

# Tanques de Sedimentación y Espesamiento

Pierre-Henri Dodane y Magalie Bassan

### Objetivos de aprendizaje

- Conocer los contextos en los cuales los tanques de sedimentación y espesamiento constituyen una tecnología adecuada de tratamiento.
- Entender cómo funcionan estos tanques.
- Reconocer sus posibles ventajas y desventajas.
- Estar al tanto del grado de atención en la operación, el mantenimiento y el monitoreo de un tanque de sedimentación y espesamiento que es necesario para lograr una decantación adecuada de los líquidos y los sólidos.
- Ser capaz de diseñar un tanque de sedimentación y espesamiento que cumpla con los objetivos de tratamiento.

## 6.1 INTRODUCCIÓN

Los tanques de sedimentación y espesamiento son utilizados para separar las fracciones líquida y sólida de los lodos fecales (LF). Fueron desarrollados inicialmente para el tratamiento primario de aguas servidas y para la clarificación de las mismas, luego de su tratamiento secundario. Funcionan bajo el mismo mecanismo que tanques sépticos. Los que son para el tratamiento de los LF son tanques rectangulares, en los cuales los LF entran por la parte superior de un extremo, la fracción líquida sale al otro extremo, los lodos asentados se retienen en el fondo y la nata flota en la superficie (Figura 6.1). Durante su tiempo de retención, las partículas más pesadas se asientan por efecto de la gravedad. Las partículas más livianas, como aceites y grasas, en cambio, flotan hasta la superficie. Los sólidos son recolectados desde el fondo y los líquidos salen más arriba. Se requieren flujos hidráulicos tranquilos y quietos, puesto que cualquier turbulencia alteraría la sedimentación, el espesamiento y la flotación. Se pueden ubicar deflectores a fin de ayudar a controlar la turbulencia en la entrada y para mantener la fracción líquida separada de la nata y los lodos asentados.

Luego de decantarse, las fracciones líquida y sólida de los LF requieren tratamiento adicional, según su destino final, ya que todavía contienen patógenos y los sólidos aún deben estabilizarse y secarse más. (En los Capítulos 5 y 17 se analizan las combinaciones entre tecnologías.) Los tanques de sedimentación y espesamiento pueden instalarse en cualquier clima, pero son especialmente convenientes para tratar LF con pocos sólidos y en climas lluviosos o templados. También son una importante alternativa en sectores urbanos donde el espacio es limitado, por lo que reducen el área requerida para los pasos posteriores de tratamiento. Por ejemplo, al separar gran parte del agua en tanques de sedimentación y espesamiento, los lechos de secado pueden ser mucho más pequeños.

Al aplicar los tanques de sedimentación y espesamiento, siempre debe haber por lo menos dos de estos en paralelo, con el fin de permitir el ciclo entero de uso, mantenimiento y extracción de los lodos. Para mayor compactación de los lodos y para facilitar las operaciones, es preferible dejar los tanques en reposo durante este periodo de compactación y en el momento de sacar la nata, drenar la fracción líquida y extraer los lodos espesos. En general, estos tanques son operados durante una a cuatro semanas, para luego entrar en reposo. Cuando son dos tanques operados en paralelo, cada tanque está en uso 50 % del tiempo.

En la mayoría de las instalaciones existentes en países de bajos ingresos, se extrae los lodos con retroexcavadores, bombas (si los lodos no están demasiado espesos) o camiones aspiradores fuertes. En cambio, en las EDAR, estos tanques suelen tener aparatos mecánicos para retirar los lodos asentados.

Este capítulo presenta un resumen de los mecanismos básicos, recomendaciones de diseño, condiciones operativas y rendimientos de los tanques de sedimentación y espesamiento en el tratamiento de LF. Es también factible instalar lagunas más amplias para sedimentación, similares a las lagunas anaeróbicas que se utilizan en el tratamiento de aguas servidas. Las principales diferencias son que, en las lagunas, más lodos pueden acumularse, es difícil extraerlos y existe más tiempo para la digestión anaeróbica. Debido a la escasez de tanques de sedimentación y espesamiento que actualmente tratan LF, la información en este capítulo se basa en conocimientos teóricos y en ciertas experiencias en África Occidental. En Kumasi, Ghana, hay una estación de tratamiento de LF (ETLF) con un volumen de 100 m<sup>3</sup> en tanques de sedimentación y espesamiento que tratan los LF antes de su colocación en lechos de secado (Figura 6.2). Las pautas de diseño presentadas en este capítulo pueden adaptarse a otros contextos.

## 6.2 MECANISMOS FUNDAMENTALES

Los tanques de sedimentación y espesamiento dependen de tres mecanismos principales: sedimentación, espesamiento y flotación (descritos en mayor detalle en Capítulo 3). La digestión anaeróbica también ocurre ahí, aunque no es la meta, debido a su producción de burbujas de gas que pueden reducir la eficacia de la decantación al flotar partículas y mezclar las sustancias. A continuación, se presenta un breve resumen de estos mecanismos.

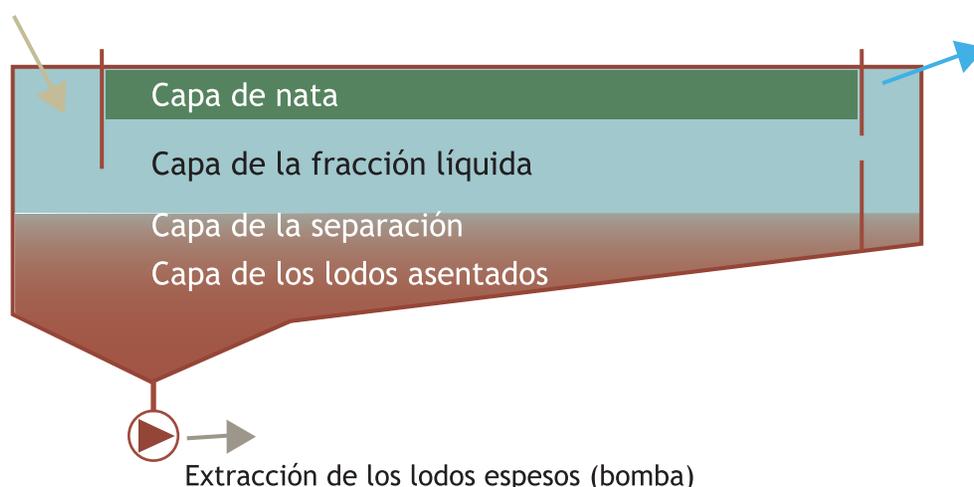
### 6.2.1 Sedimentación

En los tanques de sedimentación y espesamiento, las partículas de sólidos suspendidos (SS) que son más pesadas que el agua se asientan en el fondo del tanque por gravedad. Existen tres formas de sedimentación:

- Independiente, en la cual las partículas se hunden una indiferente de la otra;
- Floculante, en la cual el proceso se acelera al formar agregaciones de partículas; e
- Impedida, en la cual la tasa se reduce por la alta concentración de partículas (Ramalho, 1977).

