

# capítulo/Once Tratamiento de aguas residuales

James R. Mihelcic,  
David W. Hand,  
Martin T. Auer

*En este capítulo, los lectores aprenderán sobre la composición del agua residual y los varios procesos unitarios empleados para remover los varios constituyentes de calidad del agua. El balance de masa y la cinética bioquímica se emplean para desarrollar expresiones para dar tamaño a un reactor biológico utilizado para remover la demanda de oxígeno bioquímico. Los procesos de tratamiento natural menos mecanizados como los humedales libres superficiales y las lagunas también se comentan. El tratamiento de nitrógeno y fósforo es también comentado, junto con el procesamiento de lodo producido en la planta de tratamiento. Los lectores también aprenderán acerca de los requerimientos de energía (y fuentes de energía) en términos de tecnologías de tratamiento de aguas residuales y cómo la operación de una planta influencia el uso de energía.*

## Secciones principales

- 11.1 Introducción
- 11.2 Características de las aguas residuales domésticas
- 11.3 Visión general de los procesos de tratamientos
- 11.4 Tratamiento preliminar
- 11.5 Tratamiento primario
- 11.6 Tratamiento secundario
- 11.7 Modificaciones al proceso de lodo activado
- 11.8 Reactores de crecimiento adjunto
- 11.9 Eliminación de nutrientes: nitrógeno y fósforo
- 11.10 Desinfección y aireación
- 11.11 Tratamiento y desecho del lodo
- 11.12 Sistemas naturales de tratamiento
- 11.13 Uso de energía durante el tratamiento de aguas residuales

## Objetivos de aprendizaje

1. Identificar los distintos insumos hidrológicos, físicos, químicos y biológicos que hacen las aguas residuales municipales y enlistar las concentraciones típicas de los principales constituyentes.
2. Hacer coincidir los constituyentes principales de las aguas residuales con el(los) proceso(s) unitario(s) que eliminan una cantidad significativa de cada constituyente.
3. Diseñar un tanque desarenador, una cuenca de equalización de flujos, un sistema de tratamiento biológico de lodo activado y un estanque de estabilización.
4. Integrar los balances de masa con la cinética de crecimiento biológico para desarrollar ecuaciones de diseño de lodo activado y relacionar el tiempo de retención de sólidos, la proporción alimento a microorganismo, desecho de lodo y la cinética de crecimiento para el diseño y operación de plantas.
5. Enfatizar con la magnitud de la cobertura de saneamiento global y su relación con la salud humana.
6. Enlistar las ventajas y las desventajas de los biorreactores de membrana.
7. Enlistar los componentes del manejo de sólidos de aguas residuales, calcular el índice de volumen de lodo y relacionar este valor con las características de solución del lodo.
8. Relacionar la configuración y la operación de una planta de tratamiento de aguas residuales con la eliminación del nitrógeno y el fósforo mediante procesos bioquímicos y químicos.
9. Describir procesos de eliminación específicos que suceden en diferentes zonas de tratamiento en lagunas facultativas y humedales libres superficiales.
10. Identificar la magnitud del uso de energía durante el tratamiento de aguas residuales y los gases de invernadero emitidos de diferentes procesos unitarios.
11. Identificar fuentes de energía que se pueden obtener del tratamiento de aguas residuales.

## 11.1 Introducción

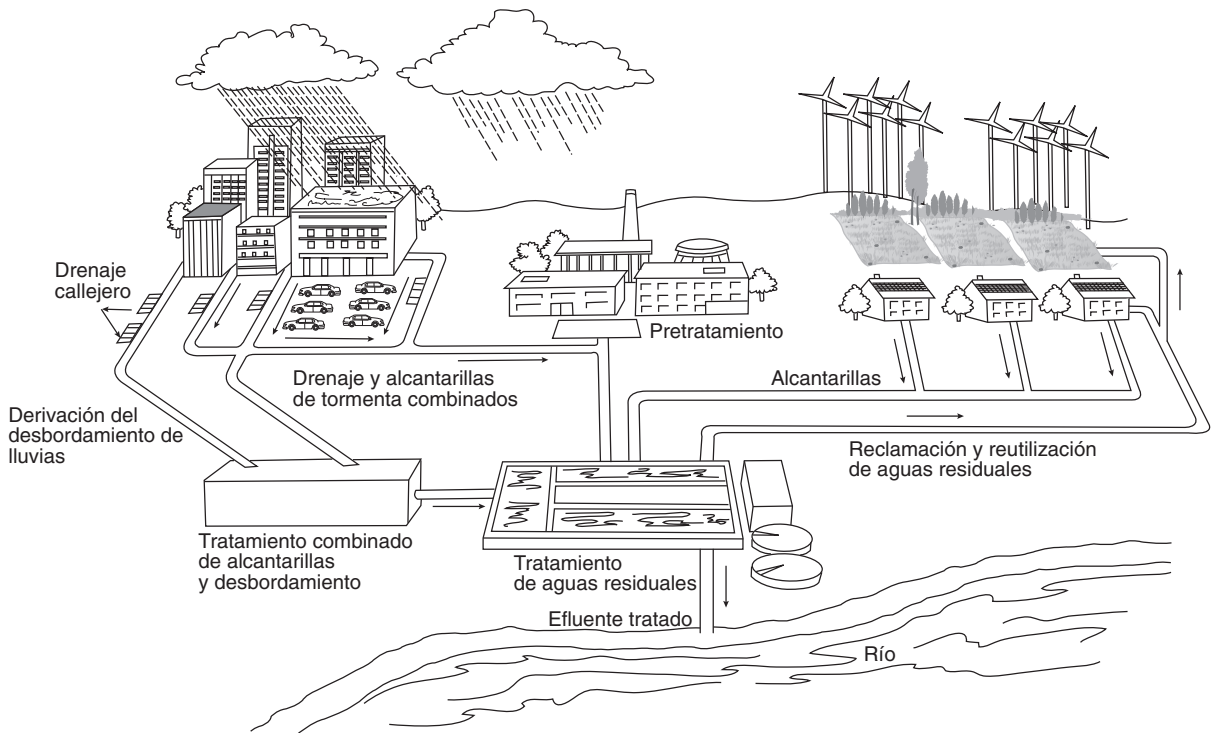
Las **plantas municipales de tratamiento de aguas residuales**, también referidas como **trabajos de tratamiento de propiedad pública (POTW)**, reciben insumos de muchas fuentes domésticas e industriales. Estos insumos hidrológicos distintos se ilustran en la figura 11.1. Existen cuatro componentes de **agua residual doméstica**: 1) agua residual de usuarios domésticos, comerciales e industriales; 2) escorrentía de aguas pluviales; 3) infiltración y, 4) afluencia. La infiltración y la afluencia se comentaron en el capítulo 9. Con el incremento de la población, el cambio climático, el ciclo de los nutrientes y la escasez de agua haciéndose comunes, el tratamiento sustentable de aguas residuales debe direccionar asuntos más allá del desempeño y costo del tratamiento.

