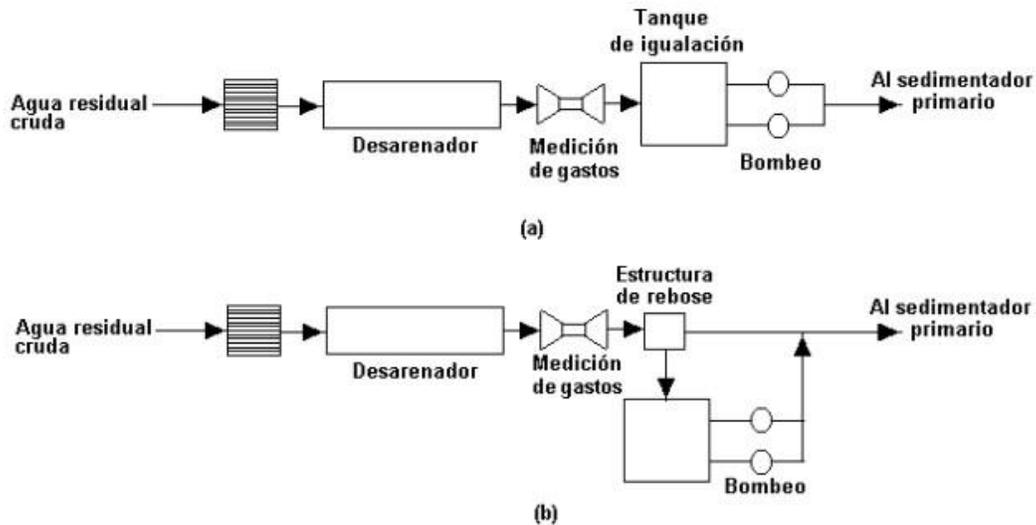
Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.

**Igualación.** En la mayor parte de las poblaciones la pauta de actividades diarias establece el patrón de flujo y la concentración de las aguas residuales. En estas aguas los flujos y las concentraciones mayores al promedio ocurren a media mañana. La cantidad y concentración (continuamente variables del agua residual que se trata) dificultan el funcionamiento eficiente del tratamiento de agua. Además, muchas técnicas se diseñan de acuerdo con las condiciones máximas de flujo que se encuentren, lo que en realidad desemboca en que estén sobredimensionadas con respecto de las condiciones promedio. El objetivo de la igualación es determinar esas variaciones y que el agua residual se pueda tratar a un flujo casi constante. La igualación de flujo mejora mucho la eficiencia de una planta de tratamiento residual y aumenta su capacidad útil.

La igualación del flujo se suele lograr construyendo grandes estanques que reciben y guardan el flujo del agua residual, de donde se bombea a la planta de tratamiento a una velocidad constante. Normalmente, los tanques de igualación se localizan al principio del tren de tratamiento de agua, después de las rejillas y las cámaras de desarenado. En los tanques de igualación se debe proporcionar una aireación y un mezclado adecuados para evitar malos olores y asentamiento de los sólidos. En la siguiente figura observa un tanque de igualación (Valdés y Vázquez, 2003).



Figura 7. Tanque de igualación. Flujo para la igualación del gasto: (a) unidad en línea y (b) unidad de derivación.

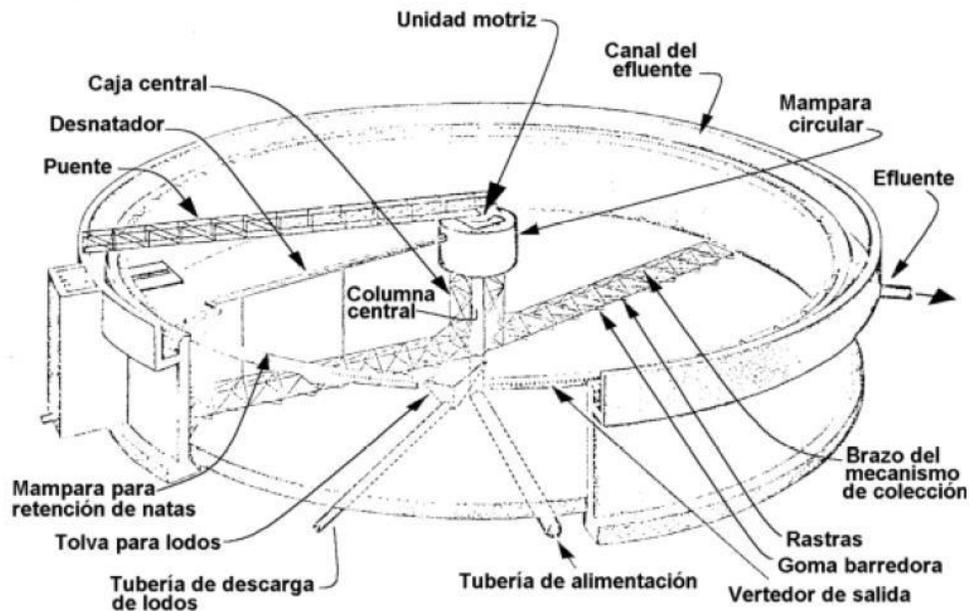


Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.

**Sedimentador.** Consiste en la sedimentación de los sólidos orgánicos suspendidos del agua residual dentro de un tanque adecuado durante un lapso de 0.5 a 3 horas o más para permitir que del 40 a 65% de los sólidos se deposite en el fondo del tanque, de donde se extraen por medio de la purga de lodos. Para favorecer esta deposición de los contaminantes, en el fondo se combina con la técnica de precipitación-coagulación para favorecer la formación de flóculos, y que éstos por su tamaño se precipiten en el fondo del tanque.



Figura 8. Esquema de un sedimentador circular.



Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.

En la figura se observa el corte de un sedimentador circular donde los dispositivos (rastras) chocan los flóculos y se precipitan al fondo del sedimentador. El agua sobrenadante se retira del sedimentador por medio de decantación hacia el canal del efluente.

Hasta aquí, se han dado las características principales de las técnicas de tratamiento primario usadas tanto para potabilizadoras como para plantas de tratamiento de agua residual; el siguiente apartado debe presentar los criterios de selección; sin embargo, en el tratamiento primario las técnicas no se someten a selección, ya que todas ellas son importantes para mejorar la eficiencia y vida útil de la planta potabilizadora o de tratamiento de aguas residuales. Por ello, se hará énfasis de la importancia de cada una de las técnicas de tratamiento primario.



### 2.1.2. Criterios de selección

Para el caso de los tratamientos primarios, la utilización de todas las técnicas es más una práctica obligada para coadyuvar al mejor tratamiento del agua, ya sea para potabilizar o para someter a tratamiento el agua residual. A continuación, se enlista información de suma importancia para tomarse en cuenta en cada una de las diferentes técnicas de tratamiento primario, aunque en este caso no son criterios de selección en el sentido estricto, pues deben de considerarse como básicas en el tren de tratamiento. Esta información se presenta en forma de ventajas, desventajas, aplicaciones y puntos a considerar, en los que se debe centrar cada técnica de tratamiento primario para su selección. Revisa la siguiente tabla.

Tabla 3. Criterios de selección para las técnicas de tratamiento primario.

Técnica	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones	Puntos a considerar en la selección
<b>Ajuste de pH</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Control de corrosión</li> <li>Control del pH en el agua para facilitar el crecimiento bacteriano en técnicas de tratamiento secundario</li> </ul>	<input type="checkbox"/> Ninguna	<input type="checkbox"/> En todo tipo de tratamiento, ya sea potabilización o de tratamiento de aguas residuales, se requiere que el pH esté en un rango que evite corrosiones a la infraestructura	Se debe mantener el pH cercano a siete, pH superiores a 11 se relacionan con irritación ocular y agravación de trastornos cutáneos. La OMS no establece un valor guía, pero recomienda su control para una adecuada operación de la planta de tratamiento o potabilizadora no mayor a ocho.
<b>Rejillas</b>	<input type="checkbox"/> Evita que la basura o el exceso de arena interfiera en la eficiencia de las técnicas subsecuentes	<input type="checkbox"/> Ninguna	<ul style="list-style-type: none"> <li>Eliminar basura</li> <li>Eliminar arenas</li> </ul>	Es recomendable que el agua tenga una velocidad de, al menos 0.5 m/s para asegurar un flujo laminar.



<b>Desarenadores</b>	<input type="checkbox"/> Elimina arenas finas	<input type="checkbox"/> Ninguna	<input type="checkbox"/> Elimina turbidez al agua	Para plantas pequeñas es común
	<input type="checkbox"/> Elimina sólidos suspendidos sedimentables			diseñar tanques de tipo circular por la facilidad para remover los lodos, éstos deben removerse de los tanques desarenadores o sedimentadores para evitar condiciones anaerobias
<b>Flotación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere menos tiempo que la decantación y permite una mayor carga de sólidos en el agua</li> <li>• Alta eficiencia en la remoción de sólidos</li> <li>• Menor área requerida para instalación</li> <li>• Remoción de microorganismos y precipitados difíciles de sedimentar</li> <li>• Alta tasa de separación</li> <li>• Más eficiencia para remoción de DBO5 que otros procesos de separación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensible a variaciones de temperatura, sólidos en suspensión, recargas hidráulicas, variaciones químicas y fisicoquímicas, comparado con procesos de sedimentación</li> <li>• Costos operacionales elevados cuando existe un control riguroso automático de parámetros</li> </ul>	<input type="checkbox"/> Este proceso permite generar una capa flotante en suspensión que logra la separación sólido líquido. Con ello se consigue una efectiva remoción de sólidos suspendidos, aceites, grasas y materia orgánica particulada (DBO5)	En los sistemas de flotación se debe tener en cuenta para la concentración de partículas suspendidas la cantidad de aire, la velocidad ascensional de las partículas, la tasa de aplicación y tratamiento químico, ya que estas propiedades pueden influir en la eficiencia de la flotación



<p><b>Igualación</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Homogeneizar la calidad del agua</li> <li>• Garantiza un caudal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere espacio constructivo</li> <li>• Requiere de bombas para el</li> </ul>	<p>☐ Sobre todo en caudales variables, este tanque almacena y coadyuva a un</p>	<p>Debe cumplir con la homogeneización del agua a potabilizar o que se someterá a tratamiento para</p>
	<p>constante que entrará a la planta de tratamiento o potabilizadora</p>	<p>mezclado en este tanque y para la oxigenación</p>	<p>control del gasto que entra a la planta de tratamiento</p>	<p>garantizar la calidad del agua, evitando así la variación de caudal, de temperatura, de desarrollo de algas, así como contaminación exterior</p>



<p><b>Sedimentadores</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La separación por gravedad es un método económico, ya que no utiliza reactivos</li> <li>• No requiere energía para la separación, sólo se consume por concepto de bombeo de alimentación</li> <li>• Sin necesidad de ser operado por personal capacitado</li> <li>• Sistemas compactos, de simple implementación y mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Recuperación rápida y eficiente a bajo costo</li> <li>• Bajo costo de inversión, operación y mantenimiento</li> <li>□</li> <li>□</li> <li>• Es una operación no contaminante, ya que no emplea reactivos químicos ni aditivos que puedan contaminar el medio ambiente</li> <li>• Generalmente, son construidos con piezas de acero inoxidable resistentes a la corrosión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Tratamiento primario de aguas residuales domésticas e industriales</li> <li>□ Se utiliza también en el tratamiento de lodos residuales. Adicionalmente, se aplica en minería, alimentos, pinturas, celulosas, tratamiento de aguas servidas, acuícola, entre otros</li> </ul>	<p>Tener cuidado de que el contaminante que se desea remover tenga una densidad mayor que la del agua</p>
<p>Fuentes: CONAGUA, 2007a; Valdés y Vázquez, 2003; CEPIS/OPS, 2004; y CONAMA, 2013.</p>				



Como ejemplo de la selección de un tren de tratamiento primario puedes revisar el capítulo 5 de la tesis *Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el Municipio de San Andrés Cholula*, donde se enfoca al tratamiento primario. Para ello, consulta la siguiente liga:  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lic/hammeken\\_a\\_am/indice.html](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/hammeken_a_am/indice.html)



Como estas técnicas no se pueden ignorar en el diseño de las plantas potabilizadoras o de tratamiento de agua residual, los parámetros dependen básicamente del gasto ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) de diseño de la planta de tratamiento, es por ello que en el siguiente apartado se presenta el procedimiento que debe seguirse para el cálculo del gasto en cuestión.

### 2.1.3. Cuantificación de volumen

Para que las técnicas de tratamiento estén diseñadas adecuadamente es necesario utilizar para los cálculos, datos de un periodo de planeación en el cual se analiza la información del agua a tratar en cuanto a calidad y cantidad de un periodo que, usualmente, varía entre 10 y 20 años. Es importante mencionar que el crecimiento de algunas regiones puede acortar dicho periodo, pero también los cambios en las actividades económicas de la región (migración y cierre de industrias), ello es particular para cada caso pues pueden provocar un efecto contrario y dejar sobredimensionada una planta potabilizadora o de tratamiento (CONAGUA, 2007a).

Se debe considerar también qué zonas recibirán el agua producida por la planta potabilizadora o en donde se tratarán las aguas residuales para definir *a grosso modo* las características de la población. Durante esta identificación de características del sitio, se pueden incluso definir áreas que sean ocasionalmente provistas del recurso (CONAGUA, 2007a). Asimismo, hay que definir el gasto ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) al cual la potabilizadora o la planta de tratamiento de aguas residuales trabajará una vez estando en operación, a este gasto se le conoce también en la literatura como capacidad de la planta. Por ello, a continuación, se describe el cálculo de los diferentes gastos que se consideran tanto en una potabilizadora como en una planta de tratamiento.

#### Determinación del gasto en una potabilizadora

Para calcular el gasto de operación de una potabilizadora y aplicar un método de determinación, por ejemplo, el aritmético se realiza a través del nivel de complejidad del sistema, la determinación del periodo de diseño, del cálculo del nivel de complejidad, cuyos cálculos se describirán a continuación. Para ello, se debe de contar con la siguiente información previa:

- Población actual y futura.
- Demanda de agua para esa población por día (este dato se calcula a partir del anterior).

En el caso de una potabilizadora se determina por la demanda diaria máxima, así como por la demanda futura de la población (CONAGUA, 2007a). La demanda



máxima diaria se calcula a partir de datos de población de las localidades que muestran su historia, características y tendencias de desarrollo, estos datos se obtienen de los censos de población y vivienda que realiza el INEGI (INEGI, 2010). Los factores más importantes que influyen en el crecimiento de la población son los nacimientos, las muertes y las migraciones de población (aumento o disminución). Algunas localidades tienen población flotante considerable que debe tenerse en cuenta al calcular la población.

En caso de una expansión de una planta potabilizadora existente, la mejor estimación se obtiene de las características propias del comportamiento y tendencias a futuro de la planta potabilizadora.

Debe ajustarse la proyección de la población para tener en cuenta la flotante, de acuerdo con los estudios socioeconómicos disponibles para la población. En el cálculo de la población por abastecer se deben considerar actividades turísticas, laborales, industriales y comerciales que representen población flotante (UNAD, 2013).

En el caso de que existan posibilidades de migración hacia una localidad, esta debe tenerse presente en los estudios de proyección de la población.

A continuación, se muestra uno de los métodos más usados para esta estimación poblacional a futuro, dichos cálculos pueden utilizarse para la estimación de gastos ( $m^3/s$ ) de diseño, tanto para potabilizadoras como para plantas de tratamiento de agua residual.

### Método aritmético

Se infiere un crecimiento poblacional balanceado por la mortalidad y la emigración. Se supone que la tasa de variación de la población con el tiempo es constante (UNAD, 2013):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = K$$

Siendo:

$K$ : Tasa de variación de la población con el tiempo.

$\partial P/\partial t$ : Derivada parcial de la población con respecto al tiempo.



Integrando la ecuación entre los límites  $t_i$ , año inicial; y  $t_f$ , año final, se tiene:

$$\int_{P_i}^{P_f} \partial P = K \int_{t_i}^{t_f} \partial t = K (t_f - t_i)$$

$$P_f - P_i = K (t_f - t_i)$$

$$P_f = P_i + K (t_f - t_i)$$

Siendo:

$P_f$  = población para un año futuro (año de predicción)

$P_i$  = población del año inicial o año básico

$t_f$  = tiempo futuro

$t_i$  = tiempo inicial

La constante K se puede calcular de manera simplificada como:

$$K = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1}$$

En la cual  $P_2$  y  $P_1$  son las poblaciones de los años  $t_2$  y  $t_1$  obtenidos de la información existente. La aplicación exacta de la fórmula implica no tener en cuenta la dinámica de crecimiento en los años intermedios con información censal.

Por tanto, se sugiere que a los resultados obtenidos se les haga un análisis de sensibilidad, teniendo en cuenta las siguientes variaciones metodológicas:

- Usar como año inicial para la proyección cada uno de los existentes entre el primero y el penúltimo censo.
- Calcular una tasa de crecimiento poblacional representativa de la dinámica entre los diferentes datos censales disponibles, y con ésta realizar las proyecciones a partir de los datos del último censo.

Más adelante, se ejemplifica la aplicación de las fórmulas de estimación de la población, nivel de complejidad y periodo de diseño máximo.