Entrada de los LF (luego del tamizado)

Salida de la fracción líquida



**Figura 6.1** Esquema de las capas en un tanque de sedimentación y espesamiento.



**Figura 6.2** Los dos tanques de sedimentación y espesamiento de la Estación de Tratamiento de Lodos Fecales Rufisque en Dakar, Senegal (izq.). El ciclo operativo dura 2 semanas (1 semana de uso, otra de reposo) y luego se bombean los lodos a lechos de secado. La laguna de sedimentación y espesamiento en Achimota, Accra, Ghana, tiene un ciclo operativo de 8 semanas (4 semanas de uso, 4 semanas de reposo; der.). Como los lodos se espesan durante 4 veces más tiempo, no es posible extraerlos con una bomba y su retiro es manual (foto: SANDEC).

De forma independiente o flocculante, la sedimentación sucede rápidamente en estos tanques. La forma impedida ocurre encima de la capa de lodos que se acumula en el fondo, donde la concentración de sólidos suspendidos es mayor. Estos procesos disminuyen la concentración de sólidos en la fracción líquida y generan una acumulación de sólidos en el fondo del tanque.

Las partículas más densas se asientan más rápidamente que las menos densas. En teoría, se podría diseñar los tanques de sedimentación y espesamiento basándose en los fundamentos de sedimentación según la distribución de tipos y formas de las partículas presentes en los LF. Aunque esta teoría es importante para entender el diseño de estos tanques, en la práctica se determinan y utilizan valores empíricos basados en las características específicas de los LF por tratar.

La Ecuación 6.1 expresa la velocidad teórica de sedimentación de una partícula, la que se define como la rapidez alcanzada por una partícula que se asienta en el tanque, a medida que la gravedad vence tanto la tendencia de flotar como la resistencia del líquido a permitir su paso.

**Ecuación 6.1:**

$$V_c = \left[ \frac{4}{3} \cdot \frac{g \cdot (\rho_s - \rho) \cdot d}{C_d \cdot \rho} \right]^{1/2}$$

Donde:

$V_c$  = la velocidad final de sedimentación de una partícula (m/h)

$g$  = aceleración gravitacional ( $m/s^2$ )

$\rho_s$  = densidad de la partícula (g/L)

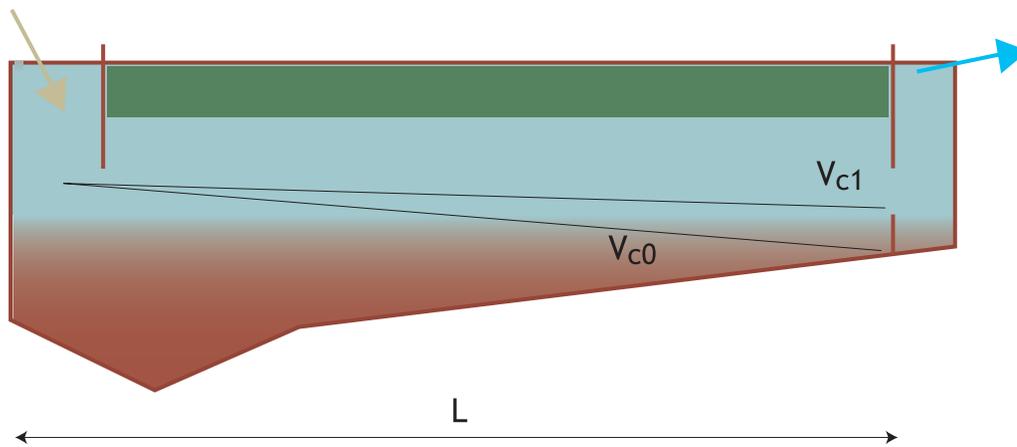
$\rho$  = densidad del líquido (g/L)

$C_d$  = coeficiente de resistencia al paso

La velocidad crítica de sedimentación ( $V_c$ ) es seleccionada basándose en la cantidad de sólidos que se desea decantar. En teoría, si el flujo es laminar (sin turbulencia) y no existen “cortocircuitos”, todas las partículas con una velocidad mayor a  $V_c$  serán separadas. De esta manera, se puede diseñar un tanque según el porcentaje de partículas que se desea separar. Como el flujo en estos tanques es longitudinal, es necesario diseñarlos lo suficientemente largos para asegurar que las partículas con velocidades de sedimentación igual o mayor a  $V_c$  tengan el tiempo necesario para asentarse antes de llegar a la salida. Las otras partículas que no se asientan tan rápidamente saldrán en el efluente (Figura 6.3). En Sección 6.3.2, se analiza cómo seleccionar el valor de  $V_c$  en diseños reales.

Entrada de los LF

Salida de la fracción líquida



**Figura 6.3** Esquema de la velocidad final de sedimentarse ( $V_c$ ) requerida para que una partícula se asiente dentro de un tanque de longitud  $L$ .

### 6.2.2 Espesamiento

Las partículas que se acumulan en el fondo del tanque se comprimen mediante un proceso llamado espesamiento, el cual funciona debido al peso de las partículas que se encuentran encima, ya que dicho peso exprime el agua e incrementa la concentración de sólidos. Es un resultado de la gravedad y se presenta cuando la concentración de SS es alta y las fuerzas entre las partículas impiden su movimiento individual. Una importante consideración en el diseño de estos tanques es dejar suficiente espacio para el almacenamiento de los lodos, que reducen, en efecto, la profundidad del tanque que esté disponible para sedimentación adicional. También influye en el diseño de las operaciones, el mantenimiento y el cronograma de la extracción de lodos.

### 6.2.3 Flotación

En forma similar a los mecanismos de sedimentación y espesamiento, la flotación se explica por influencia de la fuerza gravitacional sobre diferencias en la densidad. La flotabilidad es la fuerza ascendente causada por la densidad del líquido. Para que floten las partículas, su flotabilidad tiene que ser mayor a la fuerza gravitacional sobre las partículas. Las partículas hidrofóbicas, como aceites y grasas y las que tiene una densidad menor a la del agua son elevadas hasta la superficie del tanque mediante la flotación. Por otro lado, algunas partículas también son llevadas a la superficie por las burbujas que resultan de la digestión anaeróbica. Esta capa que se acumula encima del agua es llamada nata. Es importante tomar en cuenta la nata en el proceso de diseño, ya que también reduce el volumen efectivo del tanque. La cantidad de nata asociada con la sedimentación de LF puede ser considerable y no debe ser pasada por alto. (Se observa abundante nata en los tanques y la laguna de la Figura 6.2.)

### 6.2.4 Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica también sucede en los tanques de sedimentación y espesamiento, especialmente en la capa de lodos espesos en el fondo. El grado de digestión depende del grado de estabilización previa de los LF, la temperatura y el tiempo de retención en el tanque. Por medio de este proceso, parte de la materia orgánica se degrada, generando gases. La experiencia operativa ha demostrado que los LF frescos y poco estabilizados (p.ej., de baños públicos que son vaciados frecuentemente) no se sedimentan bien, debido a los gases causados por la digestión que suben y mezclan los lodos, además de que contienen más agua ligada. Por lo tanto, es más conveniente tratar en los tanques de sedimentación y espesamiento LF estabilizados (p.ej., de tanques sépticos) o una combinación de lodos añejos y frescos (Heinss *et al.*, 1998; Vonwiller, 2007).

