

Lechos de Secado con Plantas

Ives Magloire Kengne y Elizabeth Tilley

Objetivos de aprendizaje

- Conocer en qué consiste un lecho de secado con plantas para la separación del agua de los lodos.
- Contar con un resumen de los tipos de plantas que pueden utilizarse, el papel que juegan en la separación del agua y los criterios para elegirlos.
- Conocer el nivel apropiado de monitoreo para la operación y mantenimiento de lechos de secado con plantas.
- Poder diseñar un lecho de secado con plantas para lograr sus objetivos de tratamiento.

8.1 INTRODUCCIÓN

Los lechos de secado con plantas (LSP), también llamados ‘camas vegetadas para la separación del agua’ o ‘lechos de junquillos para el secado de lodos’, son un tipo de humedal artificial de flujo vertical que consiste en una gruesa capa de medio filtrante poroso (p.ej., arena o grava) en la cual están sembradas plantas emergentes. Se descargan capas de lodos sobre los LSP, donde el agua puede filtrarse y los sólidos se estabilizan por medio de múltiples mecanismos físicos y biológicos (Kadlec y Knight, 1996).

En un inicio, los LSP fueron desarrollados para estabilizar y secar los lodos de pequeñas estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) de lodos activados en Europa y EE.UU. (Kadlec y Knight, 1996; Lienard y Payrastre, 1996; Nielsen, 2003). Luego, se adaptó esta tecnología exitosamente en otras partes del mundo y para varios tipos de lodos, incluyendo los lodos fecales (LF) de tecnologías descentralizadas de saneamiento. En los climas de Europa y EE.UU., se ha visto que los LSP son más eficientes para la separación del agua, la reducción de sólidos y la estabilización en el verano que en el invierno (Edwards *et al.*, 2001), mientras que en los países tropicales funcionan de forma excelente durante todo el año, gracias a la menor variación climática y la mayor constancia de la radiación solar. Desde 1996, SANDEC/EAWAG (el Departamento de Agua y Saneamiento para los Países en Desarrollo del Instituto Federal Suizo de Ciencia y Tecnología Hídricas) y sus socios en la investigación han emprendido conjuntamente experimentos en el campo para determinar las eficiencias de tratamiento y establecer pautas para el diseño y la operación de lechos piloto para tratar LF. Por ejemplo, una instalación a escala piloto en Tailandia ha estado funcionando exitosamente desde hace más de una década (Kootatep *et al.*, 2005). En África, se han llevado a cabo pruebas a escala de patio en la Universidad de Yaoundé I (Camerún, Figura 8.1) y a escala completa en la Estación de Tratamiento Cambérène, en Dakar, Senegal (EAWAG/SANDEC, 2009); Kengne *et al.*, 2008).

Aunque son pocos los ejemplos de LSP que tratan actualmente los LF a escala completa, la investigación ha arrojado resultados muy alentadores y se prevé que los LSP serán aplicados ampliamente, alrededor del mundo y en especial en los países tropicales de bajos ingresos.

Los LF se pueden descargar sobre los LSP una y otra vez (hasta 20 cm de espesor cada vez; Kadlec y Wallace, 2009), se acumulan durante varios años según sea la tasa de carga, la capacidad del sistema y las tasas de mineralización (Nielsen, 2003). Debido al pequeño número de LSP existentes y en operación y la variación en las condiciones operativas, es difícil o imposible dar un solo valor o un rango preciso de cuántos años pueden acumularse los lodos en un LSP. La permeabilidad a largo plazo del lecho se mantiene por la dinámica red de canales creados por las raíces de las plantas y a su crecimiento constante. El volumen de los lodos presentes encima del LSP se reduce permanentemente por la pérdida del agua y por los efectos de la degradación. Por otro lado, las plantas mantienen la porosidad de la capa de lodos, de tal manera que los lodos puedan acumularse durante mucho más tiempo que en los lechos de secado sin plantas, donde es necesario extraer los lodos secos cada dos o tres semanas (Strauss *et al.*, 1997). Por lo tanto, las plantas emergentes son esenciales para un mejor rendimiento en estabilización, reducción de patógenos y permeabilidad, en comparación con los lechos de secado sin plantas.

El rendimiento de un LSP en los procesos de separación del agua, estabilización y mineralización depende de muchos factores, como el tipo y tamaño del medio filtrante, la madurez del lecho, el clima, las características de los lodos, además de factores operativos como la tasa de carga hidráulica (HLR), la tasa de carga de sólidos (SLR) y la frecuencia de descargas (Breen, 1997; Prochaska *et al.*, 2007; Van Cuyk *et al.* 2001). A medida que el lecho madura, las comunidades microbianas se establecen y se estabilizan más. Las siguientes secciones presentan en detalle, las condiciones operativas y los parámetros de diseño que se definen actualmente como buenas prácticas para LSP que tratan LF.