**Análisis de sensibilidad.** Comprueba cómo la tasa de crecimiento de la población responde a pequeños cambios en cada uno de los parámetros del modelo (Barroso y San Joaquín, 2009).

Como complemento para la estimación a futuro de la población se requiere determinar, con base en la población proyectada, el nivel de complejidad del sistema que se está evaluando; para ello, a continuación, se describe cómo se establece este dato.

### Determinación del nivel de complejidad del sistema

Con los datos de población proyectada, los cuales se obtienen por el método aritmético se puede identificar el nivel de complejidad del sistema, este, a su vez, servirá para determinar el periodo de diseño y se obtiene de la siguiente tabla. El valor de nivel de complejidad depende solo del número de población de la localidad donde se vaya a construir la potabilizadora o la planta de tratamiento de agua residual.

Tabla 4. Nivel de complejidad del sistema.

Nivel de complejidad	Población en la zona urbana (habitantes)	Capacidad económica de los usuarios
Bajo	< 2500	Baja
Medio	2501 a 12500	Baja
Medio alto	12501 a 60000	Media
Alto	>60000	Alta

Fuente: UNAD, 2013.

En la tabla se muestra que de acuerdo con diferentes rangos de población proyectada corresponde un nivel de complejidad. La selección es fácil, solo hay que ver en qué rango entra la población proyectada calculada y verificar en la tabla a qué nivel de complejidad le corresponde. Además de este dato se requiere determinar el periodo de diseño.



### Determinación del periodo de diseño

Para iniciar los cálculos de diseño de una potabilizadora o de una planta de tratamiento de aguas residuales, se debe establecer la vida útil de la planta; es decir, el periodo de diseño máximo, en el cual la planta funcionará bajo los gastos ( $m^3/s$ ) calculados para la población proyectada a futuro. Este periodo de diseño se conjetura dependiendo del nivel de complejidad del sistema calculado arriba.

Tabla 5. Periodo máximo de diseño para todos los componentes de acueducto.

Nivel de complejidad del sistema	Periodo de diseño máximo
Bajo, medio y medio alto	25 años
Alto	30 años

Fuente: UNAD, 2013.

A continuación, se presenta un ejemplo para la estimación de la proyección de población, nivel de complejidad y periodo de diseño máximo; éstos sirven para definir el periodo de diseño, el cálculo de todos los volúmenes y dimensionamiento de las técnicas, inclusive el gasto.

### Ejemplo:

Teniendo en cuenta los datos del censo de población, se realiza la siguiente tabla sobre una localidad cualquiera:

Tabla 6. Datos poblacionales

Año	Población
1993	24,909
2005	31,806
2010	34,402

Se tiene que para un periodo de diseño máximo de una población de 25 años a partir del 2012 (en el 2037), sería así:

**Cálculo de los tiempos**  $t_2 - t_1 = 2005 - 1993 = 12$  años;  $t_f - t_i = 2037 - 2005 = 32$  años

**Cálculo de las poblaciones**  $p_2 - p_1 = 31806 - 24909 = 6897$  habitantes



Determinación de K:

$$K = P \frac{2 - P_1}{t_2 - t_1}$$

$$K = 6897/12 = 574.75$$

**Cálculo población futura**  $pf = p_2 + K (tf - ti) = 31806 + 574 (32) = 50198 \text{ hab}$

Con el método aritmético se obtiene una población de 50.198 habitantes para el año 2037.

Si se realiza el mismo procedimiento para la proyección de una población a 30 años a partir del 2012 se tendría que la población futura para el 2042 es de 53,072 habitantes.

Una vez calculada la proyección de la población, se debe calcular el nivel de complejidad del sistema.

### Cálculo del nivel de complejidad

Según el ejemplo anterior, la localidad con población proyectada a 25 o 30 años no sobrepasa los 60,000 habitantes. Analizando la Tabla 6, se obtiene que el nivel de complejidad de la localidad del ejemplo es *medio alto*.

La parte del suministro de agua potable que se utiliza sin considerar las pérdidas se conoce como consumo y se expresa en m<sup>3</sup>/día o L/hab/día. El *gasto medio diario* es el agua que un usuario o población necesita en un día de consumo promedio y para una localidad se calcula de la siguiente manera (CONAGUA, 2007a):

$$Q_{med} = \frac{D \times P}{86400}$$

Donde:

$Q_{med}$ : Gasto medio diario en L/s

D= Dotación en L/hab/d

P= Población de proyecto, número de habitantes

86400= Número de segundos al día



**Dotación.** Es la cantidad de agua que se le asigna a cada habitante para su consumo, considerando todos los consumos de los servicios y las pérdidas físicas en el sistema, en un día medio anual y sus unidades están dadas en L/hab/día (Jiménez, 2013).

**Día medio anual.** El consumo de agua de una población varía con las horas del día, con los días de la semana y con las épocas del año. Es por ello que un día medio anual se considera como el promedio diario de agua a partir de los datos de todo un año.



Como ejemplo del diseño de una planta potabilizadora puedes consultar la tesis *Proyecto hidráulico para ampliación en la capacidad de tratamiento a planta potabilizadora N°1 del Municipio de H. Matamoros, Tamaulipas*, donde se presenta ejemplos de cálculos para la ampliación de la capacidad de una potabilizadora en Tamaulipas. La puedes encontrar en la sección *Para saber más*.



Para conocer cómo se calcula el porcentaje de remoción, **observa** el video *Cálculo de gasto en una planta potabilizadora* este lo podrás revisar en el canal de YouTube de Tecnología Ambiental a través de la siguiente liga:

[https://www.youtube.com/watch?v=joe\\_A6422pc&index=36&list=PL660480148A0EED61](https://www.youtube.com/watch?v=joe_A6422pc&index=36&list=PL660480148A0EED61)

### Determinación del gasto en una planta de tratamiento de agua residual

De la misma manera que el gasto en plantas potabilizadoras, el cálculo del gasto de diseño de una planta de tratamiento de agua residual se calcula con base en la población en condiciones actuales y futuras de la localidad. Para hacerlo, se debe tomar en cuenta los gastos de diseño, el gasto medio, el gasto mínimo, gasto máximo instantáneo y gasto máximo extraordinario, que a continuación se presentan:



### Gastos de diseño

Los gastos que se consideran en el diseño de plantas de tratamiento de agua residual son medio, mínimo, máximo instantáneo y máximo extraordinario. Los tres últimos se determinan a partir del primero (CONAGUA, 2007c).

### Gasto medio

Es el valor del caudal de aguas residuales en un día de aportación promedio al año. En función de la población y de la aportación el gasto medio de aguas residuales en cada tramo de la red (CONAGUA, 2007c), se calcula con:

$$Q_{med} = \frac{A_p \times P}{86400}$$

Donde:

$Q_{med}$  = gasto medio de aguas residuales diario en L/s

$A_p$  = aportación de aguas residuales por habitante en L/hab/d

$P$  = población, en número de habitantes

86400 = número de segundos al día

**Aportación de aguas residuales:** así se considera a la cantidad de agua residual que genera una persona por día. Para poblaciones rurales se considera de 80 a 150 L/hab/día de agua residual. Para grandes ciudades se considera de 150 a 200 L/hab/día de agua residual. (CONAMA, 2013a).

**Caudal o gasto:** Es la cantidad o volumen de agua que pasa por la sección transversal de un conducto, cauce o canal en una unidad de tiempo; se mide en metros cúbicos por segundo ( $m^3/s$ ), también puede expresarse en litros por segundo, por minuto, etcétera. (CONAGUA, 2012).



Para diseñar plantas de tratamiento en poblados cuyas aguas contienen aguas residuales procedentes de industrias, se debe cumplir con la normatividad correspondiente (NOM- 002- ECOL- 1996) para unirse a la red de alcantarillado, y los volúmenes de agua residual procedente de las industrias se deben de sumar al gasto medio calculado originalmente para la planta de tratamiento considerando sólo la población que genera las aguas residuales.

### Gasto mínimo

El gasto mínimo,  $Q_{min}$ , es el menor de los valores de caudal que normalmente se presenta en un conducto o tubería de la planta. Se acepta que este valor es igual a la mitad del gasto medio (CONAGUA, 2007c).

$$Q_{min} = 0.5 Q_{med}$$

Donde:

$Q_{min}$ : Gasto mínimo de aguas residuales L/s

$Q_{med}$ : Gasto medio de aguas residuales diario en L/s

### Gasto máximo instantáneo

Es el valor máximo de caudal que se puede presentar en un instante dado. Para evaluar este gasto se consideran criterios ajenos a las condiciones socioeconómicas de cada lugar (CONAGUA, 2007c).

El gasto máximo instantáneo se obtiene a partir del coeficiente de Harmon (M):

$$M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{P}}$$

Donde:

$P$  = Población beneficiada con la infraestructura, en miles de habitantes

$M$  = Coeficiente constante que varía de acuerdo con la población  $P$

Cuando  $P$  es menor de 1,000 habitantes,  $M = 3.8$

Cuando  $P$  es mayor de 63,454 habitantes,  $M = 2.17$

Por lo que el cálculo del gasto máximo instantáneo queda como:

$$Q_{minst} = MQ_{med}$$



Donde:

$Q_{minst}$  : Gasto máximo instantáneo, en L/s.

$M$  = Coeficiente de Harmon o de variación máxima instantánea

### Gasto máximo extraordinario

Se presenta cuando el caudal considera eventos extraordinarios que aportan gran cantidad de agua a las aguas residuales, por ejemplo, bajadas de aguas pluviales de azoteas, patios o las provocadas por un crecimiento demográfico explosivo no considerado (CONAGUA, 2007c).

Con base en el gasto máximo extraordinario se define el diámetro adecuado de las tuberías y conductos en la planta de tratamiento de agua residual, con ello se establece un margen de seguridad para que la planta pueda ser capaz de funcionar adecuadamente con el aporte de gastos ( $m^3/s$ ) extraordinario.

Para el cálculo del gasto máximo extraordinario es necesario establecer un coeficiente de seguridad; este será de uno cuando se diseñe una nueva planta de tratamiento de aguas residuales, y de 1.5 cuando se rehabilite y se diseñe una ampliación a una planta de tratamiento de aguas residuales preexistente.

La expresión para el cálculo del gasto máximo extraordinario resulta:

$$Q_{mext} = CSQ_{minst}$$

Donde:

$Q_{mext}$ : Gasto máximo extraordinario, en L/s

CS = Coeficiente de seguridad

$Q_{minst}$ : Gasto máximo instantáneo, en L/s



En las plantas potabilizadoras y en las de tratamiento de agua residual se deben establecer cálculos de presiones y cargas hidráulicas en los conductos y unidades físicas de cada técnica, estos cálculos se realizan por un experto en hidráulica para que el flujo del agua en cada técnica de tratamiento y el paso de una técnica a otra sea los más económicamente rentable, para ello debe de aprovecharse el flujo por gravedad. Estos cálculos los podrás revisar con más detalle en el *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: datos básicos*, que elaboró la CONAGUA. Consúltalo en la sección *Para saber más*.



Para conocer cómo se calcula el porcentaje de remoción, **observa** en el canal de *YouTube* de Tecnología Ambiental, el video *Cálculo de complejidad y gasto en una PTAR*. Disponible en:  
[https://www.youtube.com/watch?v=-D\\_KhtfwRrl&index=35&list=PL660480148A0EED61](https://www.youtube.com/watch?v=-D_KhtfwRrl&index=35&list=PL660480148A0EED61)

### Ejemplo:

A continuación, se realiza el ejercicio de los cálculos necesarios para una planta de tratamiento de aguas residuales para la misma población del ejemplo de la potabilizadora.

### Cálculo de gasto medio

$$Q_{med} = \frac{A_p \times P}{86400} = \frac{150 \times 53,072}{86400} = 92.13 \text{ L. hab/s}$$

### Cálculo del gasto mínimo



$$Q_{min} = 0.5(92.13) = 46.06 \text{ L.hab/s}$$

### Cálculo de gasto máximo instantáneo

Considerando  $M=2.17$

$$Q_{minst} = MQ_{med} = 2.17 (92.13) = 199.92 \text{ L/hab/s}$$

### Cálculo de gasto máximo extraordinario

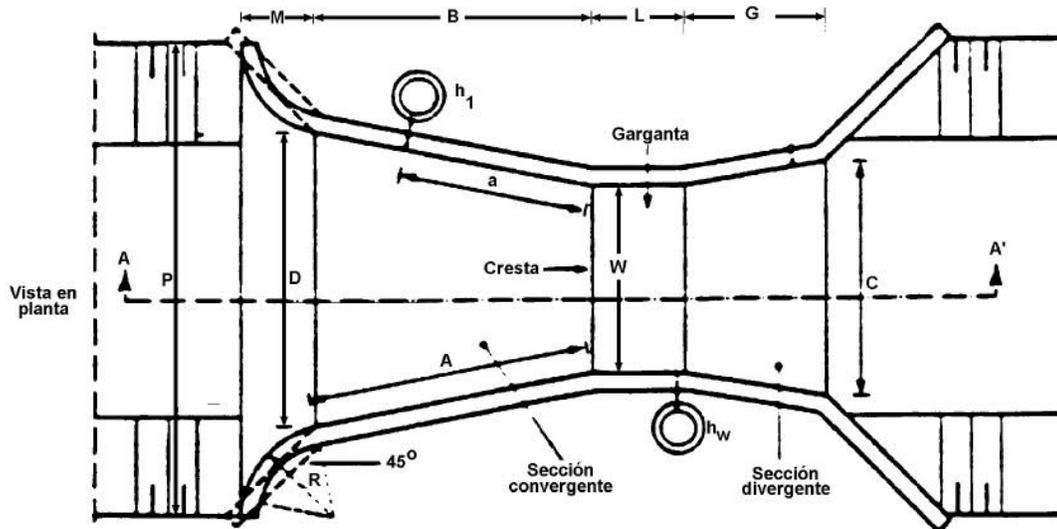
Considerando  $CS=1$

$$Q_{mext} = CSQ_{minst} = 1(199.92) \text{ L/hab/s}$$

Una vez calculados los gastos de operación, los cuales servirán de base para el cálculo de las dimensiones de cada técnica, y dentro de las técnicas de tratamiento primario, se corrobora el gasto que entrará al tren completo de tratamiento con dispositivos de medición, como los son el medidor de canal de Parshall y los vertedores triangulares de pared delgada. Cuando el diámetro del tubo de entrada del agua a la planta es menor a 20 cm se utilizan medidores de bajo caudal, como lo es el Venturi o por inducción magnética (Valdés y Vázquez, 2003). A continuación, se describen las características del canal Parshall y de los vertedores triangulares de pared delgada.

**Canal de Parshall.** Es un dispositivo bastante exacto con el que se mide el caudal (gasto) que entra a la planta de tratamiento o potabilizadora. En un momento dado esta medición se denomina también aforo. La construcción de este dispositivo puede ser de cemento, pero también existen dispositivos prefabricados. La forma particular que tiene este canal permite calcular el gasto a partir de una sola medida de altura de agua en cm, que se le denomina tirante (Valdés y Vázquez, 2003). Existen canales Parshall automatizados para medir gasto en tiempo real. Es muy útil para verificar la velocidad del agua que entra a los desarenadores.

Figura 9. Canal Parshall.



Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.

En la figura se aprecia la vista superior de la configuración de un canal Parshall, su peculiar forma permite, a través de una sola medida, calcular el gasto con exactitud.

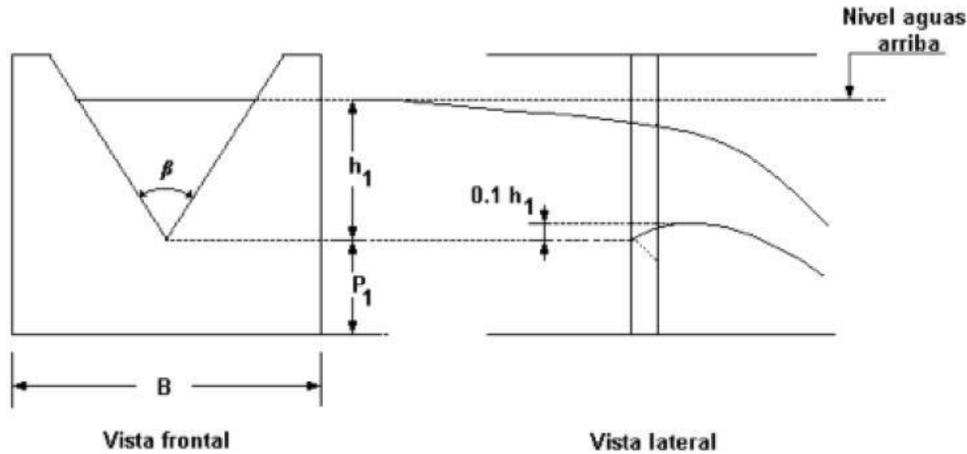
Otro modelo de medidor de caudal son los vertedores triangulares de pared delgada, a continuación, se describe sus características principales.



Si quieres conocer cuáles son los principios de operación del aforador del instalador Parshall, **revisa** el libro *Canal Parshall* del autor Pedroza González en el segundo capítulo con este mismo tema. Encuéntralo en la carpeta *Material de estudio*.