## 6.2.5 Capas sólidas y líquidas

Las interacciones de estos mecanismos ocasionan la separación de los LF en cuatro capas (Figura 6.1; Heinss *et al.*, 1998; Metcalf y Eddy, 2003):

- Nata que consiste en la materia (orgánica y no orgánica) que flota (en especial aceites y grasas), junto con las partículas que fueron elevadas por las burbujas de gases;
- Fracción líquida con las partículas que aún no se sedimentan ni flotan;
- Capa de la separación, donde existe una transición entre las capas adyacentes. Aquí es donde más sucede la sedimentación impedida y los lodos no se espesan todavía. Las partículas en esta capa son más vulnerables a ser acarreadas hasta la salida, comparadas a las que ya se encuentran asentadas debajo;
- Lodos espesos asentados en el fondo, con la mayor concentración de sólidos en la parte inferior de esta capa.

## 6.3 DISEÑO DE TANQUES DE SEDIMENTACIÓN Y ESPESAMIENTO

Esta sección proporciona recomendaciones para el diseño de tanques de sedimentación y espesamiento para el tratamiento de LF, según el estado actual de conocimiento. Este diseño se basa en los volúmenes de los LF por tratar, la fracción líquida que saldrá, la nata que flotará y los lodos que se asentarán. Un buen diseño debe incluir la extracción periódica y eficiente de natas y lodos, con el fin de optimizar la separación de sólidos y líquidos. A continuación, se analizan estos aspectos, junto con dos casos de estudio y un ejemplo de un diseño.

### 6.3.1 Pruebas de laboratorio y características de lodos fecales que influyen en el diseño

Un buen conocimiento de las características específicas de los LF por tratar es necesario a fin de determinar la superficie del tanque y los volúmenes de nata, fracción líquida, capa de separación y lodos espesos. Como indica el Capítulo 2, la determinación certera de la cantidad de LF que genera una población es un gran desafío, según la infraestructura local y el sistema existente de manejo. La carga del diseño también tiene que tomar en cuenta que las cantidades y características de los LF pueden variar según la época del año. Es necesario estimar empíricamente la capacidad de sedimentación de los LF específicos a fin de dimensionar correctamente el tanque. Análisis preliminares de laboratorio deben realizarse para determinar en qué grado los LF son propensos a sedimentarse, espesarse y separarse de la nata, además de su concentración de SS (Strauss *et al.*, 2000). Es importante asegurar que la muestra de LF para los ensayos es representativa de los lodos por tratar. Por ejemplo, si los LF son recolectados y transportados en camiones aspiradores, se debería tomar las muestras de estos mismos camiones, ya que estos son los lodos que serán descargados en la ETLF.

El índice del volumen de los lodos (SVI) es un método de laboratorio para determinar empíricamente la tendencia de los lodos a sedimentarse basándose en la cantidad de sólidos suspendidos que se asientan en un tiempo dado. Primero, se determina el contenido de SS de los LF y luego se llena un cono Imhoff en donde puedan asentarse (Figura 6.4). Después de 30 o 60 minutos, se miden los LF asentados en mL/L y se calcula el SVI al dividir el volumen asentado de LF por la concentración de SS (en g/L), en otras palabras esto indica el volumen de lodos asentados por gramo de sólidos presentes (vea el ejemplo de este cálculo a continuación). La prueba Imhoff no da una estimación exacta de la profundidad de la capa de lodos espesados, ya que esta prueba se realiza por lotes, en lugar del uso continuo de un tanque de sedimentación y espesamiento. Los conos Imhoff mayores a un litro dan resultados más representativos, puesto que el efecto de la pared es menor (Heinss *et al.*, 1999).

Según la experiencia en el diseño de tanques de sedimentación y espesamiento para aguas servidas en EDAR, los lodos con un SVI menor a 100 mL/g presentan una buena separación de sólidos y líquidos en los tanques de sedimentación y espesamiento. Pruebas realizadas con LF en Accra (Ghana) y Dakar (Senegal) demostraron que si el SVI es entre 30 y 80 mL/g su sedimentación y espesamiento son adecuados en estos tanques (Heinss *et al.*, 1998; experiencia personal de Dodane). Pruebas de SVI en Dakar también indicaron que los LF se asientan rápidamente durante los primeros 20 minutos y siguen espesándose durante los 100 minutos siguientes (Badji *et al.*, 2011).



### Ejemplo: El cálculo del índice de volumen de lodos (SVI)

Una muestra de LF de un tanque séptico en Burkina Faso tiene una concentración de SS de 6,6 g/L. El volumen de los LF asentados luego de 60 minutos es 198 mL/L.  
 $SVI = \text{Volumen de LF asentados} / \text{concentración de SS} = 198 / 6,6 = 30 \text{ mL/g.}$

Estos LF serían considerados adecuados para un tratamiento en un tanque de sedimentación y espesamiento. Con los lodos generados en EDAR de lodos activados, se considera que un SVI menor a 100 mL/g indicaría el cumplimiento de condiciones ideales de sedimentación (Pujol *et al.*, 1990). Con LF, es necesario tomar en cuenta su estabilización y origen, pero se requiere mayor estudio para determinar los límites adecuados.

### 6.3.2 Superficie y longitud del tanque

El tanque requiere una longitud suficiente y una distribución hidráulica adecuada con el fin de asegurar que toda la superficie del tanque sea utilizada y que las partículas tengan el tiempo necesario para sedimentarse. La superficie de un tanque de sedimentación y espesamiento puede calcularse con la Ecuación 6.2, según la velocidad ascendente ( $V_u$ ) y el flujo afluente ( $Q_p$ ) (Metcalf y Eddy, 2003).

**Ecuación 6.2:**  $S = Q_p / V_u$

Donde:

$S$  = superficie del tanque ( $m^2$ )

$V_u$  = velocidad igualitaria de sedimentación ( $m/h$ )

$Q_p$  = flujo afluente máximo ( $m^3/h$ ) =  $Q \cdot C_p / h$

Donde:

$Q$  = flujo afluente diario promedio

$C_p$  = coeficiente de flujo máximo en 'horas pico'

$h$  = número de horas operativas de la estación de tratamiento, ya que solo se reciben los LF en horas de funcionamiento

La velocidad igualitaria de sedimentación ( $V_u$ ) se define como "la velocidad de sedimentación de una partícula que se asienta a través de una distancia exactamente igual a la profundidad efectiva del tanque durante el tiempo teórico de retención" (Ramalho, 1977). Es utilizada para calcular el flujo afluente aceptable que permite

que se asienten las partículas que exhiben la velocidad definida de sedimentación. Las partículas que tienen velocidades de sedimentación menores a  $V_c$  serán acarreadas por la fracción líquida al efluente. Se selecciona un valor para el porcentaje deseado de separación de los sólidos suspendidos (SS) y luego se elige la velocidad crítica de sedimentación a ser igual a la velocidad final de sedimentación de las partículas más livianas que se asentarán en el tanque. Por ejemplo, en la Figura 6.3,  $V_u = V_{c0} > V_{c1}$ . Así, por un flujo afluente dado de LF, la velocidad afluente en la superficie de un tanque corresponde a la separación de un porcentaje dado de SS.