Las aguas residuales industriales varían en cantidad, composición y fuerza, dependiendo de la fuente industrial específica. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha identificado 129 *contaminantes prioritarios*. Los desechos industriales incluyen contaminantes convencionales encontrados en aguas residuales domésticas pero también pueden contener metales pesados, materiales radioactivos y orgánicos refractarios. Las industrias pueden elegir tratar su desecho en sitio, siguiendo los lineamientos específicos para el *mejor tratamiento disponible* y *lineamientos efluentes* para los contaminantes prioritarios. También pueden elegir enviar sus residuos a alcantarillas hacia una planta municipal de tratamiento de aguas residuales, después de primero proporcionar pretatamiento para proteger la operación de la planta de tratamiento municipal y evitar la descarga de contaminantes de paso.



### Introducción a las aguas residuales

**Figura 11.1 Manejo de infraestructura de aguas residuales** Este esquema muestra los muchos contaminantes contribuyentes hidrológicos y químicos posibles a las aguas residuales municipales.



## Recuadro / 11.1 Tecnologías mejoradas de saneamiento

La tabla 11.1 proporciona la definición global para las tecnologías de saneamiento *mejoradas y no mejoradas*. Actualmente, 2.5 mil millones de personas en el mundo no tienen acceso a la tecnología de saneamiento mejorada (incluyendo 1.2 mil millones que no tienen ninguna instalación), y la falta de saneamiento tiene gran impacto negativo en la salud humana y el medio ambiente (UNICEF y OMS, 2008).

**Tabla / 11.1**

### Tecnologías de saneamiento mejoradas y no mejoradas: definiciones globales

Mejoradas	No mejoradas
Conexión con una alcantarilla pública	Letrinas de servicio o de cubo (el excremento es removido en forma manual)
Conexión con un sistema séptico	Letrinas públicas
Letrinas de sifón	Letrinas abiertas
Letrinas de pozo con ventilación mejorada	
Letrinas de composta Letrinas de pozo simple	

La percepción de saneamiento varía significativamente de cultura en cultura. Las mejoras en la salud no son las únicas razones por las que las comunidades aceptan proyectos de saneamiento. De acuerdo con un estudio de hogares rurales en Filipinas, las razones por las que la gente estaba satisfecha con sus nuevas letrinas construidas incluían que ya no había mal olor y moscas, alrededores más limpios, privacidad, menos vergüenza con la visita de los amigos y menos incidencia de enfermedades gastrointestinales (Cairncross y Feachem, 1993). Para ejemplo de un diseño de letrina apropiado utilizado en la república de Vanuatu, isla del Pacífico sur, vea la figura 11.2.

Fry et al. (2008) analizaron las barreras para la cobertura de saneamiento global incluyendo la inversión inadecuada, las políticas pobres o inexistentes, el gobierno,



**Figura 11.2 Letrina de composta de doble bóveda en construcción en Vanuatu** Estas letrinas se pueden diseñar para separar orina y heces. La orina es enrutada a un pozo de jabón o recolectada en una olla o enrutada hacia un jardín y utilizada como fertilizante. Un lado de la letrina es utilizado por hasta 12 meses, mientras que el otro lado es composta. Los desecantes como la madera de fresno y el aserrín son añadidos para reducir olores y matar patógenos. El cobertizo de privacidad se construye de madera local y materiales tejidos de planta. Las letrinas de composta no requieren adición de agua, a diferencia de otras tecnologías de saneamiento, y permiten que los nutrientes se utilicen en forma local.

Foto cortesía de Eric Tawney.

pocos recursos, disparidades de géneros y disponibilidad del agua. Los retos estudiados se encontraron como barreras significativas para la cobertura del saneamiento, pero la disponibilidad del agua no fue un obstáculo primario a una escala global. Sin embargo, la disponibilidad del agua se encontró como una barrera importante para algo así como 46 millones de personas, dependiendo de la tecnología de saneamiento seleccionada.

Un propósito del tratamiento municipal de aguas residuales es el de prevenir la contaminación de agua superficial receptora o agua subterránea receptora. Ejemplos de los contaminantes asociados con el agua residual no tratada incluyen el agotamiento de oxígeno disuelto (medido como BOD y COD), sólidos desagradables a la vista y que provocan agotamiento de oxígeno (TSS), nutrientes que provocan la eutrofización (N y P), químicos que ejercen toxicidad ( $\text{NH}_3$ , metales, orgánicos), químicos emergentes preocupantes y patógenos (bacterias y virus). Los problemas estéticos incluyen contaminación visual y olor. En términos de patógenos, los seres humanos producen en promedio  $10^{11}$  a  $10^{13}$  de bacterias coliformes por día. Mientras que los procesos de tratamiento son muy eficientes para la eliminación de patógenos y otros contaminantes, en el futuro cercano las plantas de tratamiento necesitarán preocuparse por la eliminación de otros químicos que se encuentran ahora en las aguas residuales. Éstos incluyen fragancias, tensoactivos encontrados en jabones y detergentes, químicos farmacéuticos, químicos disruptores de endocrinas y otros **químicos emergentes preocupantes**.

A través de la Ley de Control de Contaminación del Agua Federal de 1972 (comúnmente conocida como **Ley de agua limpia**), el Congreso de Estados Unidos estableció una estrategia nacional para reducir la contaminación del agua. Los objetivos de la Ley de agua limpia son el de restaurar y mantener la integridad química, física y geológica de las aguas de la nación estadounidense al lograr un nivel de calidad de agua que proporcione la protección y propagación de peces, mariscos y vida silvestre y para la recreación sobre y adentro del agua, y que finalmente elimine la descarga de contaminantes en las aguas de Estados Unidos (cero descarga). Esto se logra a través del **Sistema Nacional de Eliminación de Descargas de Contaminantes (NPDES)** cuyas normas permiten la definición de tipos y cantidades de sustancias contaminantes que se pueden descargar. El sistema de permisos del NPDES se impone y obliga a nivel estatal. La violación de los estándares de efluentes basados en la tecnología y en la calidad del agua puede resultar en sanciones civiles (multas) y sanciones penales (prisión).