Figura 8.1 Lechos de secado con plantas, de escala piloto, para el tratamiento de lodos fecales en la Universidad Yaoundé I (foto: Linda Strande).

8.2 ESPECIES DE PLANTAS

Las plantas acuáticas macroscópicas viven en humedales y pantanos y se distinguen por su capacidad de permanecer parcial o completamente sumergidas en el agua. Son clasificadas en cuatro grupos: las que flotan libremente, las sumergidas, las de hojas flotantes y las emergentes. Las que flotan libremente tienen hojas que flotan en la superficie y raíces que se extienden dentro del agua. Las sumergidas suelen tener raíces en el fondo y sus partes vegetativas predominantemente sumergidas. Las de hojas flotantes tienen raíces en el fondo y hojas que flotan sobre el agua. Finalmente, las emergentes tienen raíces en el fondo, debajo de aguas poco profundas, y sus tallos y hojas extienden por encima del agua.

Aunque las plantas acuáticas producen muchas semillas, la germinación de las mismas es limitada por las condiciones anegadas (Hutchinson y Dalziel, 1972). La reproducción es más exitosa por medio de cortes, estolones o rizomas. Los rizomas son tallos subterráneos, de los cuales salen brotes hacia arriba y raíces hacia abajo y a los lados. Sobre el tallo, nuevas yemas se forman en los nudos y el espacio entre los nudos se llama el entrenudo. Los rizomas son muy importantes, ya que proveen un amplio espacio para el crecimiento de las bacterias y en los LSP las bacterias son responsables de la degradación y mineralización de las sustancias orgánicas en los lodos. La rizósfera es el área alrededor de las raíces, donde existe una mayor concentración de oxígeno debido a la emisión del mismo a través de las raíces (Sección 8.3.2). La Figura 8.2 muestra la forma de los rizomas y de los nudos y entrenudos, típica de las plantas acuáticas.

En general, las plantas acuáticas emergentes son las más aptas para sembrarse en los LSP, porque son las más productivas de todas las plantas acuáticas. En otras palabras, la tasa de multiplicación y generación de nueva biomasa es muy alta. Establecen y extienden sus raíces a través de las capas de lodos, mientras el tallo sigue creciendo hacia arriba. Las hojas aprovechan la luz solar para la fotosíntesis, durante la cual sucede la transpiración.



Figura 8.2 Estructura de los rizomas de *E. pyramidalis*, mostrando sus raíces y dos brotes nuevos (izq.). Aplicación de lodos fecales en un lecho de secado con plantas, con dos brotes tiernos (der.), en los cuales se observan sus nudos y entrenudos (fotos: Ives Kengne).

Aunque muchas especies de plantas acuáticas existen en la naturaleza, solo ciertas especies de las emergentes se desarrollan bien en las condiciones de los LSP, debido a la amplia variación en el pH y en las concentraciones de oxígeno (en especial según las descargas de lodos), salinidad y nutrientes (De Maeseneer, 1997; Uggetti *et al.*, 2012). Las concentraciones elevadas y muy variables de nutrientes en los LF implican que cualquier especie de planta sembrada en un LSP tiene que tolerar esta amplia variación, además de los cambios bruscos de descargas y deshidratación. Los LF de baños públicos, por ejemplo, tienen altas concentraciones de sales (con conductividades hasta de 15 m miliSiemens/cm) y de amoníaco (2 a 5.000 mg/L), las cuales son tóxicas para la mayoría de las plantas (Clark y Baldwin, 2002). Para compensar esto, los LF de baños públicos deben mezclarse con LF que contienen menos sal y amoníaco (p.ej., de pozos sépticos) para crear condiciones propicias para la especie de plantas en un LSP.

En Europa, las plantas emergentes más comunes en LSP son los carrizos (*Phragmites* spp.) y aneas (*Typha* spp.) (Kadlec y Knight; 1996; Kim y Smith, 1997; Koottatep *et al.*, 2005). *Phragmites australis* es una especie invasiva y su uso es restringido en los EE.UU. y en Nueva Zelanda (Uggetti *et al.*, 2012). Se están explorando el uso de otras especies nativas, como Pasto Limpago (*Echinochloa pyramidalis*) y Papiro (*Cyperus papyrus*). Ambas especies han arrojado datos alentadores para LSP en pruebas preliminares.