**Vertedores triangulares de pared delgada.** La medición del gasto mediante un vertedor triangular consiste en la medida de altura de agua en cm (se le denomina tirante), sobre una de las paredes internas del vertedor.

Figura 10. Vertedor triangular.



Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.

En la figura se muestra la sección transversal (vista frontal) de un vertedor triangular de pared delgada sobre la cual se realiza la medición. En la parte derecha de la figura se observa la vista lateral donde se ve el caudal de agua medido o bien el cálculo del gasto.

Cabe reiterar que antes de iniciar la selección de las técnicas de tratamiento debes calcular los gastos de diseño y establecer algún dispositivo de medidor de caudal a la entrada de la planta potabilizadora o de tratamiento. A continuación, se describen algunos puntos a considerar en el diseño constructivo de las técnicas de tratamiento primario que así lo requieran.

**Dimensiones de las rejillas.** Los criterios para el volumen y tamaño de las rejillas son los siguientes. Los autores consideran que diversos tipos se pueden englobar en una clasificación tipo tamiz que significa cribado.

Tabla 7. Tamaño de la abertura de los cribadores de gruesos y finos o rejillas.

Tipo de tamiz	Abertura (mm)	Observaciones
Rejillas gruesas	51 a 153	Su uso estará definido por la basura presente. En algunas plantas solo se emplean las rejillas finas.
Rejillas finas	19 a 51	La abertura más común es de 25 mm.



Desmenuzadores	6 a 19	Son considerados como tamices; sin embargo, lo que hacen es cortar los materiales que se puedan atorar en las rejillas reduciendo en tamaño, tienen que ser removidos por las unidades subsecuentes. Su uso no es frecuente en México.
Tamiz fijo (estático)	2.3 a 6.4	Son muy útiles cuando se tienen limitaciones de espacio. En México no es frecuente encontrarla 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: CONAGUA, 2007a; WPCF y ASCE, 1982.

**Dimensiones del desarenador.** Están sujetos a condiciones hidráulicas importantes para mantener la velocidad de derrame de 0.3 m/s aproximadamente. Un incremento del 25 % en el volumen del agua puede provocar que la arena se resuspenda, mientras que si se reduce un 25% pueden retenerse en el canal los materiales orgánicos. Por ello, es conveniente controlar la velocidad horizontal de alguna manera. Esto se logra disponiendo un vertedor especial en el extremo de salida de los desarenadores, diseñado de tal modo que proporcione la altura de agua en los desarenadores, al gasto de la misma, con el fin de mantener así una velocidad de derrame constante (Valdés y Vázquez, 2003). Generalmente, se instala un vertedor proporcional en el extremo aguas abajo del canal. Otra solución consiste en diseñar el canal con una sección parabólica. En la siguiente figura se muestran las secciones transversales típicas de un desarenador.



Figura 11. Sección transversal de un desarenador.



Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.

En la figura 7 se muestran dos secciones transversales de desarenadores comúnmente usados en las plantas de tratamiento de aguas residuales o potabilizadoras.

**Dimensiones del tanque para la flotación.** Para esta técnica se debe construir un tanque que considere el caudal del fluido dividido por la superficie del flotador. A su vez, el caudal presurizado que generará las burbujas es función de los sólidos suspendidos; es decir, el agua con sólidos tan pequeños que no se sedimentan por su propio peso estará en función de los sólidos suspendidos, de forma directamente proporcional. Este tanque de flotación también separa los sólidos suspendidos en el agua como se hace en un decantador. La separación de los sólidos suspendidos en el agua residual depende sobre todo de la tensión superficial de la microburbuja y de la capacidad ascensional (Valdés y Vázquez, 2003).

**Dimensiones para el tanque igualador.** El volumen de un tanque de igualación se calcula a partir de un balance de masa del flujo que llega a la planta de tratamiento y el caudal promedio de la planta diseñada para someterla a tratamiento. Teniendo en cuenta que el caudal de entrada a la planta es constante durante las 24 horas, se debe disponer de un dispositivo que regule el caudal de agua que llega a la planta (flujos por arriba o abajo del promedio). Asimismo, se debe considerar la capacidad mínima importante para garantizar el abastecimiento continuo a la planta, aun en caso de reparaciones o averías y la capacidad máxima requerida en situaciones extraordinarias de flujo, para lo cual se adopta un margen de seguridad (CONAGUA, 2007a).



Tabla 8. Dimensiones para el sedimentador.

Parámetro	Intervalo	Valor típico
Tiempo de retención en horas	1.5 - 2.5	2.0
Carga superficial, en m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> d	Gasto medio 32 - 48 Gasto máximo ext. 80 - 120	100
Carga sobre el vertedor m <sup>3</sup> /m d	125 - 500	250
<i>Dimensiones, en m</i>		
<i>Rectangular</i>		
Profundidad	3 - 5	3.6
Longitud	15 - 90	25 - 40
Ancho	3 - 24	6 - 10
Velocidad de la rastra	0.6 - 1.2 m/min	1.0
<i>Dimensiones, en m</i>		
<i>circular</i>		
Profundidad		
Diámetro	3 - 5	4.5
Pendiente del fondo	3.6 - 60	12 - 45
Velocidad de la rastra	60 - 160 mm/m	80
	0.02 - 0.05 rpm	0.03

Fuente: Metcalf y Eddy, 2004.

En la tabla anterior verificarás los parámetros en los cuales puedes basar el cálculo de las dimensiones del elemento constructivo de los sedimentadores, tanto para un caso de sedimentador rectangular como para uno circular.



En 2013 CONAGUA elaboró el *Manual de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizados en Japón*, el cual da a conocer dos nuevas alternativas o procesos de tratamiento de aguas residuales municipales que pueden contribuir al saneamiento de comunidades menores a 2,500 habitantes, por lo que el dimensionamiento de las técnicas empleadas se adecúa a los reducidos espacios en Japón, ello hace novedoso los volúmenes de diseño de cada técnica.

**Consúltalo** en la sección *Para saber más*.

Las técnicas de tratamiento primario se requieren para optimizar eficiencia y evitar desgaste prematuro de las instalaciones hidráulicas en la potabilizadora o planta de tratamiento, es por ello que no se pueden prescindir. A continuación, se describen las características principales a considerar para una preselección de las técnicas de tratamiento secundario, el dimensionamiento y los cálculos para ello se presentarán y aplicarán en la unidad tres.

## 2.2. Técnicas de tratamiento secundario

Recuerda que en la primera unidad se enlistaron las técnicas que conforman un tratamiento secundario, estas son: lodos activados, discos biológicos, filtros percoladores, lagunas de estabilización y procesos biológicos anaerobios. En este apartado se te brinda más información acerca de cada técnica, así como los criterios de selección para su aplicación en un tren completo de tratamiento. Se aplican básicamente en el tratamiento de aguas residuales ya que en potabilizadoras no se utilizan los microorganismos en el tratamiento pues el agua susceptible a ser potabilizada debe contar con una calidad cercana a la que establece la NOM 127 SSA1 1994. A diferencia de las técnicas de tratamiento primario, las de tratamiento secundario no se utilizan todas, estas se seleccionan con base en la calidad del agua que se someterá a tratamiento y de la calidad del agua que se requiere al final del mismo. La siguiente figura muestra una combinación de tratamientos secundarios.



Figura 12. Ejemplos de combinación de sistemas de tratamiento secundario.



Fuente: Sorrequieta, 2004.

En la figura se muestran algunas configuraciones de tratamientos secundarios combinados con tratamientos primarios, las técnicas de tratamientos secundarios rara vez se utilizan combinados entre ellos y con técnicas terciarias.

Básicamente, las técnicas de tratamiento secundario se enfocan en la eliminación de la materia orgánica biodegradable, así como nutrientes por medios biológicos debido a su bajo costo y alta eficacia de remoción. Como bien sabes, los procesos biológicos se dividen en aerobios y anaerobios para lo cual se utilizan reactores con cultivos bacterianos que pueden ser de cultivo suspendido o adherido. En los primeros, los microorganismos se encuentran suspendidos en el agua residual en células individuales o en grupos llamados flóculos, éstos son fácilmente retirados del agua. En los reactores de cultivo adherido los microorganismos se encuentran fijos a algún medio de soporte formando una película microbiana llamada biomasa (Valdés y Vázquez, 2003).

A continuación, se presentan las características fundamentales de cada técnica de tratamiento secundario, así como sus ventajas y desventajas para que a partir de estas puedas preseleccionar las técnicas más adecuadas que se puedan aplicar en el caso asignado por tu docente en línea.

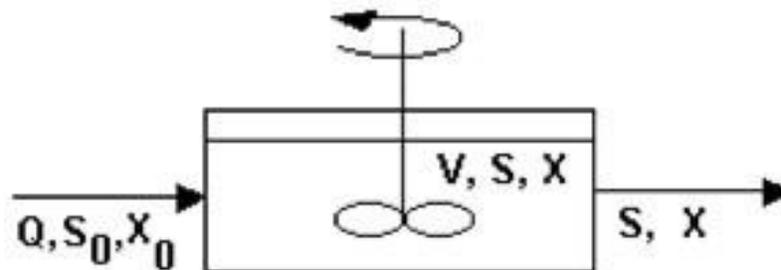


### 2.2.1. Parámetros de diseño en tratamiento secundario

En esta sección se describirán características constructivas u operativas que se deben considerar en la aplicación de cada técnica de tratamiento secundario y en los criterios de selección (apartado 2.2.2.). Se puntualizarán las ventajas y desventajas de cada técnica de tratamiento secundario y con base en ellos se preseleccionarán las técnicas que conformarán el tren completo de tratamiento.

**Lodos activados.** Es un proceso biológico de cultivo suspendido en condiciones aerobias; es decir, cuenta con oxigenación constante, los microorganismos suspendidos crecen formando agregados o flóculos. Estas masas microbianas, bajo dichas condiciones, se denominan lodos activados. En este tratamiento biológico del agua residual se eliminan los sólidos coloidales no sedimentables y se estabiliza la materia orgánica. Físicamente, consta de un tanque con aireadores donde el agua residual se retiene cierto tiempo para que los microorganismos se alimenten de la materia orgánica y de nutrientes que contiene el agua residual (Valdés y Vázquez, 2003).

Figura 13. Esquema de un tanque de lodos activados.



Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.

En el esquema anterior se muestra el influente de un gasto ( $Q$ ) con cierta carga orgánica ( $S_0$ ) y cierta concentración de microorganismos (biomasa) ( $X_0$ ), además muestra que dentro del tanque existe un volumen constante ( $V$ ).

Los parámetros que se tienen que controlar en este tanque son:

$V$  = volumen del reactor

$Q$  = gasto del influente y efluente

$X_0$  = concentración de biomasa en el influente

$X$  = concentración de biomasa en el reactor



$S$  = sustrato (materia orgánica y nutrientes del cual se alimentarán los microorganismos)

En este tipo de técnica de lodos activados la población microbiana tiene un papel muy importante ya que, con el tiempo, esta cambia. Esta modificación se representa con la expresión:

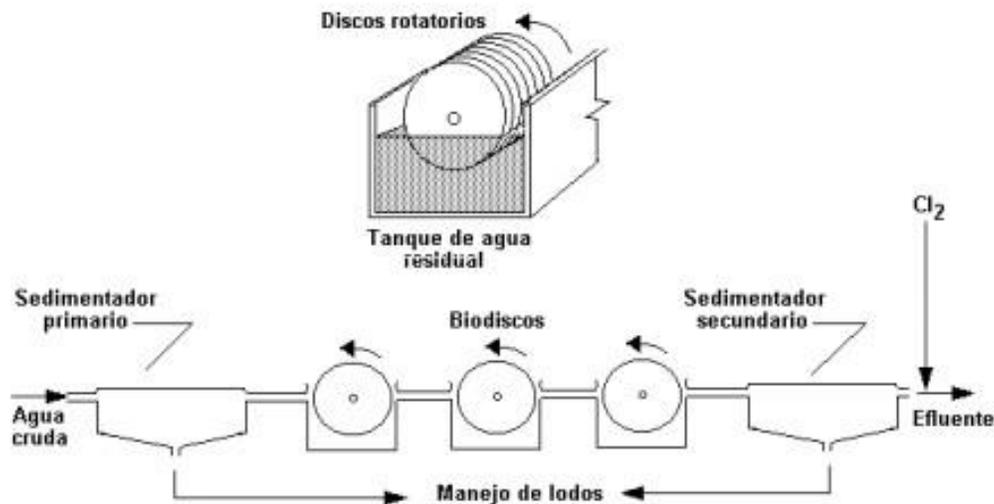
$$\frac{dx}{dt} = \text{tasa de cambio de la concentración de microorganismos en el tanque}$$

Esta tasa de cambio de la concentración de microorganismos en el tanque será un factor determinante en el establecimiento de sus dimensiones. En la unidad 3 revisarás con atención este concepto y se ejemplificarán los cálculos del mismo.

**Discos biológicos.** Esta es una técnica de tratamiento biológico de cultivo adherido a una serie de discos plásticos conectados en un eje concéntrico rotatorio, parcialmente sumergido en un tanque que contiene el agua residual. En este tipo de técnicas de tratamiento secundario los discos rotan sobre su eje lentamente (2 a 5 rpm) con un 40% de su superficie sumergida en el agua residual, mientras que el resto entra en contacto con el aire; es decir, la biopelícula interacciona con el aire y el agua en forma sucesiva, ello provoca que la técnica no requiera recirculación y sus costos de operación sean reducidos. La biomasa se alimenta del sustrato (materia orgánica y nutrientes, de los que se alimentarán los microorganismos) de contenido en el agua residual cuando una parte de los biodiscos está sumergida. Es por ello que también les denominan contactores biológicos rotatorios o discos biológicos rotatorios. Cuando los discos giran, parte de ellos está sumergida y el resto de los discos no sumergidos se pone en contacto con el aire oxigenando a la biomasa adherida a los discos. A la biomasa adherida también se le denomina biopelícula, y normalmente es de 0.1 a 0.2 mm. Un factor limitante en los biodiscos es la cantidad de oxígeno porque de este depende el crecimiento microbiano que depura el agua residual. Esta oxigenación se favorece al airear los biodiscos, es decir, cuando la parte no sumergida de los biodiscos tienen contacto con el aire (Valdés y Vázquez, 2003). Revisa el siguiente esquema.



Figura 14. Discos biológicos. Ubicación en el tren de tratamiento completo y sección transversal de los discos biológicos.



Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.

En la figura se aprecia la posición en donde se colocan los biodiscos dentro del tren completo de tratamiento, el agua cruda entra en primera instancia al tratamiento primario en un sedimentador primario, este se encuentra previo a los biodiscos; de igual manera, como en la segunda instancia, el agua fluye a través de los mismos y posteriormente el agua llega a un sedimentador secundario. Asimismo, puedes observar cómo los biodiscos deben estar parcialmente sumergidos para que la parte no sumergida se oxigene.

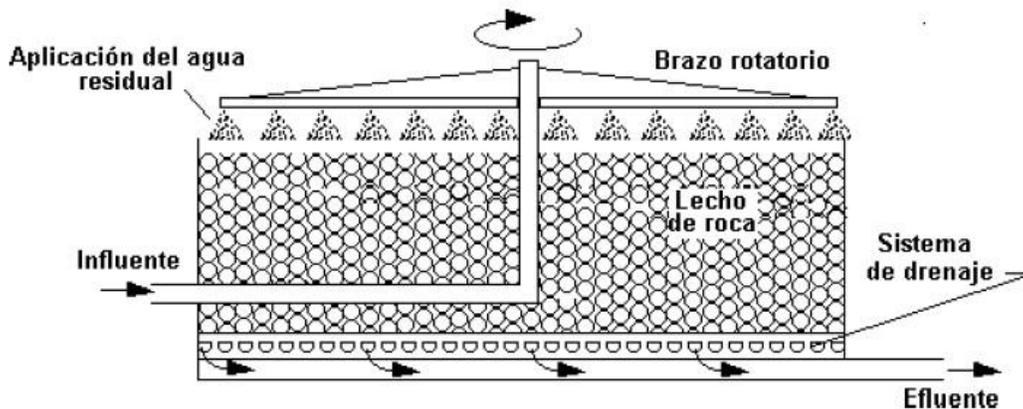
Otro sistema biológico de tratamiento secundario son los filtros percoladores, a continuación, se describen sus principales características.

**Filtros percoladores.** Es otra técnica de tratamiento secundario de cultivo adherido; sin embargo, la forma del soporte de la biomasa no son discos sino materiales de diversas formas, los cuales se encuentran empacados en un tanque cilíndrico donde se filtra el agua residual, se va percolando desde la parte superior y fluye por gravedad hacia la parte inferior; a su paso, se va depurando el agua residual al tener contacto con la biomasa. Cuando la altura del filtro es de varios metros, se le denomina biotorre. El agua residual pasa sobre la biopelícula en dosis intermitentes.