## 11.2 Características de las aguas residuales domésticas

Las aguas residuales *crudas* (esto es, no tratadas) son consideradas como altamente contaminadas, aún cuando la cantidad de contaminantes que éstas contengan pueda parecer pequeña. Por ejemplo,  $1 \text{ m}^3$  de agua residual municipal pesa alrededor de 1 millón de g, aunque pueda contener sólo 500 g de contaminantes. Sin embargo, esta pequeña fracción de contaminante puede tener serios impactos ecológicos y a la salud si se descarga sin tratar.

El agua residual doméstica es aparentemente gris y turbia y tiene una temperatura de  $10^\circ\text{C}$  a  $20^\circ\text{C}$ . La tabla 11.2 proporciona la composición de **agua residual municipal de resistencia promedio** y muestra los más comunes **constituyentes de aguas residuales municipales**. En este momento no se entrará en gran detalle acerca de cada constituyente, ya que su medición e importancia fueron descritas en capítulos previos como se observa en la tabla 11.2. A medida que se comenten los varios procesos unitarios para tratamiento, podrá querer referirse otra vez a esta tabla, debido a que procesos específicos remueven diferentes constituyentes de aguas residuales.

### Programa conjunto de monitoreo para la provisión y saneamiento de agua

<http://www.unicef.org/>

### Ley de agua limpia

<http://www.epa.gov/lawsregs/laws/cwa.html>.



### Fuentes y características de aguas residuales

#### Discusión en clase



¿Cómo la conservación agresiva de agua doméstica influencia las características de las aguas residuales domésticas? Vuelva a

visitar este tema más adelante en el capítulo para comentar cómo afecta la conservación del agua a la recolección, tratamiento y operación de una planta de tratamiento de aguas residuales.



© david pulicino/iStockphoto.

### Descargas de cruceros

[http://www.epa.gov/owow/oceans/cruise\\_ships](http://www.epa.gov/owow/oceans/cruise_ships)



Tabla / 11.2

**Concentración de los constituyentes principales encontrados en aguas residuales de resistencia promedio**

Constituyente	Comentado previamente en	Concentración promedio	Comentarios
Demanda bioquímica de oxígeno (BOD)	Capítulos 2, 3 y 5	200 mg/L	Los materiales demandantes de oxígeno pueden provocar agotamiento del contenido de oxígeno de aguas receptoras.
Sólidos suspendidos	Capítulos 2 y 10	240 mg/L (sólidos totales típicamente 800 mg/L)	Provocan que el agua sea turbia; pueden contener materia orgánica y por lo tanto contribuir a la BOD; pueden contener otros contaminantes o patógenos.
Patógenos	Capítulos 5 y 10	3 millones de coliformes por 100 mL	Microorganismos causantes de enfermedades usualmente asociadas con materia fecal.
Nutrientes como el nitrógeno y el fósforo	Capítulos 3 y 5	Nitrógeno total: 35 mg N/L Nitrógeno inorgánico: 15 mg N/L Fósforo total: 10 mg P/L	Pueden acelerar el crecimiento de plantas acuáticas, contribuir a la eutrofización; el amonio es tóxico para la vida acuática, puede contribuir al NBOD.
Químicos tóxicos	Capítulos 3, 5, 6 y 10	Variable	Metales pesados como el mercurio, cadmio y cromo; químicos orgánicos como pesticidas, solventes, productos de combustibles.
Químicos emergentes preocupantes	Capítulos 6 y 10	Desconocido o variable	Farmacéuticos, cafeína, tensoactivos, fragancias, perfumes, otros químicos disruptores de endocrinas.

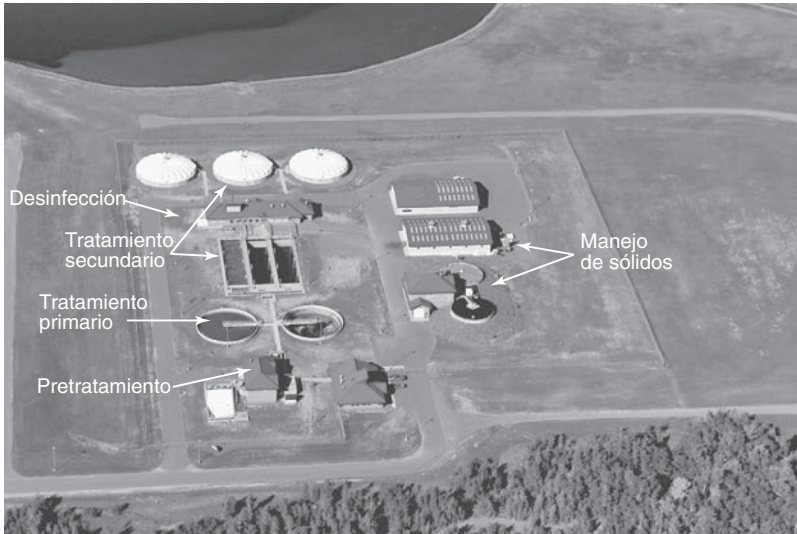


### Visión general del tratamiento de aguas residuales

## 11.3 Visión general de los procesos de tratamientos

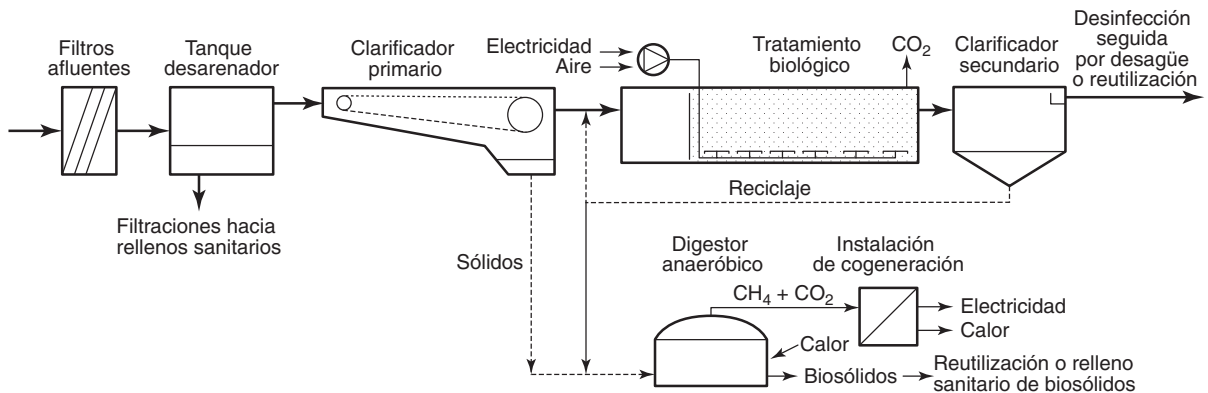
El diseño y la operación de una instalación de tratamiento de aguas residuales requiere un entendimiento de las operaciones de unidad que emplean procesos fundamentales físicos, químicos y biológicos (vea los capítulos 3, 4 y 5) para eliminar constituyentes específicos de la calidad del agua. El correcto montaje del tren de proceso de eliminación requiere el cumplimiento de cuatro tareas: 1) identificar las características del agua residual no tratada, 2) identificar los objetivos de tratamiento y evaluar la participación de la comunidad, 3) integrar operaciones de unidad en un proceso completo que reconozca la oportunidad y límites de cada proceso unitario y cómo se complementan entre sí y, 4) integrar conceptos de ingeniería verde, pensando en el ciclo de vida, y sustentabilidad para incorporar asuntos más allá de los estándares de tratamiento de final de tubería y los costos capitales y operacionales (por ejemplo, la reutilización del agua y el consumo de energía).