Los siguientes criterios deben aplicarse en la selección de la especie a sembrar en un LSP (De Maeseneer, 1997):

- Rápido crecimiento en diferentes condiciones;
- Alta capacidad de transpiración;
- Tolerancia a inundaciones y sequías;
- Tolerancia a valores extremos de pH y salinidad;
- Profundidad de raíces y rizomas;
- Presencia de raíces adventicias que brotan de los nudos a medida que los lodos les tapen;
- Que la especie sea de fácil acceso, nativa y no invasiva.

Aunque el carrizo, *Phragmites australis*, es la especie sembrada más frecuentemente en LSP (De Maeseneer, 1997; Hardej y Ozimek, 2002), existen muchas otras especies locales no probadas con estas mismas características, que podrían lograr similar o mejor tratamiento. La Tabla 8.1 nombra las especies de plantas acuáticas que se siembran más frecuentemente para tratar los LF.

Tabla 8.1 Las plantas acuáticas más frecuentemente reportadas en el tratamiento de lodos fecales (Kengne *et al.*, 2008; Nielsen, 2005; Koottatep *et al.*, 2005)

Nombre científico	Nombre común	Tipo de agua	Hábitat natural	Régimen de agua
<i>Phragmites</i> spp.	Carrizo (en inglés, Reed)	Dulce a salobre	Humedales, pantanos	Inundación estacional o permanente, hasta 60 cm
<i>Typha</i> spp.	Anea, Enea, Aguapa, Totora (Cattail)	Dulce	Márgenes de lagunas	Inundación estacional o permanente, hasta 30 cm
<i>Cyperus papyrus</i>	Papiro (Papyrus)	Dulce	Márgenes de lagunas	Inundación estacional o permanente, hasta 30 cm
<i>Echinochloa pyramidalis</i>	Pasto Limpago, Pasto Mijillo Zacate Pinto (Antelope Grass)	Dulce	Humedales, pantanos	Inundación estacional o permanente, hasta 40 cm

8.3 MECANISMOS DE TRATAMIENTO

El tratamiento de LF en LSP se logra por medio de una combinación de procesos físicos y bioquímicos. En climas húmedos y lluviosos, las plantas acuáticas juegan un papel primordial en casi todos estos procesos y son las responsables de los mayores grados de tratamiento en LSP comparados a lechos de secado sin plantas, en función de estabilización y reducción de patógenos (Brix, 1997; Kadlec y Knight, 1996). Las plantas acuáticas ejercen las siguientes funciones:

- Estabilizar los lechos para prevenir la erosión y taponamiento del medio filtrante y así mejorar el drenaje;
- Incrementar la separación del agua vía evapotranspiración (a diferencia de solamente evaporación en lechos de secado sin plantas);
- Proveer superficies para la multiplicación de microbios benéficos;
- Oxigenar los lodos dentro de la rizósfera; y
- Absorber metales pesados y nutrientes.

Aunque los LSP se adaptan a los climas húmedos y lluviosos, con su habilidad de separar la humedad por medio de la transpiración, las plantas pueden marchitarse y morir si el clima es demasiado caliente y seco, en especial si los lodos no aportan suficiente humedad. Esta situación puede controlarse al cerrar temporalmente el tubo de drenaje o incrementar la altura de la salida del efluente y así permitir la eficiente operación de LSP aún en climas muy secos.

Las siguientes secciones explican los principales mecanismos de tratamiento que ocurren en los LSP y las maneras en que las plantas apoyan a estos procesos. Esta información debe compararse con las otras opciones tecnológicas presentadas en este libro, para seleccionar la solución más apropiada según las condiciones de cada sitio (Capítulo 17).

8.3.1 Infiltración

Al aplicar los lodos sobre los LSP, los sólidos se retienen en la superficie del medio filtrante o los lodos de descargas anteriores y los líquidos se drenan verticalmente hasta donde son recolectados para tratamientos adicionales (Kadlec y Knight, 1996). Una de las mayores preocupaciones en la operación de lechos de secado sin plantas es la formación de canales de erosión que dan lugar a “cortos circuitos” y al tratamiento desigual. En cambio, la densa red de raíces de las plantas en un LSP impide la erosión y ayuda a estabilizar las capas de lodos. El movimiento natural de las plantas, ocasionado por el viento, junto con el crecimiento de las raíces, fomentan el drenaje del agua alrededor de los tallos, en los espacios tubulares que allí se forman. A medida que las plantas crecen, rompen y aflojan los lodos que se acumulan, lo que también mantiene buenas condiciones para la percolación (Brix, 1994). Cuando una planta muere y se descompone, sus raíces, rizomas y tallos dejan canales que permiten la infiltración de agua y la circulación de aire, logrando mayor oxigenación (Brix, 1994).