El coeficiente de flujo máximo (o ‘pico’) se calcula mediante observación en los momentos que más camiones descargan lodos en el ETLF. Por ejemplo, en Dakar, se observó que el periodo ‘pico’ era a las 11:00 de la mañana, porque los camiones eran más activos en su labor de vaciado más temprano en la mañana y se calculó que el flujo a esa hora era 1,6 veces mayor al promedio.

$V_u$  puede estimarse según los valores de SVI. A pesar de los límites del cálculo teórico para fines de diseño, algunos métodos han sido desarrollados para vincular SVI y  $V_u$ , basándose en experiencias a largo plazo en el tratamiento de los lodos generados en las EDAR de lodos activados (Pujol *et al.*, 1990). Sin embargo, este tipo de conocimiento empírico no existe todavía para LF. Se podría utilizar un valor de 0,5 m/h para  $V_u$ , en tanques rectangulares de sedimentación que tratan LF con un SVI menor a 100 (experiencia personal de Dodane).

Una vez que se calcula la extensión del tanque, se debe seleccionar la proporción del ancho respecto al largo. Por ejemplo, Heiness *et al.* (1998) recomiendan una relación de ancho a largo entre 1:10 y 1:5. A medida que la velocidad final de sedimentación es menor, el tanque debe ser más largo, para permitir que las partículas se asienten.

### 6.3.3 Volumen del tanque

El próximo paso consiste en calcular el volumen del tanque, tomando en cuenta la profundidad de las cuatro capas descritas en la Figura 6.1. Es necesario tomar en cuenta la reducción en la profundidad efectiva que ocurrirá con la acumulación de nata y lodos espesos, que (en caso de ser subestimada) puede ocasionar la salida de demasiados sólidos con la fracción líquida.

Basándose en observaciones de los tanques de sedimentación y espesamiento en Accra y Dakar (Heiness *et al.*, 1998), se recomiendan los siguientes valores para el diseño de tanques para tratar LF similares:

- Zona de nata: desde 40 cm (con uso durante una semana, compactación y limpieza durante otra semana) hasta 80 cm (con uso durante 4 semanas, compactación y limpieza durante 4 semanas);
- Zona de la fracción líquida: 50 cm; y
- Zona de separación: 50 cm.

La profundidad de la zona de lodos espesados debe calcularse con el flujo afluente previsto y la concentración de los lodos espesados ( $C_t$ ). El diseño de un volumen suficiente para el almacenamiento de los lodos espesados es primordial para prevenir la salida de lodos asentados durante algún ciclo operativo. Por lo tanto, deben definirse desde el comienzo la duración prevista del ciclo operativo (uso, compactación y extracción) y los métodos para extraer la nata y los lodos espesados. El volumen de la zona para el almacenamiento de los lodos espesados ( $V_t$ ) puede calcularse mediante la Ecuación 6.3 (Metcalf y Eddy, 2003).

$$\text{Ecuación 6.3: } V_t = \frac{Q \cdot C_i \cdot e \cdot N}{C_t}$$

Donde:

$V_t$  = el volumen de la zona para el almacenamiento de los lodos espesados ( $m^3$ )

$Q$  = el flujo afluente diario promedio de LF ( $m^3/\text{día}$ )

$C_i$  = la concentración promedio de sólidos suspendidos (SS) en los LF (g/L)

$e$  = la eficiencia prevista de la sedimentación = proporción de SS que se asientan (%)

$N$  = el número de días que dura cada ciclo (días)

$C_t$  = la concentración promedio de SS en los lodos espesados al final del periodo de uso (g/L)

El flujo diario promedio es utilizado para estimar la acumulación de lodos, mientras que el flujo máximo es usado para calcular la superficie y la longitud del diseño a fin de asegurar una buena sedimentación bajo todas las condiciones operativas previstas. El volumen de la zona de espesamiento se basa en la sedimentación prevista de los LF. No es tomado en cuenta en el diseño, pero un mayor tiempo de almacenamiento de los tanques en reposo (sin uso) antes de extraer los lodos contribuye a su mayor espesamiento y compactación. En el campo, se han observado eficiencias promedio de sedimentación de los LF de solamente alrededor de un 60 %, debido a operación y mantenimiento inadecuadas, además de la elevación de burbujas (Heinss *et al.*, 1998). Sin embargo, se recomienda utilizar el valor de un 80 % para estimar la eficiencia máxima.

Es necesario calcular cuidadosamente el valor de  $C_s$ , asegurando su certeza. Una sobreestimación conduciría a un volumen insuficiente para el almacenamiento y menor eficiencia de sedimentación, ya que algunos de los sólidos podrían ser acarreados afuera antes de asentarse. Una subestimación, en cambio, llevaría a un volumen de almacenamiento innecesariamente grande y el consecuente incremento en los costos de construcción. La Tabla 6.1 presenta ejemplos de las concentraciones de SS en LF antes y después de su tratamiento en estos tanques.

**Tabla 6.1 Las concentraciones de lodos fecales en la zona de espesamiento en tanques de sedimentación en Accra y Dakar, en el afluente y después del tratamiento (Heinss *et al.*, 1998; Badji *et al.*, 2011).**

Lugar	Concentración de LF afluentes (g SS/L)	Tiempo de espesamiento (días)	Concentración de LF en la zona de espesamiento (g SS/L)
Dakar, ETLF	5	10	60 a 70
Accra, ETLF	15 a 20	9	60 a 85
Accra, ETLF	15 a 20	30	>100
Accra, ETLF	15 a 20	50	140
Accra, laboratorio	40	7	100

El tiempo de utilización del tanque en cada ciclo debe definirse según las características de los LF, la concentración prevista para los lodos espesados y las variaciones por las épocas del año. Las ventajas de tiempos cortos de uso y de compactación es que la nata se mantiene delgada y es más fácil bombear los lodos espesados, por lo que no aún no se encuentran muy compactados (Caso de Estudio 6.1).

#### 6.3.4 Configuración de la entrada y la salida

Es necesario cernir los LF mediante tamices o rejillas antes de su ingreso a los tanques de sedimentación y espesamiento, a fin de separar los desechos gruesos que podrían dañar las bombas. (Se expone mayor detalle acerca de este asunto en el Capítulo 5 sobre tecnologías de tratamiento.)

La parte de la entrada al tanque debe permitir una distribución uniforme y tranquila del flujo a través de todo el tanque, además de evitar los “cortocircuitos”. Por lo tanto, se recomienda colocar deflectores para ayudar a dispersar la energía del afluente y reducir la turbulencia en el tanque. Heinss *et al.* (1998) sugieren construir la primera parte del tanque más profunda para mejorar la sedimentación de los sólidos (Figura 6.3). Las bombas para la extracción de los lodos espesados deben ser aptas para movilizar lodos concentrados. Se deben incluir puntos de fácil acceso en el diseño a fin de permitir al personal acceder a los lodos en estas zonas y facilitar el mantenimiento de las bombas.