La figura 11.3 proporciona una vista aérea de una planta típica de tratamiento municipal de aguas residuales. El dibujo esquemático en la figura 11.4 muestra cómo los diferentes procesos unitarios se pueden integrar. Los diferentes procesos suceden para el tratamiento de corrientes de desecho líquido



**Figura 11.3 Vista general de una planta de tratamiento de aguas residuales** Esta planta sirve aproximadamente a 14000 personas.

Foto cortesía de Portage Lake Water and Sewage Authority.



**Figura 11.4 Disposición típica de una planta convencional de tratamiento de aguas residuales** El tratamiento preliminar con pantallas y eliminación de arenilla es seguido por un clarificador primario, tratamiento biológico, un segundo clarificador y tratamiento anaeróbico del lodo.

Adaptado de la figura proporcionada por el doctor Diego Rosso, Universidad de California-Irvine.

y sólido. Los pasos involucrados en el tratamiento convencional de aguas residuales son: 1) pretratamiento, 2) tratamiento primario, 3) tratamiento secundario, 4) tratamiento terciario para remover nutrientes (N, P) y, 5) desinfección. Con el agua residual ahora vista como un recurso por muchas comunidades, el diagrama de flujo para el tratamiento convencional de aguas residuales ahora está cambiando para acomodar las cuestiones de la reutilización del agua.

De conformidad con la sección 304(d) de la Ley pública 92-500, la EPA publicó su definición de estándares mínimos para tratamiento secundario. La tabla 11.3 proporciona una visión general de estos estándares de tratamientos y los procesos unitarios específicos que eliminan cantidades significativas de constituyentes de aguas residuales específicos.

Tabla / 11.3

**Estándares mínimos para tratamientos y procesos unitarios que eliminan una cantidad significativa de los principales constituyentes del agua residual**

Constituyente y estándar de la EPA para tratamiento mínimo	Proceso(s) de unidad que elimina(n) una cantidad significativa del constituyente
<b>Demanda bioquímica de oxígeno (BOD):</b> El $\text{DBO}_5$ mensual permisible es de 30 mg/L y el $\text{BOD}_5$ semanal es de 45 mg/L.	El BOD puede estar en forma de partículas o disuelto. Reactor biológico; sedimentación primaria y secundaria.
<b>Sólidos suspendidos:</b> El TSS mensual permisible es de 30 mg/L y el TSS semanal es de 45 mg/L.	Sedimentación primaria y secundaria.
<b>Patógenos:</b> Depende del permiso de la NPDES con base en el agua receptora (por ejemplo, en la planta ilustrada en la figura 10.3, los coliformes fecales <200 cuentas/mL promedio mensual o <400 cuentas/mL promedio semanal).	Sedimentación primaria y secundaria; desinfección. La depredación también sucede en el reactor biológico.
<b>Nutrientes como el nitrógeno y el fósforo:</b> Depende de los permisos de la NPDES.	Los nutrientes pueden estar disueltos o en partículas. Sedimentación; reactor biológico; adición de químicos para precipitar el fósforo.
<b>Químicos tóxicos</b>	Algunos se remueven vía sedimentación (si son absorbidos o en complejos por partículas), algunos son biodegradables, y algunos pasan a través de la planta de tratamiento.
<b>pH:</b> La descarga debe estar en un rango de 6.5 a 10.0	No aplica.

**Cartilla de tratamiento de aguas residuales**

<http://www.epa.gov/owm/primer.pdf>

## 11.4 Tratamiento preliminar

El **tratamiento preliminar** prepara las aguas residuales para más tratamiento. Se utiliza para eliminar espuma aceitosa, escombros flotantes y arenilla, los cuales pueden inhibir los procesos ecológicos y dañar el equipo mecánico. Los tanques equalizadores se utilizan para balancear flujos o carga orgánica. Los efluentes industriales pueden requerir adicionalmente pretratamiento físico-químico para la eliminación de amonio-nitrógeno (extracción con aire), ácidos/bases (neutralización), metales pesados (oxidación/reducción, precipitación) o aceites (flotación de aire disuelto).

### 11.4.1 FILTRACIÓN

Los **bastidores de barrera** (barras o rodillos paralelos de 20-150 mm) y los **filtros de barrera** (placas o mallas perforadas de 10 mm o menos) retienen los sólidos gruesos (objetos grandes, harapos, papel, botellas de plástico, etc.) presentes en el agua residual, previniendo el daño a la tubería y al equipo mecánico que sigue este paso del tratamiento (figura 11.5). Se limpian a mano en algunas plantas más viejas y más pequeñas, pero la mayoría están equipadas con rastrillos limpiadores automáticos. Típicamente se dispone de las filtraciones enviándolas a rellenos sanitarios o a incineración.

Como una alternativa a los filtros, algunas plantas utilizan un **pulverizador**, el cual muele (pulveriza) los sólidos gruesos sin removerlos del flujo de aguas residuales. Esta reducción en tamaño hace que el sólido sea más fácil de tratar en operaciones subsecuentes que emplean el asentamiento.

Los pulverizadores eliminan la necesidad del manejo y el desecho de sólidos gruesos removidos durante la filtración.

### 11.4.2 TANQUES DESARENADORES

La **arenilla** consiste de materiales de partículas en el agua residual que tienen gravedades específicas de aproximadamente 2.65 y temperatura de 15.5° C. Las partículas con gravedades específicas entre 1.3 y 2.7 también se han removido con base en los datos de campo. La arenilla puede consistir de arena inorgánica o grava (de alrededor de 1 mm de diámetro), cascarnes de huevo, fragmentos de hueso, piezas y semillas de frutas y vegetales y granos de café.