Los mecanismos principales que rigen esta técnica son la adsorción y subsecuente oxidación biológica que remueven el sustrato contenido en el agua residual. Las características más importantes del medio de soporte son su área superficial específica y la porosidad; el área superficial específica es la medida del espacio en donde puede crecer la biopelícula, y la porosidad es una medida de los vacíos a través de los cuales puede pasar el agua residual y el aire para la ventilación de los gases producidos. A continuación, se muestra una figura de este filtro percolador (Valdés y Vázquez, 2003).

Figura 15. Filtro percolador.



Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.

**Lagunas de estabilización.** Son estanques o lagunas donde se conforma un sistema biológico de cultivo suspendido también conocidos como estanques de estabilización, estanques de oxidación y lagunas de alcantarillado.

Tienen poca profundidad y contienen el agua residual por un periodo de tiempo suficiente para que se lleve a cabo el proceso de purificación natural. Parte de este sistema debe de ser aerobio para producir un efluente aceptable. La oxigenación en los estanques de oxidación se da por difusión desde la atmósfera, la mayor parte es liberada en la fotosíntesis. Mientras que en las lagunas de oxidación se aplica aireación artificial. Existen estanques aerobios, anaerobios y facultativos; los primeros no tienen más de un metro de profundidad, los estanques facultativos tienen de 1 a 2.5 m de profundidad; y los más profundos, de 2.5 m, son estanques anaerobios.

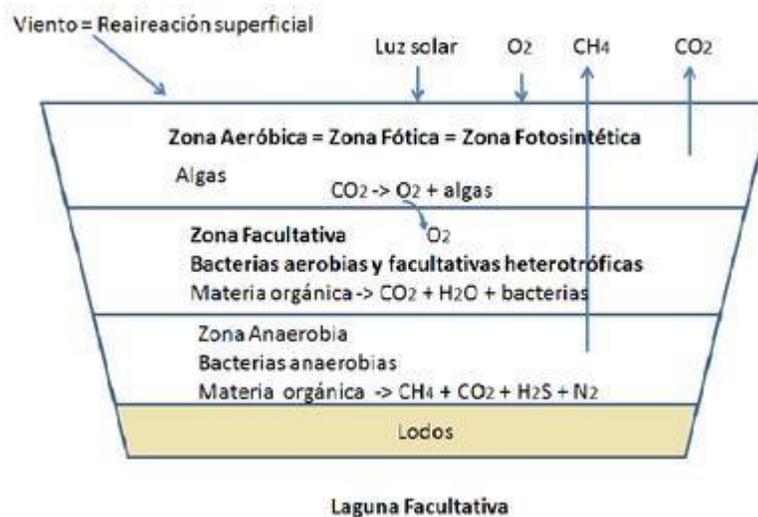
En estos sistemas la simbiosis entre bacterias y algas se aprovecha para degradar la materia orgánica. Las bacterias consumen materia orgánica y oxígeno y producen



CO<sub>2</sub>, mientras que las algas consumen CO<sub>2</sub> y producen oxígeno por medio de la fotosíntesis, lo que mantiene concentraciones de oxígeno disuelto adecuadas en la zona superior de la laguna (Noyola, Morgan, y Güereca, 2013).

Observa el siguiente esquema de laguna de estabilización en donde apreciarás la estratificación natural que se forman en una laguna facultativa, dependiendo de la profundidad y el grado de oxigenación, siendo la más profunda una zona anaerobia ya que a esa parte no llega el oxígeno atmosférico. Conforme la estratificación es más superficial, la presencia de oxígeno hace de este estrato una zona aerobia.

Figura 16. Esquema de laguna de estabilización.



Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.

**Procesos biológicos anaerobios.** Estas técnicas de tratamiento anaerobio se pueden clasificar de acuerdo con el nivel de interacción que posee el microorganismo: el sustrato a degradar (facilidad de transferencia de masa) y la relación entre el tiempo de retención del microorganismo en el sistema (denominado tiempo de retención celular, TRC) y el tiempo de retención hidráulica del sistema ( $\theta$  o TRH).

Las técnicas de tratamiento secundario están basadas en procesos de biomasa con ausencia de oxígeno donde se producen metabolismos de bacterias anaerobias que degradan la materia orgánica en grandes tasas (cantidad de materia orgánica por volumen de agua). En este sistema se produce metano y dióxido de carbono denominados biogás y se puede usar como combustible para la generación de energía eléctrica o térmica (Rodríguez, Letón, Rosal, Dorado, Villar, y Sanz, 2006).

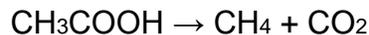


En esta técnica de tratamiento secundario ocurren otros procesos que son importantes, pues de ellos depende que la acción microbiana favorezca la degradación de materia orgánica, así como la reducción de la contaminación del agua residual. Estos procesos son: la hidrólisis, la acidogénesis, la acetogénesis y la metanogénesis que a continuación se explicarían brevemente (Rodríguez, Letón, Rosal, Dorado, Villar, y Sanz, 2006):

**Hidrólisis:** ruptura de moléculas grandes, solubles e insolubles.

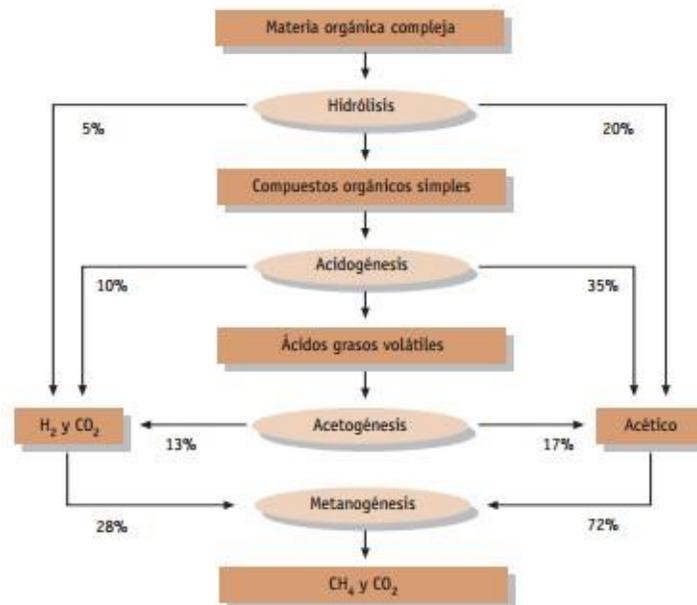
**Formación de ácidos (acidogénesis) y acetato (acetogénesis):** los productos finales de la hidrólisis son transformados en ácidos orgánicos de cadena corta, otros compuestos de bajo peso molecular, hidrógeno y dióxido de carbono.

**Metanogénesis:** formación de metano. La reacción general es:



La degradación de la materia orgánica sigue una distribución como la siguiente:

Figura 17. Esquema de la ruta de degradación anaerobia.



Fuente: Valdés y Vázquez, 2003.

En la figura se muestra la secuencia de los procesos que definen la degradación anaerobia y los porcentajes de ácido acético, bióxido de carbono, hidrógeno y metano que se producen en cada proceso de las técnicas anaerobias.



Los procesos biológicos, de acuerdo con Noyola, Morgan y Güereca (2013) son:

- **Fosa séptica.** Es un digestor convencional a escala reducida. Su uso principal es en zonas rurales, o bien en áreas urbanas sin drenaje.
- **Tanque Imhoff.** Es un sistema similar a la fosa séptica, pero más grande, ya que da servicio a un número mayor de usuarios. Ya no se construyen.
- **De contacto anaerobio.** Es el equivalente anaerobio de los lodos activados aerobios.
- **Filtro anaerobio (FA).** Consiste en un reactor inundado de flujo ascendente o descendente, empacado con soportes plásticos o piedras de 3 a 5 cm de diámetro promedio. El agua residual atraviesa el lecho empacado, permitiendo la interacción entre el sustrato en el agua residual y el microorganismo adherido al empaque.
- **Reactor de lecho de lodos** (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, UASB, por sus siglas en inglés). Es un reactor que se basa en la formación de una cama de lodos (biomasa anaerobia granular o floculada), localizada en el fondo del reactor con un volumen aproximado de 1/3.
- **Reactor de lecho expandido/fuidificado o de lecho fluidificado** (*Expanded Granular Sludge Blanket*, EGSB, por sus siglas en inglés). Estos reactores están orientados al tratamiento de aguas residuales industriales bajo condiciones de operación muy controladas, por lo que su aplicación en el tratamiento de aguas residuales domésticas o municipales no es aún recomendable ya que su operación es complicada y el uso de energía alto.

Hasta aquí, se presentaron las características básicas de las técnicas de tratamiento secundario. A continuación, se enlistan las ventajas y desventajas de cada una para evaluar su aplicación y definir si es viable en cada caso asignado por tu docente en línea para realizar las actividades.



Para comprender de una forma visual en qué consisten los procesos aerobios y anaerobios, **observa** los siguientes videos:

- Planta de tratamiento microbiológica aerobia; Tratamiento anaerobio opción para la descontaminación de aguas residuales;
- Tratamiento de aguas residuales: Procesos biológicos
- Lodos activados

Encuétralos en la sección *Para saber más*.

### 2.2.2. Criterios de selección

En este apartado se muestran algunos puntos a considerar en la aplicación de las técnicas de tratamiento secundario, así como ventajas y desventajas de las mismas. Los procesos biológicos involucran la degradación o transformación del material orgánico por medio de microorganismos. Dentro de los sistemas biológicos existen los sistemas aerobios (requieren oxígeno molecular disuelto), por lo que es necesario suministrar energía eléctrica para transferir oxígeno al agua y a los microorganismos, lo que se realiza con equipo electromecánico (aireadores mecánicos, compresores), que hace que los tanques de procesos biológicos aerobios sean más grandes que los anaerobios.

En el sistema aerobio (que funciona sin oxígeno) un 65% de la energía producida por el metabolismo microbiano se transforma en nuevas células (denominadas en forma general como lodos) mediante la síntesis (energía de anabolismo). El 35% restante se disipa como resultado de la liberación de energía que acompaña a los procesos vitales de la célula (energía de catabolismo) (Noyola, Morgan, y Güereca, 2013).

A continuación, se darán algunas consideraciones para la selección de cada técnica de tratamiento secundario, con base en sus ventajas y desventajas.



Tabla 9. Criterios de selección para las técnicas de tratamiento secundario.

Técnica	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones	Puntos a considerar en la selección
<b>Lodos activados</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Remueve eficientemente altas cargas orgánicas.</li> <li>• Fácil operación.</li> <li>• Reduce olores y vectores (insectos).</li> <li>• Se puede aplicar la desnitrificación.</li> <li>• Se puede ajustar el gasto energético.</li> <li>• No se requiere sedimentación primaria.</li> <li>• Los lodos generados pueden ser estabilizados y reusados.</li> <li>• Aplicable a planta de tratamiento en comunidades mayores de 15.000 habitantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se necesita mantenimiento constante.</li> <li>• Se debe controlar constantemente la temperatura y el pH.</li> <li>• Se debe de cuidar el sistema de aireación de taponamientos.</li> <li>• Consumo energético alto por la oxigenación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Remueve eficazmente los parámetros: DBO<sub>5</sub>, SST, nitrógeno total, fósforo o coliformes fecales.</li> </ul>	Costo energético alto por la aireación continua.



<p><b>Discos biológicos</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajos requerimientos de energía.</li> <li>• No requieren de bombeo, recirculación ni</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se aplican en plantas de tratamiento de agua residual pequeñas.</li> <li>• Genera olores.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Presenta altas eficacias de remoción de materia orgánica y de nitrificación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>□ Cuidado del crecimiento de biomasa en el soporte, pues si crece demasiado cae por gravedad y</li> </ul>
	<p>elevación, ya que su pérdida de carga es mínima. No requiere de eje hidráulico significativo.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tienen mejor eficiencia que los biofiltros debido a la activación del lodo que se desprende de los discos.</li> <li>• Se alcanzan eficacias del 90 al 95% en la remoción de la DBO<sub>5</sub>.</li> <li>• Alcanza altas eficacias de remoción de materia orgánica y de nitrificación.</li> <li>• Puede ser utilizado en climas fríos con mayor versatilidad que otros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de un tratamiento primario.</li> <li>• Se necesita verificar constantemente el eje de rotación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En el tratamiento del agua residual doméstica se alcanzan eficacias del 90 al 95% en la remoción de la DBO<sub>5</sub>.</li> <li>• Este proceso puede ser utilizado en climas fríos con mayor versatilidad que otros debido a que opera protegido por una cubierta.</li> </ul>	<p>hay pérdida de biomasa.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>□ En general, se realizan arreglos de dos o tres tanques de discos biológicos en serie.</li> <li>□ Puede desarrollarse biomasa blanca, lo que indica septicidad.</li> <li>□ Se debe monitorear la eficiencia, pues hay varios factores que la pueden afectar como el cambio en la temperatura y pH, variación de caudal y de materia orgánica, entre otros.</li> </ul>



<p><b>Filtros percoladores</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema ecológico que permite la reutilización de las aguas tratadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de grandes volúmenes de reactor para su implementación.</li> <li>□ No resiste periodos sin alimentación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Presenta altas eficacias de remoción de materia orgánica y de nitrificación.</li> <li>• Han sido aplicados con éxito en la producción de</li> </ul>	<p>En esta técnica de tratamiento debe verificarse con mucho cuidado el área superficial del medio de soporte, esto es el área de contacto con el agua residual</p>
------------------------------------	---	---	--	---



	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema modular muy flexible.</li> <li>• Produce lodos estables que pueden ser utilizados como abono natural.</li> <li>• Alta eficiencia en el tratamiento de sólidos y líquidos orgánicos.</li> <li>• Eliminación de agentes patógenos sin necesidad de etapa posterior de cloración.</li> <li>• Bajos costos de operación, mantención y limpieza.</li> <li>• No requiere suministro de oxígeno, el diseño contempla la aireación natural.</li> <li>• No requiere usuarios expertos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesidad de suministrar nutrientes. □</li> <li>Requiere de un proceso de adaptación aunque complejo.</li> <li>• No soporta variaciones grandes de carga ni caudal.</li> <li>• No es recomendable para tratar grandes volúmenes de efluente.</li> </ul>	<p>composta y para el tratamiento de malos olores en plantas de tratamiento.</p>	<p>donde crecerá la biomasa.</p>
--	---	--	--	----------------------------------



<b>Lagunas de estabilización</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La principal ventaja de este proceso es el bajo consumo energético para su operación.</li> <li>• No tiene altos costos de inversión.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere una superficie de tierra amplia.</li> <li>• Genera muchas algas.</li> <li>• Su eficiencia depende de las</li> </ul>	<input type="checkbox"/> Altamente aplicable en poblaciones pequeñas y medianas, por su sencillez, bajos costos y efectividad.	<p>Se aconseja un adecuado manejo de los lodos y de los posibles olores generados.</p>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Accesorios simples.</li> <li>• Remociones eficientes de patógenos y huevos de helmintos.</li> <li>• Capacidad de soportar diferencia de caudales y diferentes cargas orgánicas.</li> <li>• No requiere alta tecnología.</li> <li>• A veces remueve nutrientes.</li> <li>• Se puede usar de tanque de regulación.</li> </ul>	<p>condiciones ambientales.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Produce olores desagradables.</li> <li>• Puede contaminar los acuíferos.</li> <li>• Existe gran cantidad de pérdida de agua por evaporación.</li> </ul>		
<b>Procesos biológicos anaerobios</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo consumo de energía.</li> <li>• Eficaz con alta carga orgánica.</li> <li>• Produce pocos lodos.</li> <li>• Una vez estabilizado el sistema es muy estable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genera olores desagradables.</li> <li>• No elimina nutrientes ni patógenos.</li> <li>• Requiere un tratamiento posterior.</li> </ul>	<input type="checkbox"/> Estos procesos son altamente efectivos en aguas residuales con alto contenido de materia orgánica.	<p>Se requiere tener cuidado y control de la producción de metano, así como de otros gases de la descomposición anaerobia ya sea para su reutilización o disposición.</p>
<p>Fuentes: CONAMA, 2013a, 2013b, 2013c, 2013d; CIDTA, 2013; y Valdés y Vázquez, 2003.</p>				



Con estas ventajas, desventajas, aplicaciones y puntos a considerar, te habrás dado una idea de las técnicas que pueden ser aplicables al caso concreto que te asignó tu docente en línea de acuerdo con los contaminantes que se desea remover.

A continuación, se enlistan algunos modelos de cuantificación de volumen de importancia para la evaluación de las dimensiones de cada técnica de tratamiento secundario, las fórmulas y cálculos. Su aplicación y detalle se presentarán en la tercera unidad de esta asignatura.

### 2.2.3. Cuantificación del volumen

Las técnicas secundarias anaerobias se caracterizan por tener una baja tasa de síntesis bacteriana; es decir, una baja producción de lodos de desecho. Por lo contrario, en el tratamiento aerobio se utiliza una mayor cantidad de energía del sustrato para la síntesis celular, por lo que hay una mayor generación de biomasa, como lodo no estabilizado, cuyo tratamiento y disposición incrementa la dificultad técnica y el costo del tratamiento. Es por ello que en este apartado se presentan consideraciones y fórmulas que deben ser tomadas en cuenta para el dimensionamiento. Cabe recordar que en la unidad tres de la asignatura se verán con más detalle los cálculos y aplicaciones de éstas y otras fórmulas necesarias para el dimensionamiento. A continuación, se observa el dimensionamiento de cada una de las técnicas secundarias.