8.3.2 Evapotranspiración

La transpiración es el proceso en el cual las superficies de las hojas y tallos de las plantas pierden agua a la atmósfera. Por lo tanto, la presencia de plantas contribuye al secado de los lodos al absorber agua y liberarla al aire por medio de la transpiración. En áreas no tropicales vegetadas por carrizos, las tasas de evapotranspiración (la suma de la evaporación y la transpiración) alcanzan hasta 2,5 cm/día, en días muy calurosos (De Maeseneer, 1997). Esta tasa puede ser aún mayor en el Trópico, según las condiciones climáticas como la velocidad del viento y la humedad relativa. La evapotranspiración de las plantas incrementa la deshidratación y la reducción del volumen de los lodos, en comparación con los lechos de secado sin plantas. Un estudio comparó lechos de secado con y sin plantas que recibían los lodos de una estación de tratamiento biológico de aguas servidas. Los LSP lograron más que un 95 % reducción en el volumen en un año (descargas durante 6 meses, reposo durante 6 meses), con una profundidad de lodos hasta 493 cm, mientras que los lechos de secado sin plantas lograron una reducción de menos del 90 % del volumen. El contenido de materia seca en los mismos lechos alcanzó un 69 % en los LSP y solo un 31 % en los lechos sin plantas. Se cree que este mayor rendimiento se debe a la evapotranspiración de las plantas y la mayor percolación gracias a sus raíces (Stefanakakis y Tsihrintzis,

2012a). Aunque los LF no estabilizados podrían comportarse de otra manera, estos resultados con lodos de aguas servidas proveen ejemplos a lo largo de este capítulo.

8.3.3 Estabilización y mineralización

La estabilización, también llamada 'humificación', es la conversión de materia orgánica en compuestos orgánicos más estables. La mineralización es el proceso de la liberación de nutrientes inorgánicos biológicamente disponibles durante la degradación de la materia orgánica (p.ej., la liberación de amoníaco al degradar los aminoácidos). Estos nutrientes inorgánicos son esenciales para las plantas y los microbios. Aún los LF sometidos a la descomposición bacteriana durante años (p.ej., en un tanque séptico) pueden requerir más estabilización si la DBO sigue alta. La estabilización también reduce el olor de los lodos y destruye los patógenos. Por ejemplo, una mayor retención de los lodos contribuye a la debilitación de las membranas externas de los huevos de helmintos, lo que permite su degradación por los hongos y bacterias presentes en los lodos (Sanguinetti *et al.*, 2005).

La superficie de los rizomas provee áreas para fijarse las bacterias y otros microorganismos y esta densidad y actividad de microbios conduce mejor mineralización de los lodos y mayor asimilación de agua y nutrientes en las plantas (Bialowiec *et al.*, 2007; Brix, 1997; Chen *et al.*, 2007; Gagnon *et al.*, 2007).

No existe consenso sobre la medición de la mineralización. Sin embargo, la reducción de los sólidos volátiles totales (TVS) y la relación de TVS a sólidos totales (TS) funcionan como indicadores del grado de mineralización de los lodos en un LSP, ya que reflejan los cambios en el material orgánico de fácil degradación. La mineralización sucede principalmente en los periodos de reposo, entre las descargas de lodos, puesto que el proceso es más rápido en condiciones aeróbicas. Cuando se aplican los lodos en los lechos, el oxígeno es más escaso debido a la saturación del agua y las altas concentraciones de materia orgánica biodegradable. Un estudio de los lodos de una estación de tratamiento biológico de aguas servidas demostró una reducción de 0,74 TVS/TS a 0,59 TVS/TS (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012a) y otro estudio llegó hasta 0,52 TVS/TS (Uggetti *et al.*, 2012). Se ha encontrado que el contenido de TVS es mucho menor en las capas inferiores del lecho de secado, en comparación con la capa superior, debido al mayor tiempo de retención en el fondo, lo que conduce a mayor oxidación (Stefanakis *et al.*, 2009).

8.3.4 Transferencia de oxígeno

Los LF sin tratamiento contienen poco o nada de oxígeno disuelto y, por lo tanto son anaeróbicos. Se transfiere oxígeno a los lodos por medio de varios mecanismos físicos y biológicos y se forman zonas con oxígeno (aeróbicas) y otras sin oxígeno (anaeróbicas). Estas concentraciones variables de oxígeno fomentan procesos complejos (p.ej., nitrificación y desnitrificación) que al ocurrir en el LSP conducen a mejores grados de tratamiento que en los lechos de secado sin plantas.