La arenilla es principalmente removida para prevenir la abrasión de la tubería y el equipo mecánico. Durante la eliminación de arenilla algunos materiales orgánicos se remueven junto con la arenilla. El equipo de lavado de arenilla se añade algunas veces para remover materiales orgánicos y regresarlos al agua residual.

Para los sistemas de flujo horizontal, la arenilla es removida a través de la sedimentación por gravedad (utilizando la ley de Stokes o la ley de Newton). En un **tanque desarenador** aireado, el aire es introducido a través de un lado del tanque, lo cual proporciona un patrón de flujo helicoidal del agua residual a través de la cámara, habilitando a la arenilla para asentarse mientras se conserva el material orgánico más pequeño suspendido en el agua residual. El *tanque desarenado aireado* tiene la ventaja añadida de que conserva el agua residual fresca al añadirle oxígeno al agua residual. En un *tanque desarenador de vórtice*, el agua residual entra y sale tangencialmente, creando un patrón de flujo de vórtice en donde la arenilla se asienta en el fondo del tanque.

Los sistemas aireado y de vórtice están diseñados con base en los parámetros típicos de diseño. Por ejemplo, la tabla 11.4 proporciona información del diseño utilizado para dar tamaño a un tanque desarenador aireado. Estos tanques son diseñados normalmente para remover partículas con diámetros de al menos 0.21 mm. Los tiempos de detención van de 2 a 5 minutos con base en un flujo pico por hora, y las tasas de flujo de aire van de 0.2 a 0.5 m<sup>3</sup> de aire por minuto por longitud de tanque. El ejemplo 11.1 ilustra el diseño de un tanque desarenador aireado.

**Tabla / 11.4**

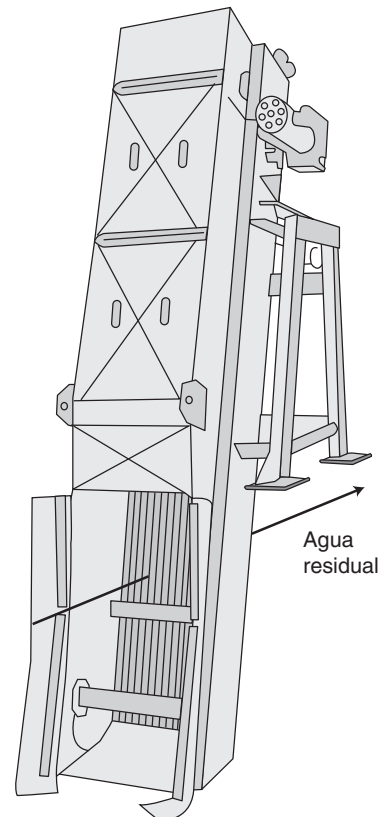
**Información de diseño utilizada para dar tamaño a tanques desarenadores aireados**

Parámetro	Rango
Tiempo de detención de flujo pico (min)	2-5
Profundidad (m)	2-5
Longitud (m)	7.5-20
Ancho (m)	2.5-7
Proporción de ancho a profundidad	1:1 a 5:1
Proporción de longitud a ancho	3:1 a 5:1
Requerimiento de aire por longitud de tanque (m <sup>3</sup> /m-min)	0.2-0.5
Cantidad de arenilla (m <sup>3</sup> /10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )	0.004-0.20

FUENTE: Valores obtenidos de Tchobanoglous et al. (2003).



**Simulador de tanque desarenador**



**Figura 11.5 Filtros de barrera utilizados para remover sólidos gruesos del agua residual** Si no se remueven, estos sólidos pueden dañar la tubería y el equipo mecánico que sigue en el proceso de tratamiento.



### ejemplo/11.1 Diseño de un tanque desarenador aireado

Diseñe un sistema de tanque desarenador aireado para tratar un flujo sostenido de hora pico de 1 día de  $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$  con un flujo promedio de  $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Determine: *a*) el volumen del tanque desarenador (suponiendo que se usarán dos tanques), *b*) las dimensiones de los dos tanques desarenadores, *c*) el tiempo de retención hidráulica promedio en cada tanque desarenador, *d*) los requerimientos de aire, suponiendo  $0.35 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{min}$  de aire y, *e*) la cantidad de arenilla removida en el flujo pico, suponiendo un valor típico de  $0.015 \text{ m}^3/10^3/\text{m}^3$  de arenilla en el agua residual no tratada.

### solución

Mucho de este problema se puede resolver con la guía de diseño proporcionada en la tabla 11.4.

1. El volumen de los tanques desarenadores se determina suponiendo un tiempo de detención de 3 minutos:

$$\begin{aligned} \text{volumen total del tanque desarenador} &= 1.5 \text{ m}^3/\text{s} \times 3 \text{ min} \times 60 \text{ s/min} \\ &= 270 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{volumen de cada tanque desarenador} = \frac{1}{2} \times 270 \text{ m}^3 = 135 \text{ m}^3$$

2. Si se supone una proporción ancho a profundidad de 1.5:1 y una profundidad de 3 m, las dimensiones de los dos tanque desarenadores son

$$\text{ancho del tanque desarenador} = 1.5 \times 3 \text{ m} = 4.5 \text{ m}$$

$$\text{largo del tanque desarenador} = \frac{\text{volumen}}{\text{ancho} \times \text{largo}} = \frac{135 \text{ m}^3}{4.5 \text{ m} \times 3 \text{ m}} = 10 \text{ m}$$

3. El tiempo de detención hidráulica promedio en cada tanque desarenador está basado en la tasa promedio de flujo:

$$\text{tiempo de detención} = \frac{\text{volumen}}{\text{flujo}} = \frac{135 \text{ m}^3}{(0.6 \text{ m}^3/\text{s})/(2 \text{ tanques})} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 7.5 \text{ min}$$

4. Los requerimientos de aire, suponiendo  $0.35 \text{ m}^3/\text{m} \times \text{min}$  de aire, son

$$\begin{aligned} \text{total de requerimiento de aire} &= (2 \text{ tanques}) \times (10 \text{ m de largo}) \\ &\times (0.35 \text{ m}^3 \text{ de aire}/\text{m} \times \text{min}) = 7.0 \text{ m}^3/\text{min} \end{aligned}$$

5. Finalmente, encuentre la cantidad de arenilla para disponer, asumiendo condiciones de flujo de pico:

$$\begin{aligned} \text{volumen de arenilla} &= (1.5 \text{ m}^3/\text{s}) \times (0.015 \text{ m}^3/10^3 \text{ m}^3) \\ &\times (86\,400 \text{ s}/\text{día}) = 1.94 \text{ m}^3/\text{día} \end{aligned}$$

Métodos de diseño similares son empleados para dar tamaño al flujo horizontal y los dispositivos de vórtice de eliminación de arenilla.