**Dimensionamiento del tanque de lodos activados.** Este proceso es uno de los más utilizados en el mundo para el tratamiento de aguas residuales. Existen alrededor de 13 variantes de lodos activados; los sistemas de flujo pistón, totalmente mezclado de media carga y el de aireación extendida (baja carga) son los más comunes. La gran ventaja de este sistema es que se lleva a cabo en un sólo tanque, el cual cuenta con dispositivos para proveer aeración, mezclado y sedimentación. Este sistema debe contar con al menos dos tanques que funcionen en forma alternada. (Noyola, Morgan, y Güereca, 2013). De acuerdo con Valdés y Vázquez, (2003) el volumen del reactor o tanque se calcula por:

$\frac{dx}{dt}$

$$V \frac{dx}{dt} = QX_0 + QX + Vrx$$

Donde:

$\frac{dx}{dt}$

= tasa de cambio de la concentración de microorganismos en el reactor



$V$  = volumen del reactor

$Q$  = gasto del influente y efluente

$X_0$  = concentración de biomasa en el influente

$X$  = concentración de biomasa en el reactor

$r_x$  = rapidez de crecimiento de la biomasa

**Dimensionamiento del tanque de los discos biológicos.** Existen varios modelos para el diseño y cálculo de volumen de discos, a continuación, se mencionan los más comunes (CIDTA, 2013):

### S- SCRULZE

$$\frac{dS}{dt} = -K$$

$$\frac{S}{S_0} = 10^{-k\theta_1}$$

$$\log \left( \frac{S}{S_0} \right) = -KA/Q$$

Donde:

$S$  = carga de agua (mg DBO . L<sup>-1</sup>)

$K$  = constante de Schulze (m<sup>-2</sup>. m<sup>3</sup>d<sup>-1</sup>)

$A$  = superficie total soporte (m<sup>2</sup>)

$Q$  = caudal tratado (m<sup>3</sup>. d<sup>-1</sup>)

$S_0$  = carga del agua a tratar (mg DBO .L<sup>-1</sup>)

### Kornega y Andrews

$$Q (S_0 - S_1) = CAS_1/(K_s + S_1)$$

Donde:



$C =$  la capacidad máxima de depuración ( $g\ DBO \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ )

$K_s =$  constante de saturación del biofilm ( $mg\ DBO \cdot L^{-1}$ )

$Q =$  caudal tratado en ( $m^3 \cdot d^{-1}$ )

$S_0 =$  carga del agua a tratar ( $mg\ DBO \cdot L^{-1}$ )

$S_1 =$  carga del agua que se desea al final del tratamiento ( $mg\ DBO \cdot L^{-1}$ )

$A =$  superficie total soporte ( $m^2$ )

### Eckenfelder

$$Q/A(S_0 - S_1) = KS_1$$

Donde:

$K =$  constante cinética del modelo de Eckenfelder a capacidad máxima de depuración

$A =$  superficie total soporte ( $m^2$ )

$Q =$  caudal tratado en ( $m^3 \cdot d^{-1}$ )

$S_0 =$  carga del agua a tratar ( $mg\ DBO \cdot L^{-1}$ )

$S_1 =$  carga del agua que se desea al final del tratamiento ( $mg\ DBO \cdot L^{-1}$ )

### Pöpel

$$A = 0.022 Q(S_0 - S_i)^{1.4} / S_i^{0.4} \text{ Donde:}$$

$S_0 =$  carga de DBO inicial ( $\frac{g}{m^3}$ )

$S_i =$  carga de DBO en el efluente de etapa  $i$  ( $\frac{m^3}{g}$ )

$A =$  superficie ( $m^2$ )

$Q =$  caudal ( $\frac{m^3}{\text{día}}$ )

### Hansford

$$S = Q S_0 / [Q + Q_0 (1 + b_{11} + \frac{b_{12}}{1 + K_1}) + K_L A_s (\frac{K_1}{K_1 + 1})]$$



Donde:

$$Q = \text{caudal} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)$$

$$S_0 = \text{carga de DBO inicial} \left( \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \right)$$

$$S_i = \text{carga de DBO en el efluente de etapa } i \left( \frac{\text{m}^3}{\text{g}_3} \right)$$

$$K_1 = \text{constante adimensional del modelo de Hansford } A_s \\ = \text{superficie sumergida} \left( \text{m}^2 \right)$$

$$K_L = \text{coeficiente de } \frac{\text{transportes}}{\text{líquido}^{-1}} \\ \text{(m. d)} \\ \text{biofilm}$$

$b_{11}$  y  $b_{12}$

= elementos de la matriz par valorar la evolución de la DBO con el giro del tambor

**Dimensionamiento del tanque de los filtros percoladores.** La tasa a la cual se aplica el agua residual a la superficie del filtro percolador se denomina carga hidráulica, e incluye al gasto recirculado  $Q_R$ ; el gasto total a través del filtro percolador es  $Q+Q_R$ . La expresión de la carga hidráulica es:

$$\text{Carga hidráulica} = \left( \frac{\text{m}^3}{\text{d}} Q + Q^R \right) / A_s$$

Donde:

$$= \text{gasto de agua residual cruda,} \\ \frac{\text{m}^3}{\text{d}} Q$$

$$Q_R = \text{gasto de recirculación, } d$$

$$A_s = \text{área superficial del filtro percolador (vista en planta)}$$



La carga hidráulica puede expresarse en metros cúbicos por día por metro cuadrado de área superficial, o  $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ ; un valor común para un tanque de filtro percolador convencional es  $20 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ .

Si se aumenta la tasa de carga hidráulica se incrementa el deslave y esto ayuda a mantener abierto el lecho de roca.

En estos filtros, el agua se recircula para asegurar el porcentaje de remoción. Esta cantidad de agua de recirculación se representa por la relación  $R = \frac{Q_R}{Q}$ , y varía

generalmente

en el intervalo de 0.0 a  $3.0 \text{ m}^3/\text{d}$ .

**Dimensionamiento del tanque de las lagunas de estabilización.** Las lagunas de estabilización basan su diseño en tamaño y condiciones de operación en el tiempo de retención hidráulica y el volumen efectivo; así, para realizar en forma apropiada el diseño y la operación de una laguna es necesario entender claramente el significado de ambos conceptos (Rodríguez, Ietón, Rosal, Dorado, Villar y Sanz, 2006).

**Tiempo de retención hidráulica ( $\theta$ ).** Es el tiempo que teóricamente pasa el agua dentro del sistema de tratamiento biológico y que se utiliza en el diseño. Se puede estimar a partir de la siguiente relación (CONAGUA, 2007d):

$$\theta = \frac{V}{Q}$$

$Q$

Donde:

$V = \text{Volumen total del líquido contenido dentro de la laguna, m}^3$

$Q = \text{Gasto de agua, } \frac{\text{m}^3}{\text{d}}$

**Volumen efectivo (VE).** Es el volumen donde se realiza efectivamente el tratamiento biológico y es menor que  $V$  debido a que toman en consideración las zonas muertas en la laguna.

**Dimensionamiento de los tanques para los procesos biológicos anaerobios.** Los puntos a considerar en el dimensionamiento de este tipo de técnicas dependerán básicamente de la carga orgánica que contiene el agua residual, así como del caudal que se tratará. Las fórmulas para el dimensionamiento de estas técnicas se



describirán con detalle y se aplicarán en la tercera unidad de la asignatura (Noyola, Morgan y Güereca, 2014).

- **Fosa séptica.** Es un tanque sencillo y pequeño, pero con profundidad mayor a tres metros y solo da servicio a un núcleo familiar.
- **Tanque Imhoff.** Este tanque es de mayores dimensiones que la fosa, ya que da servicio a mayor número de usuarios, por lo que su tamaño dependerá de su ubicación y del número de habitantes que en él viertan sus aguas residuales.
- **De contacto anaerobio.** Esta técnica está conformada por un tanque cerrado con un agitador, tiene una entrada para el agua residual que se someterá a tratamiento y dos salidas: una para el biogás generado y otra para la salida del efluente. Este efluente se lleva a un decantador donde es recirculada la biomasa de la parte inferior del decantador al reactor para evitar su pérdida. Los principales problemas que presentan radican en la necesidad de recircular los lodos del decantador y de una buena sedimentación.
- **Filtro anaerobio (FA).** Se dimensiona un tanque circular en el interior, se encuentra un medio filtrante sobre el cual se desarrolla la superficie de un sólido formando una biopelícula de espesor variable. El agua residual se hace circular a través del lecho con flujo ascendente o descendente, donde entra en contacto con la biopelícula. Esta técnica resiste muy bien alteraciones de carga en el influente, pero no acepta gran cantidad de sólidos en suspensión con el influente. El rango típico de cargas tratadas es de 5 a 15 KgDQO/m<sup>3</sup> por día.
- **Reactor de lecho de lodos (USAB).** De la lista, esta técnica destaca como la opción más favorable y económica de aplicar; aunado al hecho de que confiere al tren de tratamiento la capacidad de absorber picos orgánicos y disminuir los requerimientos energéticos de los tratamientos subsecuentes, y que no genera gran cantidad de lodos.
- **Reactor de lecho expandido/fluidificado (EGSB).** Para implementar esta técnica se requiere de columnas a las cuales se le introducen partículas de un sólido poroso (arena, piedra pómez, etcétera) y de un tamaño variable (1 a 5 mm). Sobre este medio poroso se desarrollará una biopelícula bacteriana donde se llevará a cabo la degradación anaerobia. Es necesario una recirculación del líquido para que las partículas permanezcan fluidizadas (en suspensión). No es muy usado en plantas de tratamiento con agua proveniente de industrias.

Una vez realizada la preselección de las técnicas de tratamiento secundario de acuerdo con el uso o reúso del agua sometida a tratamiento, se seleccionarán



técnicas de tratamiento terciario. Por ello, a continuación, se describen las características básicas de estas técnicas, de igual manera que en las técnicas de tratamiento secundario se enlistarán ventajas y desventajas, y por último se señalarán los puntos de interés para el cálculo del volumen o dimensionamiento.

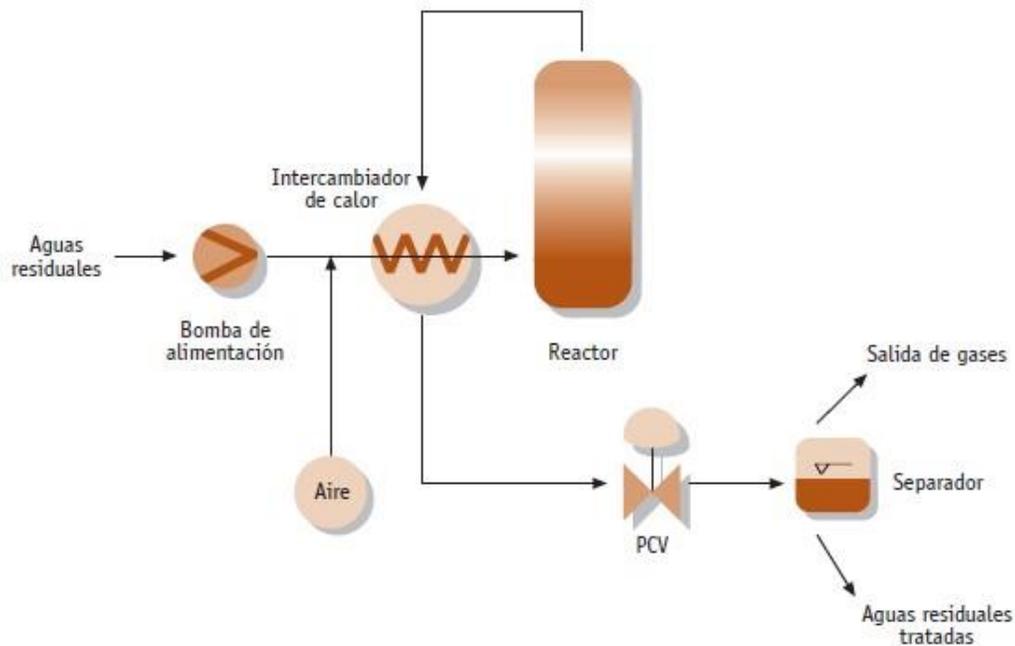
### 2.3. Técnicas de tratamiento terciario

Se refiere a todo hecho después del tratamiento secundario con el fin de eliminar compuestos como sólidos suspendidos, nutrientes y la materia orgánica remanente no biodegradable, también puede llegar a eliminar una fracción elevada de los virus y las bacterias presentes en el afluente (salida de agua de la planta potabilizadora o de tratamiento) (Noyola, Morgan, y Güereca 2013). Por lo general, el tratamiento terciario es necesario cuando deben cumplirse condiciones de descarga estrictas o cuando el agua tratada está destinada a un uso en específico. En tal caso, el arreglo de tratamiento terciario debe ser el necesario para alcanzar esa calidad específica, lo cual implica una gran diversidad de posibles combinaciones de técnicas de tratamiento y operaciones unitarias.

No existe un diagrama único ni típico en el tren de tratamiento terciario ya que cada técnica aplicada normalmente viene asociada a un módulo de prefabricación por el proveedor de consumibles como es el caso de membranas de ósmosis inversa o de ozonólisis. A continuación, se presenta un diagrama que sería continuidad del tratamiento secundario para un caso de aplicación de ozono.



Figura 18. Diagrama de ozonación directa en un arreglo patentado (ZIMPRO).



Fuente: Rodríguez, Letón, Rosal, Dorado, Villar y Sanz, 2006.

La figura inicia con la continuidad del agua después del tratamiento secundario, entra a una bomba de alimentación que suministra presión al sistema de ozono, pasa por un intercambiador de calor que generará la reacción de producción de ozono a partir del aire atmosférico que se captura *in situ*, posteriormente accede el agua al reactor donde se ponen en contacto con el ozono; después de un tiempo de contacto el agua residual entra a un separador donde se dividen los gases y el agua residual desinfectada.

A continuación, se describen las características principales de cada técnica de tratamiento terciario mencionada. Para que identifiques sus características y puedas preseleccionar técnicas que se puedan aplicar en el caso específico que te asignó tu docente en línea, revisarás sus principales características, así como las ventajas y desventajas de su aplicación; finalmente, se señalan algunos criterios y consideraciones para el cálculo de las dimensiones constructivas de cada técnica de tratamiento terciario.



### 2.3.1. Parámetros de diseño en tratamiento terciario

Los parámetros de diseño corresponden a características constructivas u operativas que se deben considerar en la aplicación de cada técnica de tratamiento. En esta sección se describirán las características de las técnicas de tratamiento terciario; cabe recordar que las técnicas de tratamiento terciario no son de uso común, solo las utilizarás si la calidad del agua después del tratamiento o la potabilización así lo requiere. A continuación, se abordarán de acuerdo con el orden mencionadas en la primera unidad.

**Precipitación y coagulación.** Se utilizan sales o compuestos químicos coagulantes en una dosis óptima que dependerán de la calidad del agua residual y de los ensayos a nivel laboratorio donde se probarán diversas dosificaciones con el agua que se potabilizará o se someterá a tratamiento. Estos compuestos químicos se adicionan al agua para que se forme un precipitado voluminoso formado por el propio coagulante y los contaminantes presentes en el agua residual. Es necesario realizar pruebas de laboratorio de jarras para seleccionar la dosis adecuada del producto químico, en estas pruebas se utilizan vasos donde se coloca agua que se someterá a tratamiento, y se añade en cada vaso dosis diferentes del coagulante y se somete a agitación en diferentes velocidades, con la finalidad de establecer la dosis óptima, el tiempo de contacto y la velocidad de agitación (CONAGUA, 2007c).

La eficiencia del coagulante depende del contenido de contaminantes y de la dosis aplicada. Las sustancias más usadas como coagulantes son:

Sulfato de alúmina:  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  a  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$

Cloruro férrico:  $\text{FeCl}_3$

Sulfato férrico:  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  o  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Hidróxido de calcio:  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

**Adsorción en carbón activado.** Está basado en la adsorción de los contaminantes (adsorbato) en un medio adsorbente, que en este caso es el carbón activado. La capacidad de adsorción depende básicamente de la superficie específica y la carga (catiónica o aniónica) que el material adsorbente pueda tener. Esta última propiedad regirá la selectividad de remoción de contaminantes, lo más común es la eliminación de olores, que son causados por los gases liberados durante el proceso de descomposición de la materia orgánica, y se deben fundamentalmente a la presencia de sulfuro de hidrógeno, mercaptanos, amoníaco, aminas, etcétera. Otro factor que rige la adsorción, en menor medida que la superficie específica, es la porosidad del material. El carbón activado es considerado un adsorbente universal, las



características del carbón activado favorecen la remoción de compuestos orgánicos, tales como los hidrocarburos, fenoles y colorantes, mientras que bajo esas condiciones no removerán nitrógeno a temperatura ambiente. El carbón puede usarse solo o bien combinarse con otros reactivos que le confieren propiedades catalíticas que favorecerán y aumentarán su capacidad de adsorción (Rodríguez, et. al. 2006).