## Caso de Estudio 6.1: La operación de tanques de sedimentación y espesamiento en Senegal y Ghana. (Adaptado de Heinss *et al.*, 1998; Badji *et al.*, 2011)

Unos tanques de sedimentación y espesamiento han estado en operación en Dakar (Senegal) desde 2006 y en el sector de Accra (Ghana) desde finales de la década de 1980. Periodos cortos de uso, de una semana, fueron adoptados en las ETLF de Dakar, donde los lodos espesados son extraídos principalmente por bombas, aunque los lodos más compactados y las natas son sacados mediante camiones aspiradores. La extracción de las natas requiere camiones aspiradores potentes, los que no están siempre disponibles. Por lo tanto, es primordial asegurar la disponibilidad periódica de los medios mecánicos para extraer los lodos compactados, con el fin de consolidar la eficiencia y sostenibilidad del tanque.

Los tanques de sedimentación y espesamiento en la ETLF de Cambérène fueron diseñados con un tiempo de retención hidráulica (HRT) nominal de 8,6 horas. Debido a una subestimación inicial de la cantidad de LF por tratar, se sobrecargaron los tanques de sedimentación y espesamiento, lo que redujo el HRT efectivo a solo 1,7 horas. Como indica el Capítulo 2, se debería realizar un estudio preliminar de los volúmenes y concentraciones de los LF antes de diseñar los tanques. Las actividades de recolección y transporte deben ser evaluadas, incluyendo el área servida, el número de hogares, la frecuencia del vaciado de las estructuras descentralizadas de contención y los tipos de sistemas descentralizados de saneamiento.

Periodos largos de uso, de 4 semanas, fueron adoptados para los tanques de sedimentación y espesamiento en Accra (Ghana), donde los tanques tienen mayor volumen para el almacenamiento de los LF. Debido a su extensión, estos tipos tanques son llamados también lagunas de sedimentación y espesamiento. Se les hace funcionar durante 4 semanas, luego reposan para su fase de compactación durante 3 o 4 semanas, después de las cuales se extraen los lodos. En este caso, la nata es más profunda y los lodos espesados se vuelven más compactados y más difíciles de sacar. A veces, se tiene que utilizar tractores de pala frontal para retirar el lodo espesado y la nata, ya que ambos presentan altas concentraciones de sólidos. Por lo tanto, puede resultar más difícil operar grandes lagunas de sedimentación y espesamiento.

El punto de salida de la fracción líquida debe estar debajo de la capa de nata y por encima de los lodos asentados. Es conveniente colocar una pared en forma de deflector para prevenir que la nata salga con las aguas. Con el fin de asegurar un flujo hidráulico óptimo, el canal de la salida puede extenderse por todo el ancho de esa pared, en el extremo opuesto de la entrada (Heinss *et al.*, 1998). Al construir la segunda parte del tanque menos profunda, se reduce la posibilidad de arrastrar hacia la salida los sólidos asentados en la capa de espesamiento.

## 6.4 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE TANQUES DE SEDIMENTACIÓN Y ESPESAMIENTO

Por lo menos dos tanques de sedimentación y espesamiento deben operarse juntos, en paralelo y en forma alternada, a fin de permitir un tiempo de reposo y la extracción de los lodos, sin que el tanque esté en uso. Las principales fases en el ciclo operativo son: el uso con LF afluentes, el reposo con compactación y la extracción de lodos espesados y natas. Estos periodos permiten la decantación de los líquidos y luego el espesamiento de los sólidos. Cuando los tanques están en reposo, una mayor compactación ocurre (previa a la extracción de lodos y nata), debido a la falta de alteración hidráulica (Heinss *et al.*, 1998). Durante este reposo, se produce una separación adicional entre sólidos y líquidos, por lo tanto, la concentración de SS se incrementa en los lodos y en la nata.

### 6.4.1 Extracción de los lodos y natas

Un cronograma de desalojo de nata y lodos acorde con el diseño es esencial para asegurar el debido funcionamiento de los tanques de sedimentación y espesamiento, con una profundidad efectiva adecuada para el asentamiento de las partículas.

La Figura 6.5 indica un ejemplo de la reducción en el volumen efectivo a causa de prácticas inadecuadas de extracción de sólidos. En este caso, la nata no se había quitado durante tanto tiempo que malezas ya crecían allí, lo que, por supuesto, se debe evitar.

Si se observa que un mayor volumen de lodos espesados se acumula que lo que prescribe el diseño, significa que la carga de sólidos es mayor a lo previsto y se debe cambiar los tiempos del ciclo operativo apropiadamente. En general, el desalojo de los lodos (al final del periodo de reposo) demora unas horas o un día. Una vez en operación, se puede realizar un monitoreo detallado para optimizar los tiempos del ciclo operativo, según las condiciones reales.

El primer paso en la extracción de sólidos es quitar la capa de nata, la que presenta generalmente una concentración de sólidos tan alta que resulta ser difícil bombearla. Incluso, a veces permanece en el tanque luego de bombear los lodos espesados (Figura 6.6) y tiene que ser sacada manualmente con palas. Cuando sea posible, se puede extraer la nata con palas desde los dos lados del tanque, si este es suficientemente angosto, o con un camión aspirador fuerte, mientras la fracción líquida está todavía presente. También es factible sacar la nata manualmente o con aspiración, luego de bombear las otras capas inferiores, como se hace en la ETLF Cambérène en Senegal.

A continuación, la fracción líquida es extraída mediante bombeo o gravedad, según el diseño. Es posible bombearla al otro tanque de sedimentación y espesamiento que está en uso o se la puede destinar directamente al siguiente paso en la cadena de tratamiento. Luego, se desalojan los lodos espesados con bombas o palas. Si son extraídos con una bomba, no es necesario quitar primero la fracción líquida, ya que esta genera mayor presión sobre los lodos y facilita su bombeo. Como la profundidad de los tanques es frecuentemente mayor a 2 m, el diseño debe contemplar un fácil acceso con el fin de poder sacar los lodos y limpiar las bombas y los tanques. El operador sabrá cuándo es el momento de extraer los lodos según los tiempos y cargas del diseño, junto con su observación visual del sistema.



**Figura 6.5** Ejemplo de operación y mantenimiento inadecuados de un tanque de sedimentación y espesamiento en África Occidental. La nata no se había sacado durante tanto tiempo que ciertas plantas ya crecían sobre ella. La acumulación de un exceso de lodos o nata impide la debida operación de este tipo de tanque que sirve para decantar sólidos y líquidos (foto: SANDEC).



**Figura 6.6** Esta capa de nata se ha quedado en el fondo de un tanque de sedimentación y espesamiento, luego del bombeo de la fracción líquida y los lodos espesados, en la ETLF Rufisque, Senegal (foto: SANDEC).

Es posible diseñar tanques de sedimentación y espesamiento que incluyen aparatos que raspan y bombean continuamente los lodos espesados afuera del tanque, mientras otros retiran la nata. Estos aparatos facilitan la operación e incrementan la flexibilidad administrativa, pero es necesario tomar en cuenta sus mayores costos de inversión, operación y mantenimiento (Capítulo 11).