### 11.4.3 FLOTACIÓN

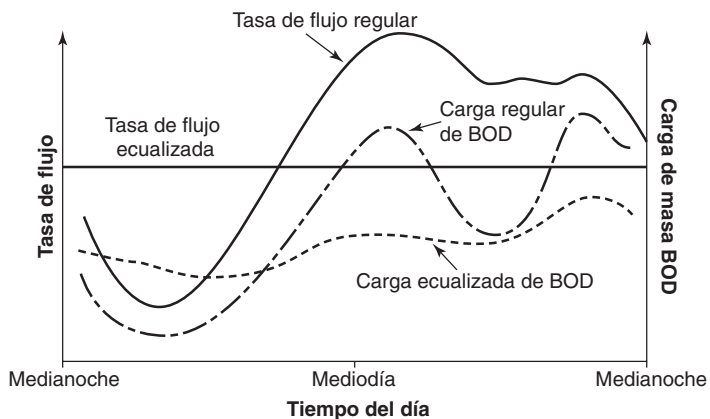
La **flotación** es lo opuesto a la sedimentación, usando flotabilidad para separar las partículas sólidas como grasas, aceites y lubricantes, lo cual no se conformaría por sedimentación. El proceso de separación se cumple mediante la introducción de aire en el fondo de un tanque de flotación. Las burbujas de aire se elevan hacia la superficie en donde son removidas por desnate. Una variación popular en este esquema se denomina *flotación de aire disuelto*. El efluente reciclado es retenido en una vasija de presión en donde es mezclado y saturado con aire. El efluente entonces se mezcla con el agua residual cruda, y a medida que la presión regresa a lo atmosférico, el aire disuelto sale de la solución cargando sólidos flotantes hacia la superficie, en donde pueden hacerse nata y recolectarse.

Hoy en día, las grasas, los aceites y los lubricantes (denominados FOG), específicamente, material generado en restaurantes locales, no tienen que volverse parte de la corriente de aguas residuales. Pueden fácilmente convertirse en biodiesel (el cual podría ayudar a proveer de combustible la flota vehicular de su comunidad) y utilizados para generar energía, cuando se combinan con gas digestor, o utilizados como un combustible suplementario en las plantas de desecho sólido a energía.

### 11.4.4 ECUALIZACIÓN

La **ecualización de flujo** es implementada para humedecer el flujo y la tasa de carga orgánica para una instalación de tratamiento de aguas residuales. Recuerde del capítulo 9 que grandes variaciones ocurren en el flujo por muchas razones. La implementación de ecualización de flujo en algunas instancias puede superar problemas operacionales asociados con las grandes variaciones de flujo y mejorar el desempeño de los procesos unitarios corriente abajo. Por ejemplo, los procesos biológicos utilizados durante el tratamiento de aguas residuales pueden ser más fácilmente controlados con una tasa de flujo estático y una carga casi constante de DBO. En adición, la implementación de ecualización de flujo puede reducir el tamaño de los procesos de tratamiento corriente abajo y en algunos casos mejorar el desempeño en las plantas que están sobrecargadas.

La figura 11.6 compara la tasa de flujo diurno y la variación de carga de DBO con un flujo ecualizado y un patrón de carga de DBO. La carga



**Figura 11.6** Cambios en la tasa de flujo regular y la carga de masa regular de BOD durante un día típico. La tasa de flujo ecualizada se muestra como una constante, y la carga de BOD ecualizada es humedecida, así es que variaciones más grandes durante el día son eliminadas.

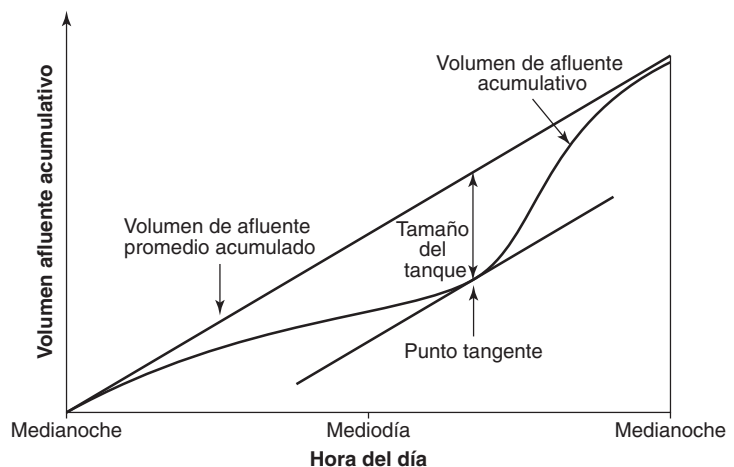
de BOD es igual al flujo por la concentración de BOD en el agua residual y tiene unidades de kg de BOD/m<sup>3</sup> de agua residual por día. Como muestra la figura 11.6, el humedecimiento de la tasa de flujo y BOD puede ser considerable.

La ecualización del flujo se puede lograr de dos maneras: ecualización en línea o fuera de línea. La *ecualización en línea* es el proceso en el que todo el flujo pasa a través de la cuenca de ecualización. En contraste, con la *ecualización fuera de línea*, sólo una porción del flujo es desviada a través de la cuenca de ecualización. La ecualización de flujo fuera de línea requiere que el flujo desviado sea bombeado y mezclado con el afluente de la planta cuando la tasa de flujo afluente hacia la planta se reduce. Esto ocurre típicamente tarde en la noche. En este caso, el flujo se puede ecualizar, pero el cambio en la carga de BOD es reducido menos que con la ecualización de flujo en línea. Por lo tanto, la ecualización en línea es típicamente utilizada cuando se requiere humedecimiento astringente del flujo y de la carga orgánica.

Los diagramas de masa como el mostrado en la figura 11.7 se pueden utilizar para determinar el *volumen de almacenamiento de ecualización*. La figura 11.7 muestra el *volumen de afluente acumulado* y el *volumen de afluente acumulado promedio* como una función de la hora del día. Para determinar el volumen requerido de ecualización, tome la distancia vertical entre el volumen promedio y la línea paralela que es tangente con la curva de volumen de la afluencia para la figura 11.7. El punto tangente en la curva de afluente acumulado es en donde el tanque de ecualización está vacío. A medida que el tiempo avanza, la pendiente de la curva de afluente acumulado es mayor que la curva de afluente promedio. El tanque de ecualización se llenará alrededor de la medianoche, cuando las pendientes de ambas curvas son casi iguales. De la medianoche a pasado el mediodía la pendiente de la curva de afluente acumulado es menor que la curva promedio, lo que significa que el tanque de ecualización está perdiendo volumen (está drenando).