Las plantas acuáticas enraizadas se han adaptado a crecer en el suelo saturado de agua, en condiciones anaeróbicas. Sus raíces reciben oxígeno por sistemas internos de transferencia que llevan el oxígeno desde los tallos y hojas hasta los rizomas y raíces. Este sistema interno hueco para la circulación de aire (aerénquima) puede ocupar hasta un 60 % del volumen de la planta, según la especie (Brix, 1994). Parte del oxígeno que llega a la raíz se fuga a la rizósfera, lo que crea condiciones aeróbicas allí que apoyan a una diversidad de bacterias aeróbicas que realizan la degradación y la nitrificación. Estas fugas suceden principalmente en la punta de la raíz y la tasa de liberación de oxígeno depende de la permeabilidad de las paredes de la raíz y la concentración interna de oxígeno, entre otros factores. Es difícil cuantificar esta tasa, pero se ha calculado que los *Phragmites* liberan entre 0,02 y 12 g/m²/día (Brix, 1994).

A medida que la capa superior se seca, se parte, abriendo así fisuras donde más oxígeno puede entrar (Figura 8.3). Estas grietas son más pronunciadas en climas cálidos y áridos, siendo comunes en los sectores de los lechos donde hay menos rizomas, ya que estos últimos mantienen unidos a los lodos (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012a). Por lo tanto, las condiciones calientes y secas son convenientes, dado que más oxígeno pueda ingresar por las grietas, aunque en casos extremos las plantas pueden marchitarse y morir. Esto resalta la importancia de elegir cuidadosamente entre lechos de secado con o sin plantas según las condiciones locales.

8.4 INDICADORES DE RENDIMIENTO

El rendimiento de un LSP se evalúa mediante el contenido de agua, la cantidad y forma de los nutrientes, el grado de estabilización y la reducción de patógenos en los lodos tratados. En las siguientes secciones, se explica en mayor detalle cómo medir y evaluar estos indicadores de rendimiento. Se presentan dos casos de estudio, en Tailandia y Camerún, para dar ejemplos de datos reales del rendimiento logrado en el campo.

8.4.1 Separación del agua

La separación del agua consiste en la eliminación del agua de los lodos para facilitar su manejo y reutilización. Esto se evalúa generalmente al medir la concentración de TS (o materia seca, MS), lo que también es uno de los principales parámetros de diseño de las estaciones de tratamiento de los LF (ETLF). En los países tropicales, es factible lograr porcentajes de MS mayores a 30 % al tratar lodos en LSP (Kengne *et al.*, 2009a).



Figura 8.3 Ejemplo de la formación de grietas en un lecho de secado sembrado con *E. pyramidalis* (foto: Ives Kengne).

8.4.2 Retiro de nutrientes

El destino de los nutrientes en el MLF es muy importante, ya que determina las oportunidades del uso final de los lodos y el tratamiento necesario para el efluente. Es factible recuperar el nitrógeno (N) y el fósforo (P) para usos benéficos, pero pueden causar daños al suelo y al agua cuando son descargados en el ambiente desordenadamente. Un estudio demostró que los lodos de una estación de tratamiento biológico de aguas servidas, depositados en un LSP con una tasa de carga de lodos entre 30 y 75 kg de materia seca (MS)/m²/año, mostró una disminución en la concentración del Nitrógeno Total Kjeldahl (TKN) de un 35 a un 42 % (de una concentración inicial de 55 mg TKN/g MS), en comparación con una reducción de solo el 24 % en un lecho de secado sin plantas, lo que resalta el papel de las plantas en el ciclo de nutrientes.

Los principales procesos en la transformación del nitrógeno en los LSP son probablemente la asimilación por las plantas y los microbios, la evaporación y, en sectores anaeróbicos, la desnitrificación (Kadlec, 2009). Las plantas también cumplen otras funciones en la desnitrificación, por ejemplo como fuente de carbono y como sitios donde se fijan los microorganismos desnitrificantes. A diferencia del nitrógeno, se ha determinado que el retiro de fósforo es relativamente similar entre los lechos de secado con y sin plantas; parece que el mecanismo principal que retira el fósforo es la sorción sobre el medio filtrante poroso (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012a).

Las plantas absorben entre el 0,2 y 5 % del nitrógeno y fósforo en los LSP, según las condiciones climáticas, tasas de carga y otros factores (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012a). Aunque no existan datos para los LSP, un 60 a 70 % de la pérdida del nitrógeno en los humedales artificiales se debe a la reducción de nitratos (Cooke, 1994) y puede ser similar en los LSP, dependiendo del grado de saturación de agua.