Para comprender mejor la forma de cómo opera el proceso unitario de desinfección por adsorción en carbón activado, **observa** los siguientes videos: *Torre de adsorción de carbón activo y Proceso de adsorción*. Estos videos los encontrarás en la sección *Para saber más*.

**Intercambio iónico.** La tecnología de intercambio iónico es altamente selectiva, es decir con las pruebas preliminares en laboratorio se puede seleccionar el material adecuado para remover específicamente un contaminante. Esta técnica, de manera análoga, se basa en la adsorción y en fuerzas electroestáticas en lugar de carbón activado se utiliza algunos sólidos poliméricos (resinas sintéticas que son esferas donde se controla el tamaño de los iones, la carga o la estructura para hacerlas selectivas) que son capaces de retener cationes de forma que un determinado tipo de ion puede intercambiarse por otro que pase por las inmediaciones.

Este intercambio puede ser catiónico o aniónico dependiendo de la composición de la resina. Los sitios de intercambio de una resina catiónica en ciclo ácido están ocupados inicialmente por  $H^+$ , mientras que los de una aniónica por  $OH^-$ . Cuando el agua está contaminada por iones  $M^+$  y  $X^-$  pasan secuencialmente a través de dos resinas, una catiónica y otra aniónica, los iones  $H^+$  se reemplazan, primero, por  $M^+$  y posteriormente los  $OH^-$  son reemplazados por las especies  $X^-$ . Esto lleva finalmente a retirar las sales del agua original (incluidas sales de metales pesados), generando más agua por combinación de los  $H^+$  y  $OH^-$ , generados tras el acoplamiento de ambos procesos (Valdés y Vázquez, 2003).



Para entender mejor el proceso de desinfección por intercambio iónico, **observa** el siguiente video:

*Intercambio iónico.*

Encuétralo en la sección de *Para saber más.*

**Ósmosis inversa.** Esta técnica está basada en la adsorción y filtración a través de las membranas. La ósmosis inversa es el fenómeno reversible de ósmosis natural o directa que hoy constituye el nivel más fino de filtración existente capaz de rechazar elementos tan pequeños como 0.0001 mm a través de una membrana semipermeable por un proceso de difusión controlada.

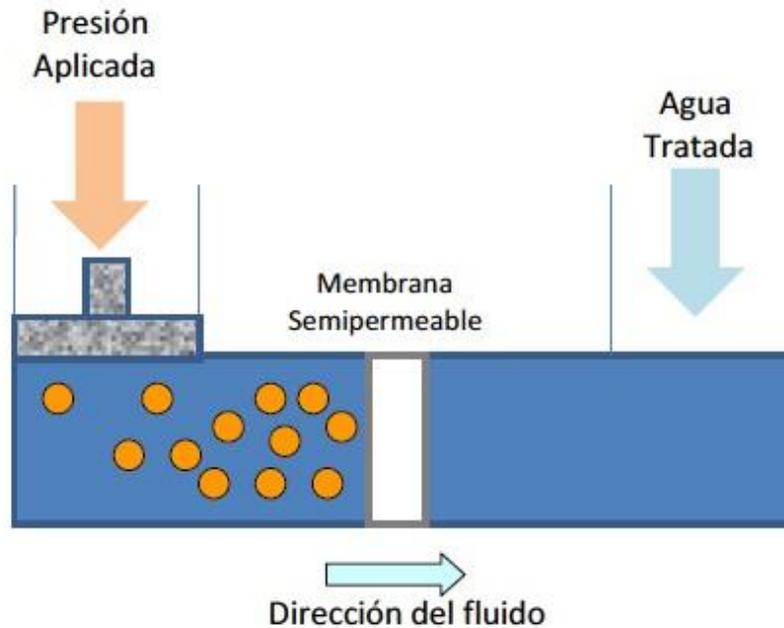
Existen una gran cantidad de membranas de ósmosis inversa, las características y propiedades dependen del fabricante, así como su diseño y aplicación ya que los módulos que soportan las membranas normalmente son específicos para cada marca de membrana lo que hace que el uso de esta técnica no sea económica ni ampliamente utilizada.

Las membranas funcionan a partir de las características de su superficie tanto físicas (porosidad) como químicas (tipo de carga). Con base en ello, se clasifican en homogéneas y heterogéneas, dependiendo de la distribución de los grupos funcionales cargados que se encuentran sobre la superficie de la membrana, en la matriz de la membrana, o en lugares determinados. Las membranas homogéneas se fabrican a partir de polímeros de estireno/divinilbenceno o de perfluorocarbono. Las membranas heterogéneas se fabrican a partir de polipropileno o policloruro de vinilo. (Valdés y Vázquez, 2003).

Como consecuencia de la polarización de la concentración en las proximidades de la membrana la diferencia de concentración ( $C_l^+ - C_m^+$ ) es mayor que la diferencia de concentración de operación  $\Delta C = (C_c^+ - C^+)$ , lo que significa una mayor caída de potencial en la membrana y por tanto un mayor consumo de energía (E). Observa la siguiente imagen.



Figura 19. Esquema del funcionamiento de las membranas de ósmosis inversa.



Fuente: CONAMA, 2013a.

La osmosis inversa es el fenómeno reversible de osmosis natural o directa que hoy constituye el nivel más fino de filtración existente capaz de rechazar elementos tan pequeños como 0.0001 mm a través de una membrana semipermeable por un proceso de difusión controlada.



Para comprender cómo funciona el proceso unitario de desinfección por osmosis inversa, observa el siguiente video: *Qué es la osmosis inversa*. Encuéntralo en la sección *Para saber más*.

**Electrodiálisis.** En esta técnica también se utilizan membranas, pero adicionalmente se colocan electrodos sobre los que se aplica una diferencia de potencial. Esta se electrifica y favorece la separación de contaminantes por diferencia de cargas. De esta forma, también se puede obtener agua de consumo a partir de agua de mar,



aunque no tan pura. Remueve iones presentes en las corrientes de agua a tratar mediante la aplicación de un campo eléctrico (Valdés y Vázquez, 2003).

**Remoción de nutrientes.** Para evitar la eutrofización de lagos donde se viertan las aguas residuales que recibieron un tratamiento, se debe remover los nutrientes causantes de ello, éstos son el nitrógeno y el fósforo. La técnica de remoción de nutrientes tiene que ver con la operación de otras técnicas físico-químicas, tales como intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis y técnicas biológicas (lodos activados, biofiltros y biodiscos).

**Nota:** la literatura científica que aborda el tratamiento terciario de aguas residuales considera al término **remoción de nutrientes** como una técnica de tratamiento terciario sin ser en el sentido estricto una técnica *per se* ya que para cumplir su objetivo que es la remoción de nitrógeno y fósforo, se hace uso de las técnicas terciarias fisicoquímicas de intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis o bien de técnicas secundarias como los lodos activados, los biofiltros o los biodiscos.

**Ozonólisis.** Una de las técnicas más eficientes para la remoción de compuestos orgánicos es el contacto del agua con el ozono, directo o combinado, comúnmente denominado proceso avanzado de oxidación. En este último, las combinaciones más comunes utilizan ozono ( $O_3$ ) con peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) con radiación ultravioleta o con fotocatalisis. A continuación, revisa las combinaciones más comunes de los procesos avanzados de oxidación (Rodríguez, Letón, Rosal, Dorado, Villar y Sanz, 2006, p. 46):

*Procesos homogéneos:*

- a) Sin aporte externo de energía
  - Ozonización en medio alcalino ( $O_3/OH^-$ )
  - Ozonización con peróxido de hidrógeno ( $O_3/H_2O_2$ ) y ( $O_3/H_2O_2/OH^-$ )
  - Peróxido de hidrógeno y catalizador ( $H_2O_2/Fe^{2+}$ )
- b) Con aporte externo de energía b1) Energía procedente de radiación ultravioleta (UV)
  - Ozonización y radiación ultravioleta ( $O_3/UV$ )
  - Peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta ( $H_2O_2/UV$ )
  - Ozono, peróxido de hidrógeno y radiación ultravioleta ( $O_3/H_2O_2/UV$ ) Foto-Fenton ( $Fe^{2+}/H_2O_2/UV$ )



- b2) Energía procedente de ultrasonidos (US)
  - Ozonización y ultrasonidos ( $O_3/US$ )
  - Peróxido de hidrógeno y ultrasonidos ( $H_2O_2/US$ ) b3)
- Electroquímica
  - Oxidación electroquímica
  - Oxidación anódica
  - Electro-fenton

#### *Procesos heterogéneos*

- Ozonización catalítica ( $O_3/Cat.$ )
- Ozonización fotocatalítica ( $O_3/TiO_2/UV$ )
- Fotocatálisis heterogénea ( $H_2O_2/TiO_2/UV$ )

La capacidad oxidante de las combinaciones mencionadas resulta costosa y de complicadas tecnologías por la especialización del operador de un equipo para esta técnica (ozonólisis), aunado al hecho de que se están desarrollando actualmente nuevas combinaciones para ver su eficiencia en la eliminación de contaminantes, ahorrar energía, etcétera.

Estas combinaciones de procesos avanzados de oxidación se caracterizan por su baja selectividad, lo que hace esta técnica altamente viable para la eliminación de aguas residuales.



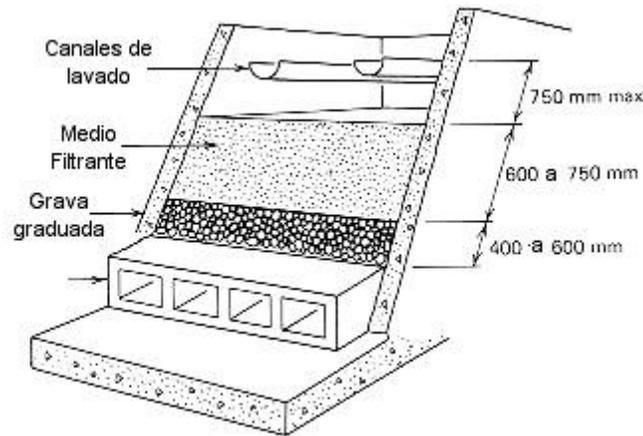
Si quieres profundizar sobre las líneas de investigación de esta técnica de ozonólisis, **consulta** la página 62 del documento *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Encuéntralo en la sección *Para saber más*.

**Filtración en arena.** Consiste en tanques de cemento rectangulares donde se colocan capas de arena y se combinan con otros materiales tales como gravas, carbón activado, resinas o materiales sintéticos. El paso del agua a través del filtro hace que se elimine materia en suspensión que hubiese quedado remanente en el agua después de su potabilización o de ser sometida a un tratamiento de aguas residuales. Los filtros se clasifican en los de acción lenta y los de acción rápida.



En los filtros de acción lenta el agua pasa por gravedad, mientras que, en los filtros de acción rápida, se utiliza equipos a presión tanto para pasar el agua como para la limpieza del mismo. Los filtros de arena remueven los parásitos, pero no son eficientes para remover bacterias y virus. No es un método de desinfección si se utiliza agua turbia, el filtro se tapa rápidamente y es necesario lavarlo frecuentemente por lo que su limpieza frecuente sea indispensable. Abajo se muestra el esquema con las diferentes capas que conforman un filtro de arena, dependiendo de la calidad que se requiera en el efluente de esta técnica de tratamiento terciario, suele combinarse con lechos de carbón activado o resinas de intercambio iónico.

Figura 20. Sección de un tanque de filtro de arena.



Fuente: CONAGUA, 2007a.

En la figura se muestra la sección en corte de un filtro de arena con las diferentes capas de material, iniciando con una geomembrana en la base del filtro, capas de roca, grava, arenas, tela filtrante y suelo.

**Desinfección.** Para garantizar la potabilización o bien para que el agua residual sea sometida a tratamiento y no presente riesgo para la salud, se requiere una efectiva desinfección para lo cual se utiliza el ozono, el cloro, la luz ultravioleta. Cada uno de estos agentes desinfectantes actúa de forma diferente ante los microorganismos por lo que también se requiere hacer pruebas de desinfección en diferentes dosis con el agua que se potabilizará o se someterá al tratamiento de agua residual (CONAGUA, 2007e).

\*Recuerda consultar la primera unidad con lo referente a la desinfección con cloro.



A lo que se refiere la desinfección con el ozono (O<sub>3</sub>) se genera al pasar oxígeno (O<sub>2</sub>) por un potencial de alto voltaje lo que añade un tercer átomo de oxígeno y forma O<sub>3</sub>. El ozono es muy inestable, reactivo, y oxida la mayoría del material orgánico con que entra en contacto de tal manera que destruye muchos microorganismos causantes de enfermedades. El ozono se considera más seguro que la clorina porque mientras que la clorina tiene que ser almacenada en el sitio (altamente venenoso en caso de un lanzamiento accidental), el ozono es colocado según lo necesitado (Valdés y Vázquez, 2003).

La luz ultravioleta es una radiación electromagnética con una longitud de onda menor a la de la luz visible (400 nm), esta radiación UV se penetra en la estructura genética de las bacterias, virus y otros patógenos, haciéndolos incapaces de la reproducción de los mismos o produce directamente la muerte de la célula por medio de la formación de dobles enlaces entre sus nucleótidos (Metcalf y Eddy, 2004).



Para darte una idea general de la forma en cómo opera el proceso unitario de desinfección por radiación ultravioleta en una PP, **observa** los siguientes videos:

- *Filtro Ultravioleta para purificación de agua:*  
<https://www.youtube.com/watch?v=YCp8PHfHSxU>
- <https://www.youtube.com/watch?v=YCp8PHfHSxU>

La etapa de desinfección no es una técnica que se pueda omitir, debe ser incluida en cada planta potabilizadora y en las de tratamiento de agua residual debido a que en los países en vías de desarrollo normalmente no hay suficiente agua limpia ni sistemas de colección y tratamiento de aguas residuales.



Para seguir ejemplificando sobre el tratamiento terciario en aguas residuales, se te recomienda buscar un video en Internet, puedes ayudarte con las palabras guía de la siguiente búsqueda: tratamiento terciario, ozonólisis, desinfección y osmosis inversa. Apóyate en YouTube para encontrar un video que aborde el tema.

Hasta aquí se han descrito de forma concisa, las principales características de las técnicas de tratamiento terciario. A excepción de la desinfección, estas técnicas no son de uso común, su aplicación solo se recomienda si la calidad final del agua potabilizada o agua residual tratada lo requiere. A continuación, se describirán las ventajas, desventajas o aplicaciones de cada técnica de tratamiento terciario.

### 2.3.2. Criterios de selección

Esta selección de técnicas de tratamiento terciario se basa en la calidad del agua que se requiere al final de la potabilización o bien después de un tratamiento (en el caso del agua residual). Son técnicas específicas que no se aplican de manera sistemática en todos los trenes de tratamiento o potabilización, se usa solo cuando es requerido por la calidad del agua al término del tratamiento, su selección dependerá de las aplicaciones en las que cada técnica sea más eficiente, así como de las ventajas y desventajas que cada técnica presenta. A continuación, se muestran estas características condensadas en una tabla guía para la selección de las mismas.

Tabla 10. Criterios de selección para la técnica de precipitación y coagulación.