**Figura 11.7 Volumen de afluente acumulado y volumen de afluente acumulado promedio como una función de la hora del día**

El volumen de afluente acumulado promedio y el volumen de afluente acumulado se pueden trazar para determinar el tamaño del tanque requerido para el volumen de almacenamiento de ecualización. Después de que se determina el punto tangente en la curva de volumen de afluente acumulado, se dibuja una línea en paralelo a la curva de la línea del volumen de afluente acumulado promedio. La distancia entre el punto tangente y la curva de volumen de afluente acumulado promedio es el volumen de almacenamiento requerido. La curva dibujada a través del punto tangente proporciona información sobre cuándo el volumen de almacenamiento se está llenando y vaciando.



Para la figura 11.7, el volumen de equalización se encontraría en la tangente de ambas líneas paralelas en la curva de volumen de afluente acumulado. Durante el tiempo entre los dos puntos tangentes, aproximadamente a la 1 p.m. y alrededor de la medianoche, la cuenca de equalización se está llenando, y la pendiente de la curva de volumen de afluente acumulado es mayor que la curva de volumen de afluente acumulado promedio. Alrededor de la medianoche hasta la 1 p.m., la pendiente de la curva de volumen de afluente acumulado es menor a la curva de volumen de afluente promedio, y el tanque de equalización se está drenando.

### ejemplo/11.2 Dar tamaño a un tanque de equalización de flujo

Dados los datos para los flujos por hora promedio mostrados en la tabla 11.5 (en las dos columnas de la izquierda), determine el volumen requerido de equalización de flujo en línea ( $m^3$ ).

**Tabla / 11.5**

**Datos y resultados para el problema de equalización de flujo en el ejemplo 11.2** El flujo afluente acumulativo promedio (no mostrado, unidades de  $m^3/h$ ) se determina al dividir el volumen de afluente acumulado entre 24 horas.

Periodo	Volumen de flujo durante el periodo ( $m^3$ )	Volumen de afluente acumulativo ( $m^3$ )
Medianoche a 1 a.m.	1090	1090
1 a 2	987	2077
2 a 3	701	2778
3 a 4	568	3346
4 a 5	487	3833
5 a 6	475	4308
6 a 7	532	4840
7 a 8	838	5678
8-9	1375	7053
9-10	1565	8618
10-11	1630	10248
11 a mediodía	1649	11897
Mediodía a 1	1640	13537
1 a 2	1545	15082

(Continúa)

## ejemplo/11.2 Continuación

Tabla / 11.5

Periodo	Volumen de flujo durante el periodo (m <sup>3</sup> )	Volumen de afluente acumulativo (m <sup>3</sup> )
2 a 3	1495	16577
3 a 4	1490	18067
4 a 5	1270	19337
5 a 6	1270	20607
6 a 7	1290	21897
7 a 8	1424	23321
8 a 9	1548	24869
9 a 10	1550	26419
10 a 11	1476	27895
11 a medianoche	1342	29237

## solución

Esta solución requiere diversos pasos. Primero, determine el flujo acumulado por hora durante el periodo. Las respuestas se muestran en la columna derecha de la tabla 11.5. Para un periodo el flujo acumulado por hora es

$$\left[ \begin{array}{l} \text{flujo acumulado} \\ \text{por hora, 1-2 A.M.} \end{array} \right] = V_{M-1} + V_{1-2} = 1090 + 987 = 2077 \text{ m}^3$$

Entonces, para determinar el volumen de afluente acumulado promedio (no enlistado en la tabla), divida el flujo acumulativo (enlistado en la tabla) entre 24 horas:

$$\text{flujo promedio} = \frac{\text{flujo acumulado}}{24 \text{ h}} = \frac{29237 \text{ m}^3}{24 \text{ h}} = 1218 \text{ m}^3/\text{h}$$

La solución requiere ahora una gráfica del volumen de afluente acumulado y del volumen de afluente acumulado promedio. (La figura no se muestra, por lo que los lectores pueden consultar la figura 11.7 y completarla por sí mismos). De esta gráfica, el volumen de flujo ecualizado requerido es de aproximadamente 4100 m<sup>3</sup>.



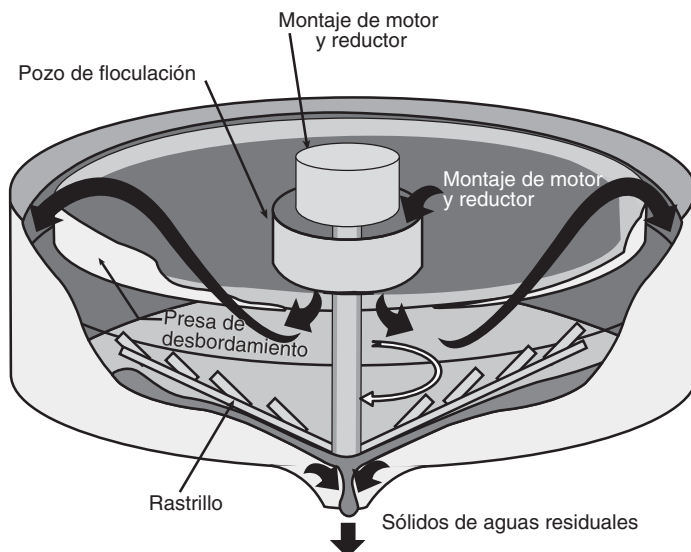
## 11.5 Tratamiento primario

La meta del **tratamiento primario** es la de remover los sólidos mediante el asentamiento de la gravedad inactiva. Típicamente, el agua residual doméstica es mantenida por un periodo de aproximadamente 2 horas. Los **tanques de asentamiento**, también referidos como **tanques de sedimentación** o **clarificadores**, pueden ser ya sea rectangulares o circulares. Durante la sedimentación, los sólidos se asientan en el fondo del tanque, en donde son recolectados como un lodo líquido sólido. La figura 11.8 muestra una sección transversal de un clarificador circular.