Una manera de lograr la recuperación de nutrientes es cosechar las plantas. Si mueren y se pudren en el mismo lecho, los nutrientes regresan al lodo. La cosecha de las plantas y su uso para forraje u otros fines es uno de los principales beneficios de los LSP. En Camerún, unos LSP sembrados con Papiro generaron una cosecha anual de 20 a 30 toneladas de biomasa seca encima del suelo por hectárea y la biomasa subterránea (que permanece normalmente allí para seguir creciendo) varió entre 80 y 150 toneladas más. En el mismo estudio, otros LSP, sembrados con *E. pyramidalis*, generaron cosechas mayores a 100 o 150 toneladas secas por hectárea (con tres cortes en el año) y una biomasa subterránea desde 30 hasta 70 ton/ha. Al cosechar las partes aéreas de los Papiros, se remueve del LSP desde 236 hasta 383 g/m²/año de N y desde 60 hasta 92 g/m²/año de P. En el caso del *E. pyramidalis*, se extrae de 216 a 330 g N/m²/año y de 55 a 84 g P/m²/año. Además, la extracción de los rizomas y raíces, en el momento de excavar los lodos secos, representa 55 a 124 g N/m²/año y 33 a 36 g P/m²/año (Kengne *et al.*, 2008).

El fósforo que no sale en los lixiviados se presenta generalmente en la forma de partículas en las capas de lodos o adsorbido sobre el medio filtrante y las raíces. El nitrógeno se remueve principalmente mediante la nitrificación y desnitrificación, procesos que se incrementan en presencia de las plantas, lo que explica el mayor rendimiento en el tratamiento de lixiviados en los LSP.

8.4.3 Destino de los metales pesados

En general, los LF no deberían tener altas concentraciones de metales pesados, a menos que los reciban de fuentes industriales (Kroiss, 2004; Molla *et al.*, 2002; Towers y Horne, 1997). Bajas concentraciones de metales como cromo (Cr), cadmio (Cd), plomo (Pb), cobre (Cu), níquel (Ni), manganeso (Mn), zinc (Zn) y hierro (Fe) pueden entrar en los LF debido a las tecnologías descentralizadas de contención, los productos químicos o pilas botadas en los mismos y la contaminación por los camiones tanqueros que también transportan lodos industriales. También pueden estar presentes porque las personas los han consumido y excretado.

Caso de Estudio 8.1: Experimentos sobre la frecuencia de carga en Tailandia

(Adaptado de Koottatep *et al.*, 2005)

Unos lechos de secado sembrados con *Typha* fueron aplicados en Bangkok, Tailandia, para tratar LF con concentraciones promedio de 15,4 g/L TS, 18,7g/L DQO, 1,1 g/L TKN y 0,4 g/L NH₃-N.

Con tasas de carga de lodos que variaban entre 80 y 250 kg TS/m²/año, las eficiencias de retiro fueron de 66 a 88 % TS, 78 a 99 % DQO, 82 a 99 % TKN y 40 a 98 % NH₃-N. Aproximadamente 65 % del líquido drenó a través del lecho generando un lixiviado con concentraciones de 1,9 a 6,01 g/L TS, 0,1 a 2,2 g/L DQO, 0,006 a 0,25 g/L TKN y 0,005 a 0,2 g/L NH₃-N. El 35 % restante de líquidos evapotranspiró o quedó en los lodos.

Variar la frecuencia de carga entre una y tres veces a la semana no cambió significativamente el rendimiento de tratamiento, pero la aplicación de dos cargas por semana ayudó mucho al crecimiento de las plantas, sin necesidad de retener los lixiviados, al cerrar la válvula de salida. Sin embargo, para minimizar la mano de obra requerida para estas cargas múltiples, se decidió aplicar una carga por semana y retener los lixiviados, cuando fuera necesario, como protocolo permanente. Esto mantuvo suficiente humedad para que las *Typha* no se marchitaran en tiempos de sequía.

Caso de Estudio 8.2: Experimentos sobre las tasas de carga en Camerún

(Adaptado de Kengne *et al.*, 2011)

En Camerún, se llevaron a cabo experimentos sobre tasas de carga en LSP de Papiro y *E. pyramidalis*, con LF de varios tipos de instalaciones descentralizadas (pozos sépticos, letrinas públicas y tradicionales letrinas de pozo). Se aplicaron dos tasas: 100 y 200 kg/m²/año. Cuando los lechos fueron cargados una vez a la semana, la tasa de carga no afectó significativamente el rendimiento en la separación del agua. En promedio, las concentraciones de TS y TSS disminuyeron desde 3,7 % y 27,6 g/L en los lodos frescos hasta menos de 0,5 % y 2,1 g/L en los lixiviados, respectivamente. Las concentraciones de DQO bajaron desde 31 g/L en los lodos frescos hasta menos de 0,8 g/L en los lixiviados y NH₄⁺ se redujo de 0,6 g/L a menos de 0,09 g/L. La concentración de TKN en los lixiviados fue en promedio de 0,1 a 0,2 g/L. Se logró una buena nitrificación con una concentración media de 0,2 a 0,5 g/L, probablemente debido a un aumento en la oxigenación al pasar por el medio filtrante.