#### 6.4.2 Periodo de puesta en marcha y variaciones estacionales

Por lo que los tanques de sedimentación y espesamiento dependen principalmente de procesos físicos, no requieren un tratamiento especial durante el periodo de puesta en marcha. Sin embargo, es conveniente evaluar las profundidades de las diferentes capas, a fin de optimizar los tiempos de uso y reposo, y, como consecuencia, la frecuencia de extracción de los lodos. Por otro lado, variaciones estacionales en las condiciones meteorológicas y las características de los LF pueden influir en la eficiencia de los tanques. Por ejemplo, la pérdida de agua mediante la evaporación en época seca podría aumentar la concentración de sólidos en la nata. También, mayores temperaturas incrementarían el proceso de digestión anaeróbica y, por lo tanto, el grosor de la nata.

### 6.5 RENDIMIENTO DE LOS TANQUES DE SEDIMENTACIÓN Y ESPESAMIENTO

La mayor consideración en el rendimiento de los tanques de sedimentación y espesamiento es la separación de los líquidos y los sólidos. A continuación, se analizan algunos mecanismos claves para lograr eficiencia en esta separación.

#### 6.5.1 Separación de sólidos y líquidos

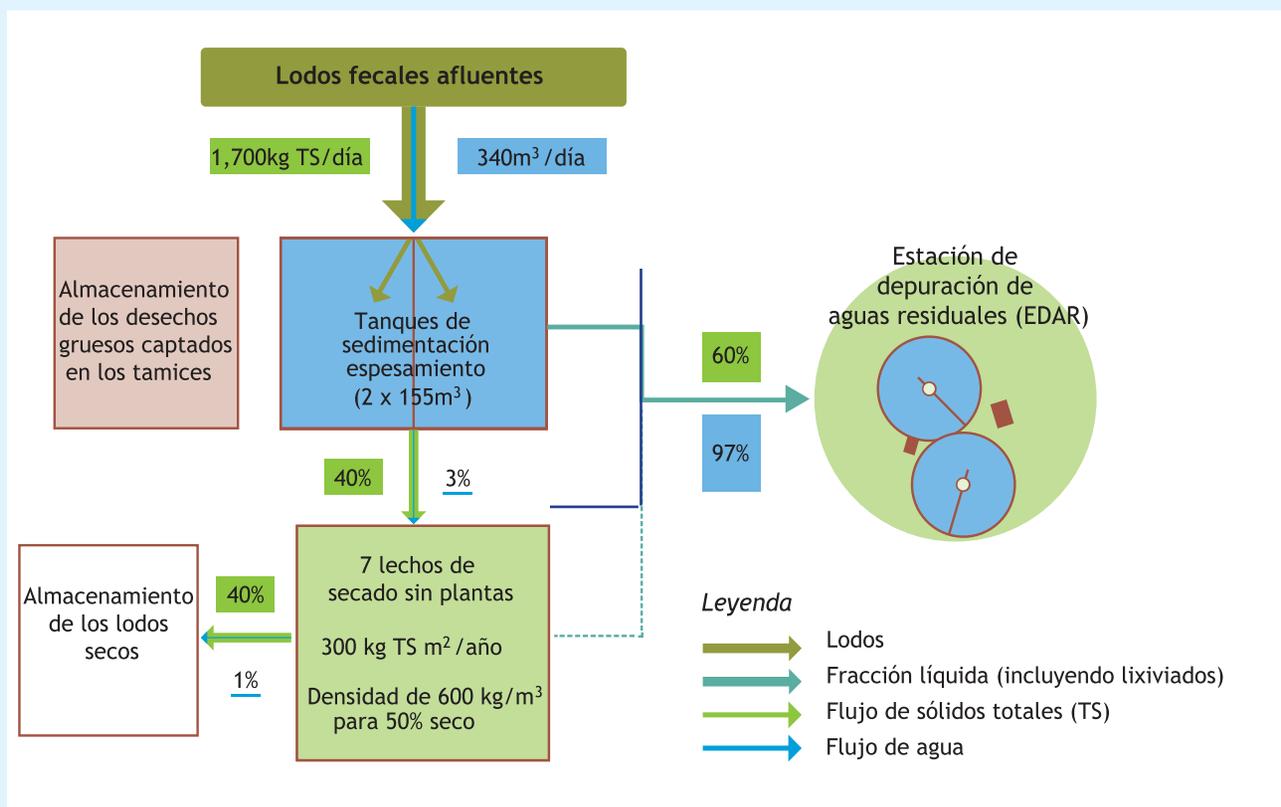
En la práctica, el promedio de eficiencia de sedimentación en tanques y lagunas es que solo un 50 o un 60 % de los SS se asientan. Con mejor diseño y operación de los tanques, se puede incrementar esta eficiencia hasta un 80 % (Heinss *et al.*, 1999).

## Caso de Estudio 6.2: Tanques de sedimentación y espesamiento y lechos de secado en la ETLF Cambérène, Senegal (Adaptado de Badji *et al.*, 2011; continuado en el Caso de Estudio 7.2)

La ETLF Cambérène, siendo la primera de escala completa en tratar los LF de la ciudad de Dakar, entró en operación en 2006. Consiste en una combinación de tanques de sedimentación y espesamiento (2 tanques de 155 m<sup>3</sup> cada uno). Los lodos espesados son transferidos a los lechos de secado mediante bombeo. El efluente de los tanques, junto con los lixiviados de los lechos de secado, es entregado a la EDAR local. Cada semana, un tanque recibe los LF, mientras el otro reposa y es limpiado. Los LF de Dakar son diluidos, con un promedio de solamente 5 g/L de TS. La capa freática es alta y la mayor parte de los LF provienen de tanques sépticos. La combinación de tanques de sedimentación y espesamiento y lechos de secado fue seleccionada para espesar los lodos antes de su secado y así reducir la extensión necesaria para los lechos de secado.

De 2007 a 2009, se midió la contaminación en el afluente y efluente de cada uno de los dos pasos de tratamiento. Se realizó un monitoreo continuo de la concentración y el contenido de materia seca de los lodos (Badji *et al.*, 2011; Figura 6.7). Aunque fue diseñado para tratar 100 m<sup>3</sup> de LF/día y 700 kg TS/día, la ETLF recibía 340 m<sup>3</sup> LF/día y 1.700 kg TS/día. A continuación, se presenta un análisis del destino de las diferentes fracciones de los LF.