Técnica de tratamiento terciario	Ventajas	Desventajas	Aplicaciones	Puntos a considerar en la selección
Precipitación y coagulación	<input type="checkbox"/> Es efectivo en la remoción de varios parámetros	<input type="checkbox"/> Requiere uso de insumos constantes.	<input type="checkbox"/> Eliminación de sólidos suspendidos totales.	<input type="checkbox"/> Tener sumo cuidado en establecer la dosis de coagulantes para que sea



	<p>en forma simultánea.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es de operación simple.</li> <li>• Emplea reactivos comunes para la coagulación y floculación.</li> <li>• Posibilidad de aplicación en una gran variedad de matrices.</li> <li>• Gran adaptación a fluctuaciones de concentraciones de contaminantes contenidos en las aguas a tratar.</li> <li>• Requiere menos tiempo que la decantación y permite una mayor carga de sólidos en el agua.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere zonas de almacenamiento o de reactivos.</li> <li>• Genera lodos que pueden ser peligrosos, dependiendo de la toxicidad del efluente a tratar.</li> <li>• Requiere planes de manejo de lodos.</li> <li>• Cuando las concentraciones son bajas, la eficiencia disminuye y requiere mayor consumo de reactivos, generando una gran cantidad de lodos.</li> </ul>	<p>☐ Eliminación de los contaminantes de alto peso molecular, son hidrófobos (no solubles en agua).</p>	<p>económicamente rentable y eficiente.</p>
<p><b>Adsorción en carbón activado</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Especial para remoción de mal olor, sabor o color desagradable.</li> <li>• Remueve plaguicidas y compuestos orgánicos volátiles.</li> <li>• Gran capacidad de remoción.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mantenimiento frecuente.</li> <li>• Esta tecnología no destruye los contaminantes y, eventualmente, se requiere de otra tecnología</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se usa para eliminar olores y materia orgánica principalmente.</li> <li>• Ocasionalmente sirve para la remoción de contaminantes orgánicos presentes en el agua.</li> </ul>	<p>☐ Hay que tener sumo cuidado de la actividad del carbón; es decir que la capacidad de adsorción del carbón no se sature ya que la adsorción es un fenómeno de superficie directamente</p>



	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Económicos.</li> <li>• Fáciles de operar y mantener.</li> <li>• Su uso es ampliamente usado.</li> </ul>	<p>que si lo haga.</p> <p>☐ Genera residuos que deben ser dispuestos en vertederos controlados.</p>		<p>depende de la superficie específica del carbón.</p>
<p><b>Intercambio iónico</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una tecnología económicamente accesible.</li> <li>• Es de operación simple.</li> <li>• Utiliza espacios pequeños.</li> <li>• La posibilidad de regeneración (limpieza y reuso) del material de intercambio aumenta su vida útil.</li> <li>• Emplea reactivos comunes para la regeneración del material.</li> <li>• Puede aplicarse en una gran variedad de matrices (agua, aire o suelo).</li> <li>• Gran adaptación a fluctuaciones de concentraciones de elementos contenidos en las aguas a tratar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Posee costos operacionales mensuales por consumo de reactivos químicos.</li> <li>• Requiere uso de insumos constantes.</li> <li>• Requiere el uso de regenerantes.</li> <li>• Requiere pretratamiento en efluentes con alta carga de SST (sólidos suspendidos totales).</li> </ul>	<p>☐ Se usa principalmente para remover compuestos orgánicos presentes en el agua.</p>	<p>☐ Hay que realizar pruebas de laboratorio previas para la selección adecuada de las zeolitas o resinas que realizarán el intercambio iónico, donde se verifique las remociones de los contaminantes que interesa eliminar.</p>



	<p>□ Entrega soluciones integrales por su flexibilidad en aplicación y por su facilidad para complementarse con otras tecnologías a costos razonables.</p>			
--	--	--	--	--



<p><b>Osmosis inversa</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta eficiencia.</li> <li>• Genera aguas de alta calidad, incluso aguas destiladas.</li> <li>• Es capaz de remover todo tipo de contaminante.</li> <li>• Puede tratar grandes volúmenes de agua.</li> <li>• Bajo costo de operación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere de pretratamiento, dependiendo del caso.</li> <li>• Requiere de gran consumo de energía.</li> <li>• Genera entre un 30 y 60 % de rechazo (lavado de la membrana) según el agua tratada que deben disponerse o tratarse.</li> <li>• No es eficiente para el tratamiento de aguas con elevado contenido de elementos.</li> <li>• A pequeñas escalas puede resultar más cara que a</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recomendable para la desalinización de las aguas salobres.</li> <li>• Producción de salmueras.</li> <li>• Utilización en la industria de la alimentación.</li> <li>• Eliminación de contaminantes emergentes en agua residuales y potables.</li> </ul>	<p>□ Hay que tener cuidado en el intercambio de las membranas cuando hayan sido saturadas. De ello depende la eficiencia de esta técnica.</p>
		<p>mayores escalas (economía de escalas).</p>		



<p><b>Electrodialisis</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• De operación simple.</li> <li>• Se puede ajustar para el uso con sistemas pequeños, por lo general, funciona automáticamente con pocos requisitos de mantenimiento y funcionamiento.</li> <li>• Puede utilizar diferentes fuentes de energía eléctrica (combustibles fósiles o renovables como solar o eólica).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere gran cantidad de energía para producir la corriente constante que impulsa la purificación y bombea el agua a través del sistema.</li> <li>• Necesita purificación previa.</li> <li>• No se puede usar para aguas de dureza superior a 1ppm.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desalinización de aguas salobres y la producción de salmueras.</li> <li>• Tratamiento de la dureza del agua, el desalado del suero de quesos, recuperación de ácido tánico de los vinos y de ácido cítrico de los jugos de frutas.</li> <li>• En aguas industriales se emplea en la recuperación de ácidos de los baños electrolíticos, y en la eliminación de metales pesados de las aguas de los procesos galvanoplastia.</li> <li>• Muy usado en aplicaciones médicas y de laboratorio que necesitan agua ultrapurificada.</li> </ul>	<p>Los insumos y eficiencia de esta técnica dependen de las ofrecidas por el fabricante-proveedor.</p>
<p><b>Remoción de nutrientes</b></p>	<p>☐ Son más eficientes las técnicas de tratamiento</p>	<p>☐ Los tratamientos fisicoquímicos (intercambio</p>	<p>☐ Se emplea cuando el agua, después del tratamiento, se utilizará para</p>	<p>Está supeditada a la eficiencia de remoción de otras técnicas (intercambio iónico,</p>



	<p>biológico, sobre todo para remover nitrógeno.</p> <p>☐ Para la remoción de fósforo se tiene buena eficiencia con el intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis.</p>	<p>iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis) son más caros.</p>	<p>verterse en cuerpos de agua nacionales (ríos, lagos, mar).</p>	<p>ósmosis inversa, electrodiálisis y biodiscos, lodos activados).</p>
<b>Ozonólisis</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnología de reactores gaslíquido bien conocida.</li> <li>• Flexibilidad para tratar distintos caudales y concentraciones.</li> <li>• Fácilmente automatizable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baja solubilidad del ozono en agua.</li> <li>• Posible formación de bromatos.</li> <li>• Alto costo por la generación de ozono.</li> </ul>	<p>☐ Es un proceso de oxidación avanzada, altamente eficiente en la desinfección y con el plus de eliminar contaminantes orgánicos, ya que el ozono actúa directamente en los enlaces de dichos compuestos. La eficiencia dependerá de las combinaciones de estas técnicas.</p>	<p>Esta técnica está supeditada al desarrollo de las de ozonólisis del fabricante, o de cada patente. Depende directamente de ello.</p>
<b>Filtración en arena</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para su uso en cualquier lugar</li> <li>• Los patógenos son absorbidos, consumidos y colados.</li> <li>• Los filtros pueden ser construidos con materiales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La calidad del agua está bajo el control individual del usuario.</li> <li>• Se requiere un método complementario de</li> </ul>	<p>☐ Eliminación de materia en suspensión que hubiese quedado remanente en el agua.</p>	<p>Es muy versátil, sólo hay que cuidar la limpieza del filtro con frecuencia para garantizar su efectividad.</p>



	<p>locales como el cemento.</p> <p>□ Larga vida del producto.</p>	<p>desinfección después del filtrado.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Después de lavar la arena durante un mes. la eficacia del filtro es reducida.</li> <li>• Necesita de tiempo para que se forme la capa orgánica.</li> </ul>		
--	---	---	--	--



<p><b>Desinfección</b></p>	<p><b>Cloro:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El uso de cloro como desinfectante es accesible y barato.</li> </ul> <p><b>Ozono:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es altamente eficiente.</li> <li>• Produce menos subproductos que la desinfección con cloro.</li> </ul> <p><b>UV:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es más económico que el ozono con buenas eficiencias.</li> </ul>	<p><b>Cloro:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende directamente de la calidad del agua (pH, turbiedad.)</li> <li>• Genera clorinas, tóxica para especies acuáticas.</li> </ul> <p><b>Ozono:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Su uso es caro.</li> <li>• Operadores especializados para su uso.</li> </ul> <p><b>UV</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Solo es eficiente si no hay materia suspendida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En la potabilización de agua para consumo humano.</li> <li>• Reducción de riesgo microbiológico en el uso o disposición de agua residual tratada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Esta técnica no puede omitirse en ningún tren de potabilización ni de tratamiento de aguas residuales.</li> <li>• Los microorganismos resistentes, como los huevos de helmintos, pueden afectar la desinfección completa (99.9%).</li> <li>• Cuidar en cada desinfectante:             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Cloro: tener cuidado con los subproductos de desinfección (clorinas).</li> <li>○ Ozono: el manejo del equipo solo debe ser con</li> </ul> </li> </ul>
		<p>□ Mantenimiento y reemplazo frecuente de la lámpara.</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>operadores calificados</li> <li>○ UV: medir los sólidos suspendidos, ya que estos pueden interferir en la desinfección; es decir, cualquier sólido presente en el efluente tratado puede proteger microorganismos contra la luz UV.</li> </ul>



Fuente: CONAMA, 2013e, 2013f, 2013g, 2013h, 2013i.

Se ha enlistado las aplicaciones, ventajas, desventajas y puntos importantes a considerar en la selección de cada técnica de tratamiento terciario; así como en el tratamiento primario eran de carácter obligatorio, las técnicas de tratamiento terciario en muchas ocasiones son un lujo y las técnicas de tratamiento terciario pueden aplicarse en el proceso de purificación de agua embotellada, lo que resulta costoso, pero redituable económicamente para aquellos que comercializan el agua embotellada.

### 2.3.3. Cuantificación de volumen

En este tema se mencionarán algunas características o consideraciones para la cuantificación del volumen de cada técnica de tratamiento terciario, algunas como en el caso de la ósmosis inversa u ozonólisis utilizan módulos específicos y fabricados por los proveedores, algunos otros tanques para otras funciones; por ejemplo, el tanque sedimentador que es usado para la precipitación y coagulación. La adsorción en carbón activado se combina con el empaque del material en el filtro de arena por lo que utiliza el mismo tanque, de igual manera que el intercambio iónico puede utilizar el del filtro de arena.

**Precipitación y coagulación.** En sentido estricto, se requieren dos tanques para esta técnica. En el primero se aplica los coagulantes y floculantes; luego se someten a una fuerte agitación durante un corto periodo con el objetivo de conseguir una buena y rápida mezcla de reactivos y coloides con el agua y favorecer la formación de flóculos. En el segundo tanque, la agitación es menor donde el agua permanece más tiempo para permitir el precipitado de los flóculos en el fondo del tanque. Sin embargo, para la precipitación de los flóculos es práctica común utilizar el tanque de la técnica de sedimentación en el tratamiento primario con la finalidad de ahorro de costo de construcción de infraestructura y gastos de operación.

En ambos casos, el diseño volumétrico se basa en las características de los sedimentadores rectangulares o circulares del tratamiento primario.

Revisa a detalle los cálculos de cuantificación de volumen de esta técnica en los siguientes documentos:



CONAGUA. (2007a). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas potabilizadoras tipo de tecnología simplificada*. pp. 101-111. Consultado el 30 de abril de 2014 de <http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/11DisenoDePlantasPotabilizadorasTipoDeTecnologiaSimplificada.pdf>



Rodríguez, A., Letón, G., Rosal, G., Dorado, V., Villar, F. y Sanz, G. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Consultado el 30 de abril de 2014 de [http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2\\_tratamientos\\_avanzados\\_de\\_aguas\\_residuales\\_industriales.pdf](http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2_tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf)

En este documento, consulta en específico la tabla 2.2. Características de algunos reactivos coagulantes. En la página 23 observarás las dosis y pH óptimos.

**Adsorción en carbón activado.** El carbón activado puede emplearse de dos maneras. La primera consiste en utilizar carbón activado granular o en polvo, por lo regular se añade mediante dosificadores en cualquier etapa del tratamiento, pero siempre antes de la filtración en un punto donde haya un mezclado suficiente. O bien, se aplica empacando un volumen de carbón activado como una capa más en el filtro de arena, donde se usa el mismo tanque rectangular.

En la siguiente tabla puedes observar diferentes características de carbón activado de acuerdo con cuatro diferentes fabricantes que ofrecen superficies específicas, de las cuales depende la capacidad de adsorción de los contaminantes y el volumen utilizado para eliminar contaminantes.

Tabla 11. Características del carbón activado evaluado (LQ 1000).

Característica	LQ1000	CG700	MDNB	CAGR-B
Fabricante	CARBCEM	NOBRAC	NOBRAC	CLARIMEX



Origen	Mineral	Cáscara de coco	Madera	Mineral
Activación	Física	Física	Química	Física
Densidad aparente (g/mL)	0.47	0.55	0.26	0.47
Dureza	75	98	-	80
Superficie específica (m <sup>2</sup> /g)	1 100	800	1 000	1 050
Índice de yodo (mg/g)	1 000	700	900	900
Volumen poroso (mL/g)	0.90	-	-	0.80

Fuente: Rivera, Ramírez y Durán, 2013.

En la tabla anterior se observa que el carbón LQ1000 presenta mayor superficie específica (1 100 m<sup>2</sup>/g), por ello se espera que en las pruebas de laboratorio presente las mayores eficiencias en la remoción de contaminantes porque la superficie específica es proporcional a la capacidad de adsorción.

**Intercambio iónico.** Para el caso del intercambio iónico se aplica igual que el carbón activado, la diferencia es que en esta técnica es altamente selectiva porque existen resinas fabricadas expreso para la remoción de un contaminante. A continuación, se enlistan algunas condiciones operativas del intercambio iónico, donde se han reportado buenas eficiencias de remoción de contaminantes:

Tabla 12. Condiciones operativas de la técnica de intercambio iónico.

Tipo de operación	Cíclica
Selectividad	Altamente selectiva
Pretratamiento	Filtración previa
Consumo de reactivos	Uso constante

**Parámetros de operación**



Temperatura ambiente	2 – 40°C*
Caudal de operación	1 a 20000 m <sup>3</sup> /día
Vidal útil	Resina 5 a 7 años, aproximadamente**

Fuente: CONAMA, 2013g.

(\*) La temperatura mínima debe ser superior al punto de congelamiento del efluente a tratar; y la máxima, alrededor de 40°C. Además, existen resinas capaces de resistir hasta 120°C.

(\*\*) Vida útil referida al cambio de resina. La vida útil de la planta en general puede ser de 20 años, considerando mantenciones adecuadas.

En la tabla se observan los parámetros de operación de las resinas para que actúen como técnica de intercambio iónico, donde se establecen condiciones de temperatura, caudal y vida útil. Normalmente, se utilizan las resinas después de una filtración.

En esta técnica, el tiempo de contacto es cíclico ya que se requiere que el agua residual o de potabilización entre en contacto con estas resinas por un tiempo establecido en pruebas de laboratorios previas.

De igual manera que en el carbón activado, la cantidad de resinas a usar en esta técnica dependerá de las características del fabricante y de las pruebas de laboratorio previas.

**Ósmosis inversa.** Como se mencionó anteriormente, los módulos que soportan las membranas de ósmosis inversa son prefabricados por el proveedor, normalmente son membranas enrolladas y quedan dispuestas en secciones tubulares en las que habrá gran presión, por lo tanto, el gasto energético es considerable, altamente costoso y, por ende, no es rentable desalar aguas de mar por esta técnica. A continuación, se presentan algunas condiciones para su óptimo desempeño.

Tabla 13. Condiciones operativas de la técnica de ósmosis inversa.

Tipo de operación:	Continua
Selectividad	No es selectiva
Pretratamiento	Filtración previa



Consumo de reactivos	No requiere
----------------------	-------------

Parámetros de operación	
Temperatura ambiente	2 – 45°C*
Caudal de operación	Sobre 200 L/s**
Vida útil	Dos años

Fuente: CONAMA, 2013h.

(\*) Es posible tratar efluentes hasta temperaturas máximas de 45°C, la mínima debe estar sobre el punto de congelamiento.

(\*\*) El caudal máximo de operación no tiene limitaciones, ya que éste es definido en el diseño. (\*\*\*) Vida útil referida al cambio de membranas. La vida útil de la planta en general puede ser de 20 años, considerando un mantenimiento adecuado.

En la tabla anterior se muestra los requerimientos previos para la aplicación de esta técnica que consiste en una filtración previa. Los rangos de temperatura óptimos para su eficiencia, la vida útil de las membranas de ósmosis con el cuidado de retrolavar las membranas para alargar su vida útil y los caudales de operación estarán en función del gasto de diseño de la planta y la calidad del agua de filtrado.

**Electrodiálisis.** Para la remoción de iones cargados eléctricamente, la remoción alcanza valores sobre el 90% (CONAMA, 2013i). De igual manera que en las membranas de ósmosis inversa, en las membranas para electrodiálisis se requiere un módulo de soporte de la membrana, diseñado y construido por el mismo proveedor. A continuación, se presentan algunas consideraciones en la operación de esta técnica.

Tabla 14. Parámetros de operación de las membranas de electrodiálisis.

Tipo de operación	Continua
Selectividad:	Baja
Pretratamiento	Filtración previa
Consumo de reactivos	No requiere



Parámetros de operación	
Temperatura ambiente:	Todo rango *
Caudal de operación	Sin límite **
Vidal útil	Membranas 10 años ***

Fuente: CONAMA, 2013i.

(\*) Es posible tratar efluentes hasta temperaturas máximas de 45°C y de mínima debe estar sobre el punto de congelamiento.

(\*\*) El caudal máximo de operación no tiene limitaciones ya que este es definido en el diseño. (\*\*\*) Vida útil referida al cambio de membranas. La vida útil de la planta en general puede ser de 20 años considerando mantenciones adecuadas.

Como muestra la tabla anterior, las membranas de electrodiálisis tienen una vida útil muy grande, lo que en cierta manera se refleja si se tiene cuidado en retrolavar (limpiar) dichas membranas para mantenerlas activas.



En la siguiente página, consulta un proveedor de estas membranas. Ahí observarás las características, aplicaciones y ventajas de la membrana EDI-310.