Los lechos cargados a 100 kg TS/m²/año se obstruyeron raramente y el promedio de materia seca en sus lodos al final fue mayor al 30 %. Aproximadamente el 50 % del volumen de los lodos aplicados fue recolectado como lixiviados. Las tasas de carga mayores a 200 kg TS/m²/año ocasionaron más taponamiento en los lechos de Papiro que en los lechos de *E. pyramidalis*, lo que disminuyó el drenaje de los lechos.

Se ha determinado que, en un LSP del Carrizo Común (*Phragmites australis*) que recibía lodos de una EDAR de lodos activados, los metales Cr, Cd, Pb, Cu, Ni, Mn, Zn y Fe no se distribuyeron en forma pareja a través del lecho y tampoco se acumularon significativamente en las plantas. Los diferentes metales fueron asimilados por las plantas en forma desigual, en la siguiente orden, de mayor a menor: Cr > Fe > Zn > Mn > Cu > Pb > Ni > Cd. Los Carrizos resultaron relativamente tolerante a las concentraciones de metales y no mostraron señales de toxicidad, a pesar de absorber un poco más de metal cada año. Los metales se concentraron más en las raíces que en los tallos u hojas y las cantidades absorbidas no fueron significativas, siendo menos del 3 % del total de metales en los lodos (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012b).

Durante el tratamiento, la concentración de metales en los lodos suele incrementar, a medida que la materia orgánica se descompone. Sin embargo, un estudio demostró que el medio filtrante fue el mayor sumidero de los metales, al recibir un 47 % del contenido afluente. Los principales mecanismos de retención de metales en las capas de grava y arena fueron la sedimentación, la adsorción y la precipitación (como óxidos, carbonatos y sulfuros). Solo un 16 % de los metales afluentes escaparon en los lixiviados efluentes (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012b).

8.4.4 Reducción de patógenos

Al identificar las calidades de lodos tratados para destinarlos a diferentes usos finales, es preferible aplicar un enfoque de barreras múltiples para controlar los patógenos, en lugar de exigir límites estrictos. Por ejemplo, los lodos que serán utilizados como combustible o para producción de forraje no requieren el mismo grado de reducción de patógenos que lodos destinados al cultivo de plantas de consumo humano. (Capítulo 10, sobre los usos finales de los productos de tratamiento, detalla mucho más sobre este asunto.)

La principal preocupación respecto al uso de LF tratados en la agricultura consiste en su posible contenido de patógenos. Los principales mecanismos que reducen los patógenos en los LSP son la depredación y la deshidratación, procesos que requieren tiempo; por lo tanto, mientras más tiempo se retienen los LF mayor será la destrucción de estas especies infecciosas. Los huevos de helmintos son muy resistentes al estrés ambiental (p.ej., deshidratación y calor) y constituyen un excelente indicador de la calidad de los lodos tratados. Ingallinella *et al.* (2002) resumieron varios informes y determinaron que el tratamiento de LF en LSP redujo la concentración de huevos de helmintos de 600-6000 huevos de helmintos/L a solo 170 huevos/g TS, con la viabilidad de los huevos entre 0,2 y 3,1 %. Otra investigación demostró que los LSP eliminan todos los huevos de helmintos del lixiviado, pero permanecen en baja concentración en los sólidos (79 huevos de helmintos/g TS) (Kengne *et al.*, 2009b).

8.4.5 Otras consideraciones

Aparte de su función directa en el tratamiento, las plantas acuáticas son placenteras estéticamente y proveen de hábitat a una variedad de vida silvestre, como aves y reptiles (Brix, 1994). Sin embargo, la presencia de vectores de enfermedades (p.ej., mosquitos, roedores) podría representar un riesgo para la salud si no están manejados debidamente. Las comunidades aledañas a los LSP suelen aceptar más fácilmente una tecnología que se ve 'natural' e incluso en muchos casos podrían no darse cuenta que los LSP fueran construidos y que estén destinados al tratamiento de LF (De Maeseneer, 1997). Aunque no se pueda medir directamente el valor de la apariencia, la estética de los LSP es una ventaja para tomar en cuenta al seccionar una tecnología para el tratamiento.

En la Tabla 8.2 se presentan indicadores de rendimiento de LSP que fueron observados bajo una variedad de condiciones experimentales.