En Accra, Ghana, se demostró la factibilidad de concentrar los lodos hasta un valor de 150 g TS/L, con un tanque similar de sedimentación y espesamiento. Sin embargo, no se sabía en aquel entonces que el afluente en Ghana era más concentrado desde antes. Además, el operador en Dakar dejó los lodos a reposar durante solo una semana, mientras que en Ghana permanecían más tiempo. Como consecuencia,



**Figura 6.7 Análisis de eficiencia y flujos en la Estación de Tratamiento de Lodos Fecales (ETLF) Cambérène, en condiciones reales de operación (Badji *et al.*, 2011)**

se logró una concentración de solo 60 a 70 g TS/L, quedando lejos de los 140 que contemplaba el diseño. Esto demuestra la gran importancia de realizar estudios preliminares para determinar las características (concentración, cantidad, tendencia de espesarse) de los mismos LF locales que se va tratar. A pesar de la dificultad de realizar estos estudios, pueden ahorrar mucho dinero en la operación de la ETLF. Otra complicación fue que el operador opinaba que la operación de los tanques era demasiado difícil, en especial la limpieza de la nata desde adentro del tanque. El bombeo también requería mucha atención, ya que el eje de la bomba se atascaba con desechos y tenía que despejarse. Esta situación condujo a atrasos en el bombeo de los lodos espesados y, por lo tanto, sobrecargas del tanque paralelo que tenía que usarse durante más tiempo de lo que dicta el diseño y un 60 % de los sólidos iban a la EDAR (Figura 6.7).

La concentración de los lodos espesados ( $C_s$ ) depende de la duración del ciclo operativo y de las características de los LF afluentes (en especial, su tendencia de espesarse; Tabla 6.1). Por ejemplo, se podría lograr que los lodos espesados tengan 60 g TS/L luego de un periodo de uso de 7 días. En Accra, con un ciclo operativo de alrededor de 8 semanas, Heinss *et al.* (1998) observaron un contenido de sólidos totales de 150 g TS/L en la capa espesada.

El grosor de la nata y el contenido de SS dependen principalmente del tiempo que dura el ciclo operativo, de las características de los LF afluentes y de la evaporación. Heinss *et al.* (1998) reportaron una capa de nata de 80 cm en los tanques de sedimentación y espesamiento que fueron operados en ciclos de 8 semanas. En la ETLF de Dakar, la nata tenía un grosor de 10 a 20 cm luego de una semana de uso.

### 6.5.2 Rendimiento del tratamiento

El principal objetivo de los tanques de sedimentación y espesamiento es la decantación de líquidos y sólidos, no la estabilización o la reducción de patógenos. Adicionales pasos de tratamiento son necesarios tanto para los sólidos espesados como para la fracción líquida. Los niveles de materia orgánica disuelta, nutrientes y partículas suspendidas seguirán elevados en la fracción líquida. En un caso, un 50 % de la DQO afluente quedó en los lodos asentados y la otra mitad en la fracción líquida (Badji *et al.*, 2011) y en otro caso un 25 % de la DQO permaneció en la fracción líquida (Heinss *et al.*, 1998). La eliminación o inactivación de los patógenos es también insignificante. Muchos de los patógenos más grandes, como los huevos de helmintos, se asientan y su separación sería correlacionada con la eficiencia en la separación de SS. Heinss *et al.* (1998) observaron que solo un 50 % de los huevos de helmintos se quedaron en los lodos espesados.

**Tabla 6.2** Un ejemplo de los resultados de estudios preliminares para determinar los parámetros de diseño

<b>Concentración inicial en los LF no tratados:</b>	$C_{i(TS)} = 7 \text{ g TS/L}$
<b>Origen de los LF:</b>	Principalmente tanques sépticos (LF estabilizados)
<b>Porcentaje de sólidos volátiles totales:</b>	<70 %
<b>Flujo afluente:</b>	$Q = 140 \text{ m}^3/\text{día}$
<b>Horario de operación de la ETLF:</b>	7 h/día 5 días/semana 52 semanas/año
<b>Coefficiente del flujo máximo diario:</b>	$C_p = 1,6$ (Este flujo 'pico' ocurre frecuentemente en la mañana, luego de la primera rotación de los camiones.)
<b>Concentración de los lodos espesados (en conos Imhoff de 1 L)</b>	60 g SS/L
<b>Tendencia a asentarse (en conos Imhoff de 1 L)</b>	Buena (SVI = 23 << 100)

## 6.6 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS TANQUES DE SEDIMENTACIÓN Y ESPESAMIENTO

Estos tanques son eficientes como un primer paso de tratamiento, ya que se decantan rápidamente los líquidos y los sólidos, son relativamente resistentes y reducen el volumen de los lodos por tratarse en los siguientes pasos.

Las limitaciones de los tanques de sedimentación y espesamiento incluyen:

- La falta de experiencia en su operación con LF y la falta de datos empíricos sobre los cuales basar diseños;
- Los lodos asentados todavía contienen mucha agua y requieren un secado adicional;
- Altos contenidos de SS y sustancias orgánicas en la fracción líquida; y
- La destrucción de patógenos es insignificante y los productos de estos tanques no podrán ser descargados en las aguas superficiales, ni tampoco utilizados directamente en la agricultura (Capítulo 10).

## 6.7 UN EJEMPLO DEL DISEÑO DE UN TANQUE DE SEDIMENTACIÓN Y ESPESAMIENTO

Como ya se mencionó, el diseño de tanques de sedimentación y espesamiento incluye el cálculo de la superficie, los volúmenes por capa y las configuraciones hidráulicas.

### 6.7.1 Situación inicial

En una situación de la vida real, estudios preliminares adecuados son necesarios para permitir un diseño específico que se adapta a las características del contexto local. Este ejemplo de un cálculo de un diseño corresponde a una situación típica para la instalación de tanques de sedimentación y espesamiento y se basa en los datos obtenidos en estudios preliminares (Tabla 6.2).

### 6.7.2 Suposiciones y decisiones del diseño

Con estos datos preliminares, se pueden tomar las siguientes decisiones y suposiciones:

- Una velocidad final de sedimentación de  $V_c = 0,5$  m/h, según la prueba de SVI y experiencia previa;
- Una eficiencia prevista de sedimentación de  $e = 80$  % de los SS;
- 2 tanques en paralelo, para permitir el reposo y limpieza de uno, mientras el otro está en uso;
- Un periodo de uso de una semana, es decir,  $N$  (el número de días operativos) = 5 días. Así se minimiza la digestión anaeróbica y el flujo ascendente de gases. Significa que cada tanque está en uso una semana de cada dos semanas, puesto que el ingreso de lodos afluentes se alterna entre los 2 tanques;
- Un periodo corto de reposo y compactación que dura 2 o 3 días. Así, la extracción de sólidos de cada tanque ocurre cada 10 días operativos (es decir, cada 2 semanas), cuando los lodos son todavía suficientemente líquidos para ser bombeados; y
- El operador es experimentado y responsable, por lo tanto, el bombeo de lodos y la limpieza de los tanques serán realizados correctamente.

### 6.7.3 Cálculos del diseño

La superficie ( $S$ ) del tanque que se requiere para permitir la velocidad final de sedimentación seleccionada ( $V_c$ ) puede ser estimada a partir del flujo afluente máximo ( $Q_p$ ), según las siguientes ecuaciones.

**Ecuación 6.4:**  $Q_p = Q \cdot C_p / 7 = 32 \text{ m}^3/\text{h}$

Donde 7 = número de horas de atención en la ETLF por día

**Ecuación 6.5:**  $S = Q_p / V_c = 64 \text{ m}^2$

### Volumen de la zona de espesamiento

La cantidad diaria de SS en los LF (M) se calcula basándose en la concentración inicial de los LF ( $C_i$ ).