Revisa la siguiente liga:

<http://www.dowwaterandprocess.com/en/products/e/edi310>

**Remoción de nutrientes.** No existe una sola fórmula para determinar el volumen del dispositivo para la remoción de nutrientes ya que depende de la técnica asociada como son las fisicoquímicas (intercambio iónico, ósmosis inversa, electrodiálisis) y técnicas biológicas (lodos activados, biofiltros y biodiscos).

**Ozonólisis.** El dimensionamiento de las técnicas de ozonólisis, ya sea ozono solo o combinado depende del proveedor ya que son módulos construidos exprefeso para la generación de ozono *in situ*. Esta técnica de tratamiento terciario aún se encuentra en etapa de desarrollo, ya que son módulos que se fabrican sobre pedido, el tamaño y el gasto de operación son ajustables en cada caso.



En la página *México red* encontrarás diferentes proveedores de equipos para generación de ozono, el volumen de estos equipos y gasto de operación dependerá del gasto de diseño. Revisa la siguiente liga: <http://generadores-de-ozono-para-tratamiento-deagua.mexicored.com.mx/>

**Filtración en arena.** Los filtros de arena, como ya se mencionó en el apartado 2.3.1., son tanques rectangulares de cemento donde se empaca material de diferentes tamaños y propiedades químicas. Para empacar los diferentes materiales en las diferentes capas que conformarán el medio filtrante, se recomienda tener los mayores diámetros de material filtrante en la parte superior del filtro, ello coadyuvará a atrapar en la superficie algunas de las mayores partículas de contaminantes, sin taponar el filtro. El volumen del tanque estará en función el flujo de agua a lo largo de la planta de tratamiento y de su paso a través de las diferentes técnicas.

**Desinfección.** Un buen desinfectante debe ser tóxico para los microorganismos en concentraciones mucho menores que sus límites de toxicidad para los humanos y animales superiores. Además, debe tener una tasa rápida de eliminación y persistir lo suficiente para evitar que se reproduzcan nuevamente los microorganismos.

La tasa de desinfección se expresa como una reacción de primer orden, independientemente del tipo de desinfectante que se utilice (cloro, ozono o UV):

$$N_t = N_0 e^{-kt}$$

Donde:

$N_t$  = población de microorganismos remanentes después del tiempo  $t$

$N_0$  = población de microorganismos antes de la desinfección

$E$  = logaritmo base  $e$

$K$  = constante de crecimiento microbiano. Se determina experimentalmente

$T$  = tiempo de contacto con el desinfectante

La desinfección completa debe reducir la cantidad de microorganismos presentes al inicio ( $N_0$ ) en un porcentaje de remoción del 99.9 %.



Si deseas consultar un documento acerca del diseño de las técnicas de tratamiento de aguas residuales, puedes revisar el libro realizado por ICA titulado *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*. Consúltalo en la sección *Para saber más*.

Como te habrás dado cuenta, la cuantificación del volumen de estas técnicas terciarias de tratamiento depende en gran medida de los proveedores ya que las membranas, las resinas o el carbón activado se fabrican de acuerdo con las necesidades del ingeniero en tecnología ambiental. Con ello podrás discernir sobre qué técnica se adapta a las necesidades de la potabilización o de tratamiento de agua residual del caso que te encuentras analizando en la asignatura.

## Cierre de la Unidad

En conclusión, con las características de cada técnica, además de las ventajas y desventajas de su aplicación, seleccionaste las técnicas de tratamiento primarias, secundarias y terciarias que más se adecúan al tratamiento o potabilización de agua.

En la siguiente unidad aplicarás fórmulas para el cálculo de volúmenes de técnicas de tratamiento secundario, y con ello habrás establecido el tratamiento completo que darás al agua, una actividad profesional del tecnólogo ambiental.

La información desarrollada en esta unidad te servirá de apoyo en la selección de las técnicas de tratamiento de agua más viable, así como para cumplir la meta establecida en el caso de estudio enviado por tu Docente en línea.

Lograste proponer un tren completo de tratamiento, ¡felicidades!



### Para saber más



Para darte una idea general de la operación de una planta de tratamiento (PTAR), observa el siguiente video: *Diagrama de funcionamiento*.

<https://www.youtube.com/watch?v=f7pl8Tkd1FA>



Como ejemplo del diseño de una planta potabilizadora, consulta la tesis *Proyecto hidráulico para ampliación en la capacidad de tratamiento a planta potabilizadora N°1 del municipio de H. Matamoros, Tamaulipas*, de Netzahualcóyotl Araujo Guevara, donde se presenta un ejemplo de rehabilitación de una planta de potabilizadora para aumentar el gasto a potabilizar; además, presenta detalles de los cálculos para la ampliación técnica existente en la potabilizadora en Tamaulipas. También podrás revisar el detalle de los datos requeridos para el rediseño de la planta, así como los criterios para ajustar las nuevas dimensiones de cada técnica analizada. Da clic en la siguiente liga: [http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020113921/1020113921\\_01.pdf](http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020113921/1020113921_01.pdf)



En el *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento: datos básicos*, se describen actividades del anteproyecto para el cálculo de diseño de consumo, demanda y dotación de agua que se considerarán en el diseño de una planta potabilizadora o en una planta de tratamiento de agua residual. En el segmento comprendido en las páginas 58-75 podrás revisar los cálculos de presiones y cargas hidráulicas en los conductos y unidades físicas de cada técnica, aplicables a plantas potabilizadoras y de tratamiento de agua residual. Da clic en la siguiente liga: <http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-1-15fLibro4.pdf>



En el *Manual de sistemas de tratamiento de aguas residuales utilizados en Japón*, revisarás cómo abordan la problemática de tratamiento de agua con poco espacio, aplicando una nueva tecnología denominado sistema Doyoo Yookasoo, que es un proceso biológico mixto (de lecho suspendido-fijo) a una comunidad japonesa de pocos habitantes. Da clic en la siguiente liga:

[https://agua.org.mx/wpcontent/uploads/2013/10/ManualSistemaTratamiento\\_Agua\\_Japon.pdf](https://agua.org.mx/wpcontent/uploads/2013/10/ManualSistemaTratamiento_Agua_Japon.pdf)



Para comprender de una forma visual en qué consisten los procesos aerobios y los anaerobios, **observa** los siguientes videos:

*Planta de tratamiento microbiológica aerobia*

<https://www.youtube.com/watch?v=42VfHxwsjXw>;

*Tratamiento anaerobio opción para la descontaminación de aguas residuales*

<https://www.youtube.com/watch?v=VJ2zRIhH3mg>;

*Tratamiento de aguas residuales: Procesos biológicos*

[https://www.youtube.com/watch?v=n\\_-\\_qFMOAAE](https://www.youtube.com/watch?v=n_-_qFMOAAE) *Lodos activados*

<https://www.youtube.com/watch?v=ckrAZ52sIUw>

<https://www.youtube.com/watch?v=fmvQTUsuoZI>



Para comprender mejor la forma de cómo opera el proceso unitario de desinfección por adsorción en carbón activado, observa los siguientes videos: *Torre de adsorción de carbón activo*

<https://www.youtube.com/watch?v=XRUyVAnDnrE>

*Proceso de adsorción*

<https://www.youtube.com/watch?v=Fxz1GLsl2xA>



Para entender mejor el proceso de desinfección por intercambio iónico, **observa** el siguiente vídeo:

*Intercambio iónico.*

<https://www.youtube.com/watch?v=GGCwbVUFhLs>



Para comprender cómo funciona el proceso unitario de desinfección por osmosis inversa, observa el siguiente video:

*Qué es la osmosis inversa*

<https://www.youtube.com/watch?v=Y8h9dXHmcok>



**Observa** en el documento *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*, la tabla de líneas de investigación sobre los procesos directos y combinados de la técnica de ozonólisis. En la página 62 revisarás las nuevas aplicaciones tanto en el tratamiento de agua residual como en el uso de procesos industriales. Da clic en la siguiente liga:  
[http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2\\_tratamientos\\_avanzados\\_de\\_aguas\\_residuales\\_industriales.pdf](http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2_tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf)



En el documento llamado *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*, observarás detalles de la ingeniería básica de proyecto en plantas de tratamiento de aguas residuales, en sus diversas tecnologías en tratamientos primarios y secundarios, así como detalles sobre los cálculos que se deberán desarrollar para diseñar el proyecto constructivo de la planta de tratamiento de agua residual. Da clic en la siguiente liga:  
[https://www.academia.edu/34842061/Ingenier%C3%A1\\_Da\\_de\\_los\\_sistemas\\_de\\_tratamiento\\_y\\_disposici%C3%B3n\\_de\\_aguas\\_residuales](https://www.academia.edu/34842061/Ingenier%C3%A1_Da_de_los_sistemas_de_tratamiento_y_disposici%C3%B3n_de_aguas_residuales)



Para darte una idea general de la operación de una planta de tratamiento (PTAR), **observa** el siguiente video: *Diagrama de funcionamiento de una planta de tratamiento.*

<https://www.youtube.com/watch?v=57Yxy2wU2iA>

## Fuentes de consulta



### Bibliografía básica:

1. AWWA. (2002). *Calidad y tratamiento del agua: manual de suministros de agua comunitaria*. Madrid: Mc Graw-Hill.
2. CONAGUA. (2007a). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de plantas potabilizadoras tipo de tecnología simplificada.*  
<http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Publicaciones/Publicaciones/Libros/11DisenoDePlantasPotabilizadorasTipoDeTecnologiaSimplificada.pdf>
3. CONAGUA. (2007b). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. cárcamos de bombeo para alcantarillado, funcional e hidráulico.*  
<http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/Libros/03CarcamosDeBombeoParaAlcantarilladoFuncionaleHidraulico.pdf>
4. CONAGUA. (2007c). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Datos básicos.* <http://mapasconagua.net/libros/SGAPDS-115-Libro4.pdf>
5. CONAGUA. (2014a). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento.*  
<http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro23.pdf>
6. CONAGUA. (2014b). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento. Diseño de lagunas de estabilización.*



- <http://aneas.com.mx/wp-content/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro27.pdf>  
7. CONAGUA. (2014c). *Operación y mantenimiento de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales: Lodos activos*. México: Comisión Nacional del Agua.
- <http://aneas.com.mx/wpcontent/uploads/2016/04/SGAPDS-1-15-Libro51.pdf>  
8. Metcalf y Eddy. (2004). *Wastewater Engineering*. Estados Unidos de Norteamérica: McGraw-Hill.
9. Noyola, A., Morgan, J. y Güereca, L. (2013). *Selección de tecnologías para el tratamiento de aguas residuales municipales: guía de apoyo para ciudades pequeñas y medianas*.  
<https://www.globalmethane.org/documents/Seleccion-de-Tecnologias-para-el-Tratamiento-de-Aguas-Residuales-Municipales.pdf>
10. Rodríguez, A., Letón, G., Rosal, G., Dorado, V., Villar, F. y Sanz, G. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*.  
[http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2\\_tratamientos\\_avanzados\\_de\\_aguas\\_residuales\\_industriales.pdf](http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2_tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdf)
11. Valdés, E. y Vázquez, G. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*.  
[https://www.academia.edu/34842061/Ingenier%C3%ADa\\_de\\_los\\_sistemas\\_de\\_tratamiento\\_y\\_disposici%C3%B3n\\_de\\_aguas\\_residuales](https://www.academia.edu/34842061/Ingenier%C3%ADa_de_los_sistemas_de_tratamiento_y_disposici%C3%B3n_de_aguas_residuales)
12. Vargas, L. (2004). Flotación. En (Vargas, L.) Capítulo 8. Flotación. En *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*. (pp. 65-79) Lima: CEPIS/OPS.  
<http://www.bvsde.paho.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manual1/tomoll/ocho.pdf>

#### **Bibliografía complementaria:**

13. Calderón, C. (2013). *Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua. Identificación y descripción de sistemas primarios para el tratamiento de aguas residuales*.  
[repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1165/IMTA\\_068.pdf?...1..y](repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1165/IMTA_068.pdf?...1..y)
14. Fuentes, G. (2010). *Apuntes de tecnología del agua*. México: Universidad Tecnológica de Nezahualcóyotl.
15. Pedroza, E. (2001). Canal Parshal. México: Comisión Nacional del Agua, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
16. Sorrequieta. (2004). *Aguas residuales: reúso y tratamiento. Lagunas de estabilización: una opción para América Latina*.  
[http://www.fbioyf.unr.edu.ar/evirtual/pluginfile.php/2784/mod\\_resource/content/0/2\\_Aguas\\_residuales\\_protegido\\_.pdf](http://www.fbioyf.unr.edu.ar/evirtual/pluginfile.php/2784/mod_resource/content/0/2_Aguas_residuales_protegido_.pdf)



17. SSA. (2000). NOM-127-SSA-1-1994.  
<http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html>
18. WPCF-ASCE. (1982). *Gravity Sanitary Sewer Design and Construction*. American Society of Civil Engineers; Manuals and reports on engineering practice; Water Pollution Control Federation, Manual of practice; USA: FD-5.

#### Fuentes electrónicas:

19. Araujo, N., (1995). *Proyecto hidráulico para ampliación en la capacidad de tratamiento a planta potabilizadora No.1 del municipio de H. Matamoros*. [tesis de maestría]. Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León.  
[http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020113921/1020113921\\_01.pdf](http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020113921/1020113921_01.pdf)
20. Barroso, C. y San Joaquín, P. (2009). *Propuesta de la restitución de arenaria bolosii*. <https://slideplayer.es/slide/2312074/>
21. CIDTA. (2013). *Biodiscos y biocilindros*.  
<http://cidta.usal.es/cursos/ETAP/modulos/libros/BIOCILINDROS.PDF>
22. CONAGUA. (2012). *Terminología*.  
<https://app.conagua.gob.mx/spr/glosario.html>
23. CONAGUA. (2007f). *Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua. Identificación y descripción de sistemas primarios para el tratamiento de aguas residuales*.  
[repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1165/IMTA\\_068.pdf?...1..y](repositorio.imta.mx/bitstream/handle/20.500.12013/1165/IMTA_068.pdf?...1..y)
24. CONAMA. (2013a). *Tecnología de lodos activados*.  
[http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990\\_30.pdf](http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990_30.pdf)
25. CONAMA. (2013b). *Tecnología de biofiltros*.  
[http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990\\_07.pdf](http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990_07.pdf)
26. CONAMA. (2013c). *Tecnología de lagunas aireadas*.  
[http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990\\_29.pdf](http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990_29.pdf)
27. CONAMA. (2013d). *Reactor anaeróbico*.  
[http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990\\_31.pdf](http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990_31.pdf)
28. CONAMA. (2013e). *Tecnología de coagulación y floculación*.  
[http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990\\_05.pdf](http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990_05.pdf)
29. CONAMA. (2013f). *Tecnología de adsorción de carbón activado*.  
[http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990\\_01.pdf](http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990_01.pdf)
30. CONAMA. (2013g). *Tecnologías de intercambio iónico para acondicionamiento y tratamiento de aguas*.  
[http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990\\_18.pdf](http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990_18.pdf)
31. CONAMA. (2013h). *Tecnologías de membrana osmosis inversa*.  
[http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990\\_25.pdf](http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990_25.pdf)



32. CONAMA. (2013i). *Tecnologías de membrana electrodiálisis*.  
[http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990\\_24.pdf](http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990_24.pdf)
33. CONAMA. (2013j). *Separación por gravedad simple y acelerada*.  
Recuperado de: [http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990\\_16.pdf](http://metadatos.mma.gob.cl/sinia/articles-49990_16.pdf)
34. Delgado, J., Gutiérrez, C., Salazar, F., Guevara, M., Mercado, R. y Pereira, J. (2013). *Aplicación de conceptos clásicos de la física en la práctica ingenieril. La ley de Stokes como herramienta conceptual en el análisis de procesos de deshidratación del petróleo*.  
[www.revistas.unam.mx/index.php/req/article/download/36756/33295](http://www.revistas.unam.mx/index.php/req/article/download/36756/33295)
35. Dow. (2013). *Membrana EDI-310*.  
<https://www.dupont.com/products/EDI310.html>
36. Hammeken, A. y Romero, G. (2005). *Análisis y diseño del tratamiento primario. Análisis y diseño de una planta de tratamiento de agua residual para el municipio de San Andrés Cholula*.  
[http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lic/hammeken\\_a\\_am/indice.html](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lic/hammeken_a_am/indice.html)
37. INEGI. (2010). *Censo de población y vivienda*.  
<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/>
38. Jiménez, T. (2013). *Manual para el diseño de sistemas de agua potable y alcantarillado sanitario*.  
<http://www.uv.mx/ingenieriacivil/files/2013/09/Manual-de-Diseno-paraProyectos-de-Hidraulica.pdf>
39. Mexicored. (2014). *Generadores de ozono para tratamiento de agua*.  
<http://generadores-de-ozono-para-tratamiento-deagua.mexicored.com.mx/>
40. Rivera, A., Ramírez, R., y Durán, A. (2013). *Pruebas RSSCT con micolumnas de carbón activado para remover materia orgánica natural (mon) presente en aguas naturales*.  
<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico13/054.pdf>
41. UNAD. (2013). *Diseño de plantas potabilizadoras*.  
<https://academia.unad.edu.co/componente-practico/practicas-decampo/ecapma/ambiental/cursos/504-358040-diseno-de-plantaspotabilizadoras>