El tratamiento primario remueve alrededor de 60% de los sólidos suspendidos (TSS), 30% de BOD y 20% de fósforo (P). El BOD y el fósforo removidos en esta etapa están principalmente en su fase de partículas (esto es, parte del TSS). Cualquier BOD, N o P disueltos pasará a través del tratamiento primario y entrará al tratamiento secundario. Los coagulantes pueden añadirse para mejorar la eliminación de materia de partículas. Esto puede reducir los costos de energía global requeridos durante el segundo tratamiento para convertir biológicamente estas partículas a  $\text{CO}_2$ , agua y nueva biomasa.

El afluyente clarificado que sale del tratamiento primario es enrutado hacia el tratamiento secundario, y los sólidos (el lodo) removidos durante el asentamiento son segregados para mayor tratamiento. El lodo primario es maloliente, puede contener organismos patógenos y tiene alto contenido de agua (quizá menos de 1% de sólidos). Estas características hacen difícil disponer de éste. Los clarificadores secundarios son diseñados para remover partículas mucho más pequeñas ya que, como se explicará en la siguiente sección, la mayoría de la materia de partículas en este punto en la planta de tratamiento consiste de microorganismos.

Este capítulo no entra en mayor detalle sobre el diseño de tanques de asentamiento para el tratamiento de aguas residuales. El capítulo 10 (sección 10.7) proporcionó una discusión detallada sobre la teoría de sedimentación y los principios de diseño, incluyendo cómo usar las **tasas de desbordamiento** establecidas para dar tamaño a los tanques de asentamiento.



### Tratamiento primario

Figura 11.8 Sección transversal de un tanque de sedimentación circular

### ejemplo/11.3 Dar tamaño a un tanque de asentamiento primario

Una planta de tratamiento de aguas residuales trata un flujo promedio de 12 000 m<sup>3</sup>/día y un flujo de hora pico de 30 000 m<sup>3</sup>/día. Dos clarificadores circulares serán diseñados con una profundidad de 4 metros y una tasa de flujo de desbordamiento de 40 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> al día. Calcule el área, el diámetro, el volumen y el tiempo de detención requeridos para cada clarificador.

#### solución

Para calcular el área de superficie requerida para la clarificación, divida el rango de flujo promedio ( $Q$ ) entre la tasa de desbordamiento (OR):

$$\text{área total clarificada} = \frac{Q}{\text{OR}} = \frac{12\,000 \text{ m}^3/\text{día}}{40 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{día}} = 300 \text{ m}^2$$

Debido a que hay dos diferentes clarificadores, el área para cada clarificador sería:

$$\text{área clarificada} = \frac{300 \text{ m}^2}{2 \text{ clarificadores}} = 150 \text{ m}^2$$

El diámetro del tanque puede ser calculado del área como sigue:

$$\text{diámetro clarificado} = \sqrt{\frac{\text{área clarificada}}{\frac{\pi}{4}}} = \sqrt{\frac{150 \text{ m}^2}{\frac{\pi}{4}}} = 13.8 \text{ m}$$

El diámetro será redondeado hasta 14 m para el diseño final.

El área real para cada clarificador se calcula como sigue:

$$\text{área clarificada} = \frac{\pi}{4}(14 \text{ m})^2 = 154 \text{ m}^2$$

El volumen de cada clarificador se calcula como sigue:

$$\text{volumen clarificado} = \text{Área} \times \text{Prof.} = \left(\frac{\pi}{4}(14 \text{ m})^2\right) \times (4 \text{ m}) = 616 \text{ m}^3$$

Para determinar el tiempo de detención hidráulica, divida el volumen del clarificador entre la tasa de flujo ( $Q$ ) para cada clarificador:

$$\text{tiempo de detención} = \frac{\text{volumen}}{Q} = \frac{616 \text{ m}^3 \times 24 \text{ h/día}}{6\,000 \text{ m}^3/\text{día}} = 2.46 \text{ h}$$

La tasa de desbordamiento observada (OR) se calcula como sigue:

$$\text{OR} = \frac{Q}{\text{área}} = \frac{6\,000 \text{ m}^3/\text{día}}{154 \text{ m}^2} = 39 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{día}$$

### ejemplo/11.3 Continuación

Determine el tiempo de detención y la tasa de desbordamiento a flujo pico:

$$\begin{aligned} \text{en flujo pico} &= \frac{(Q \text{ en flujo pico})/2}{\text{área}} \\ &= \frac{15\,000 \text{ m}^3/\text{día}}{154 \text{ m}^2} = 97.4 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{día} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [\text{tiempo de detención en flujo pico}] &= \frac{\text{volumen clarificado}}{Q \text{ en flujo pico}} \\ &= \frac{616 \text{ m}^3 \times 24 \text{ h/día}}{30\,000 \text{ m}^3/\text{día}/2} = 0.99 \text{ h} \end{aligned}$$

En el flujo promedio, los valores calculados de tiempo de detención y de tasa de desbordamiento están dentro de los rangos comentados en el capítulo previo (sección 10.7). En el flujo pico, el valor calculado del tiempo de detención está bien, pero la tasa de desbordamiento puede reducir un poco más de lo deseado. El diseño final del clarificador puede necesitar un área de superficie incrementada para proporcionar suficiente tiempo de detención para que se asienten suficientes sólidos.

## 11.6 Tratamiento secundario

El agua residual que sale del clarificador primario ha perdido una cantidad significativa de la materia de partículas que contenía, pero aún tiene una alta demanda de oxígeno debido a una abundancia de materia orgánica disuelta (medida como BOD). El **tratamiento secundario** (el cual es una forma de tratamiento biológico) utiliza microorganismos para descomponer estas moléculas de alta energía.

Existen dos enfoques básicos para el tratamiento biológico, difiriendo en la manera en la que el desecho es llevado a hacer contacto con los microorganismos. En los *reactores de crecimiento suspendido*, los organismos se adjuntan a una estructura de soporte y el agua residual se pasa sobre los organismos.

### 11.6.1 REACTORES DE CRECIMIENTO SUSPENDIDO: LODO ACTIVADO

El sistema de tratamiento biológico más común es un sistema de **crecimiento suspendido** llamado proceso de **lodo activado**. El efluente del clarificador primario es enrutado hacia un **tanque de aireación** (también referido como **cuenca de aireación**), usualmente por gravedad, y mezclado con una masa diversa de microorganismos que comprenden bacterias, hongos, rotíferos y protozoos. La mezcla de líquido, desechos sólidos y microorganismos se llama **licor mezclado**. Una medición de TSS obtenida de la cuenca de aireación es llamada **sólidos suspendidos del licor mezclado (MLSS)**, expresados en mg/L. Los sólidos suspendidos volátiles (VSS) se pueden utilizar como sustitutos para describir la biomasa del reactor. Esto es debido a que la mayoría de los sólidos son



Tratamiento secundario