**Ecuación 6.6:**  $M = Q \cdot C_{i(SS)} = 700 \text{ kg SS/día}$

La masa diaria de SS en los lodos espesados ( $M_t$ ) es calculado con la eficiencia de sedimentación de los SS (e).

**Ecuación 6.7:**  $M_t = M \cdot e = 560 \text{ kg SS/día}$

Donde e = 80 %. Para un diseño seguro, el valor de e debe representar a la máxima eficiencia prevista y no al promedio.

El volumen de la zona de almacenamiento de los lodos espesados ( $V_t$ ) se relaciona con la masa de las partículas atrapadas allí ( $M_t$ ) y la concentración de SS que se logra en estos lodos ( $C_t$ ).

**Ecuación 6.8:**  $V_t = M_t \cdot N / C_t = 47 \text{ m}^3$

### Configuración del tanque

La superficie del tanque debe ser larga y angosta, a fin de facilitar la distribución del flujo. Se recomienda que la relación entre el ancho y el largo sea entre 0,1 y 0,2.

**Ecuación 6.9:**  $S = \text{ancho} \cdot \text{largo} = 3 \cdot 22 = 66 \text{ m}^2$

### Profundidad de las zonas

Las siguientes características de diseño son recomendables para cada zona:

- Zona de nata: 40 cm (valor que se supone que es suficiente para 2 un ciclo de semanas);
- Zona de la fracción líquida: 50 cm (Heinss *et al.*, 1998);
- Zona de separación: 50 cm (Heinss *et al.*, 1998); y
- Zona de Espesamiento de los lodos: 75 cm (lo que da  $47 \text{ m}^3$  de almacenamiento en un tanque de  $66 \text{ m}^2$ )

Una esquema de estas profundidades es presentada en la Figura 6.8.



Figura 6.8 Esquema de la configuración del tanque de sedimentación y espesamiento del ejemplo de diseño.

#### 6.7.4 Análisis de flujo de masa en el tratamiento de lodos fecales

En este ejemplo, se diseñó la zona para los lodos espesados basándose en una separación de un 80 % de los SS. Con el fin de planificar el tratamiento adicional de la fracción líquida, una eficiencia de sedimentación ( $e$ ) más realista de un 60 % debe ser considerada, de tal manera que un 40 % del  $C_{i(SS)}$  puede estar en la fracción líquida. Estos flujos de masa se presentan en la Figura 6.9, con las estimaciones de los SS que estarán en la fracción líquida y en los lodos espesados cuando pasan a su tratamiento adicional.

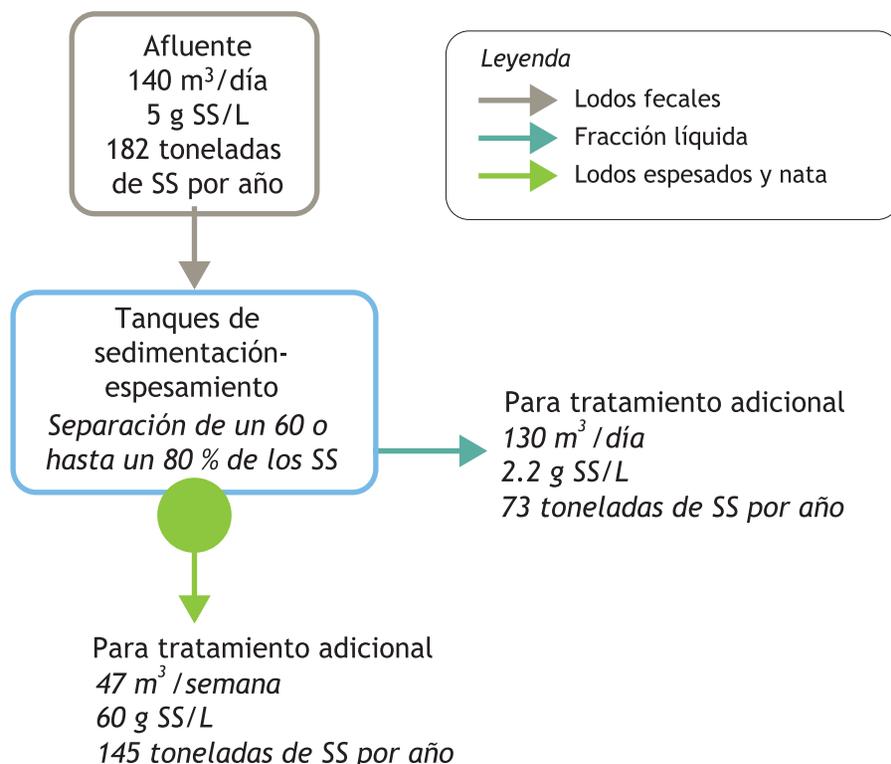


Figura 6.9 Esquema de los flujos de masa en el ejemplo teórico de tratamiento en tanques de sedimentación y espesamiento.

## 6.8 BIBLIOGRAFÍA

- Badji K., Dodane P.H., Mbéguéré, M., Koné, D. (2011), Traitement des boues de vidange: éléments affectant la performance des lits de séchage non plantés en taille réelle et les mécanismes de séchage. Actes du symposium international sur la Gestion des Boues de Vidange, Dakar, 30 juin – 1er juillet 2009. Dübendorf, Suiza: EAWAG/SANDEC.
- Heinss, U., Larmie, S.A., Strauss, M. (1998). Solids Separation and Pond Systems for the Treatment of Faecal Sludges in the Tropics – Lessons Learnt and Recommendations for Preliminary Design. Report No. 05/98. Dübendorf, Suiza: EAWAG/SANDEC.
- Heinss, U., Larmie, S.A., Strauss, M. (1999). Characteristics of faecal sludges and their solids-liquid separation. Dübendorf, Suiza: EAWAG/SANDEC.
- Pujol, R., Vachon, A., Martin, G. (1990). Guide technique sur le foisonnement des boues activées, ed. FNDAE, Ministère de l'Agriculture et de la Forêt. Francia.
- Ramalho, R.S. (1977). Introduction to Wastewater Treatment Processes, Academic Press.
- Strauss, M., Larmie, S.A., Heinss, U., Montangero, A. (2000). Treating faecal sludges in ponds. Water Science and Technology 42(10), p.283-290.
- Metcalf y Eddy (2003). Wastewater Engineering: treatment, disposal, reuse. Tchobanoglous, G., Burton, F.L. eds. McGraw-Hill Book Company.
- Vonwiller, L. (2007) Monitoring of the faecal sludge treatment plant Cambérène in Dakar. Dübendorf, Suiza: EAWAG.

### Preguntas para el Estudio de este Capítulo

1. ¿Cuáles son los tres principales mecanismos que explican el proceso de sedimentación y espesamiento? ¿Cómo funcionan?
2. Nombre tres ventajas y tres desventajas de los tanques de sedimentación y espesamiento.
3. ¿Cuáles son los tres factores que se calculan en el diseño de tanques de sedimentación y espesamiento?
4. ¿Por qué es importante calcular la superficie del tanque, los volúmenes de las distintas zonas y las configuraciones hidráulicas?