Tabla 8.2 Resumen de indicadores de rendimiento de lechos de lodos con plantas en diferentes países del mundo

País	Tasa de Carga de Lodos (kg TS/m ² /año)	% de reducción de sólidos y agua	% de reducción de nutrientes y orgánicos	Otras medidas	Planta sembrada	Fuente
Francia ¹	≈ 70	85% (TS)	70% (DQO) 79% (TKN) 66% (NH ₄ -N)		<i>Phragmites australis</i>	Lienard y Payrastre, 1996
EE.UU. ¹	9,8-65	99% (TS)	95% (DQO) 90% (TKN) 42% (NH ₄ -N)		<i>Phragmites australis</i>	Burgoon <i>et al.</i> , 1996
EE.UU. ¹	16-106	46-49% (TVS) 15-47% (TS)			<i>Phragmites australis</i>	Kim y Smith, 1997
Polonia ¹	-	94,6% (vol.), 43-65% (H ₂ O)			<i>Phragmites australis</i>	Obarska-Pempkowiak <i>et al.</i> , 2003
Tailandia ²	250	74-86% (TS) 96-99% (SS) 20-25% (MS luego de 4 años)	78-99% (DQO) 70-99% (TKN) 50-99% (NH ₃)	< 6 huevos viables de helmintos/g TS	<i>Typha angustifolia</i>	Koottatep <i>et al.</i> , 2005
Camerún ²	200	70,6-99,9% (TS) 78,5-99,9% (SS) 30% (MS de los lodos secados)	73,4-99,9% (DQO) 69,2-99,3% (TKN) 50-99% (NH ₃)	100% (huevos de helmintos)	<i>Echinochloa pyramidalis</i>	Kengne <i>et al.</i> , 2009
Senegal ²	200	97% (TS) 99% (SS)	99% (DQO) 91% (NH ₄ ⁺) 97% (PO ₄ ³⁻)		<i>Echinochloa pyramidalis</i>	Tetede, 2009

¹ Lodos de aguas servidas

² Lodos fecales

8.5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

A pesar de los éxitos de LSP en Europa y experimentos con LF en países de bajos ingresos, los LSP para el tratamiento de LF están todavía en una fase temprana de desarrollo y ha habido poca investigación en estaciones de tratamiento a escala completa. Pocos han recibido adecuado seguimiento durante suficiente tiempo para poder determinar pautas definitivas para el diseño y la construcción. Ciertas incertidumbres no podrán aclararse hasta realizar mayores investigaciones y compilar mayores experiencias operativas. Sin embargo, existe un consenso que el diseño para los LF debería replicar el de tratamiento de lodos de aguas servidas.

Los costos constructivos de LSP son menores que los de las tecnologías convencionales de tratamiento de lodos y los LSP requieren menos espacios que las lagunas de estabilización. Aunque la tecnología de los LSP es mecánicamente sencilla (con pocas piezas móviles), requiere cuidados en su diseño, construcción y

Tabla. 8.3 Consideraciones generales para el diseño de lechos de secado con plantas (adaptado de Davis, 1995).

Factor	Parámetros a considerar	Comentarios
Selección del sitio	Uso de la tierra y acceso	<ul style="list-style-type: none"> Ubicación central para minimizar la distancia de transporte Ubicación alejada de residencias para evitar quejas respecto a olores, insectos o ruido. Acceso adecuado para camiones.
	Disponibilidad de terreno	<ul style="list-style-type: none"> Extensión suficiente para los requerimientos actuales y futuros.
	Topografía	<ul style="list-style-type: none"> En lo posible, seleccionar un sitio que permite flujo por gravedad para reducir los costos y energía de bombeo.
Estructura	Celdas	<ul style="list-style-type: none"> Excavar hoyos en la tierra y/o formar diques de tierra alrededor de las celdas para crear la profundidad necesaria. La altura del dique encima de la arena debe ser suficiente para la acumulación de lodos durante 3 a 4 años, entonces se recomienda generalmente de 1,5 a 2 m. Se recomienda construir algunas celdas, para poder descargar en una mientras las otras estén en reposo. Se pueden ubicar diques entre las celdas. El fondo debe tener una leve pendiente (1 a 3 %). Es bueno dejar algo de espacio entre las celdas para maquinaria y actividades de mantenimiento (p.ej., cosecha de plantas, extracción de lodos secos, etc.).
	Forros	<ul style="list-style-type: none"> Los fondos de las celdas deben ser sellados para prevenir la contaminación o intrusión de aguas subterráneas. Es preferible usar forros sintéticos (geomembranas), pero la arcilla compactada también funciona.
Estructuras de flujo	Entrada	<ul style="list-style-type: none"> Estas estructuras deben ser sencillas y fáciles de ajustar. Es común aplicar canales o tubos con puertas.
	Salida	<ul style="list-style-type: none"> Es importante instalar un rebosadero, aliviadero, compuerta o tubo ascendente que sea ajustable en su altura para retener agua dentro de cada celda en tiempos de sequía para prevenir la mortandad de las plantas.
Vida útil		<ul style="list-style-type: none"> La vida operativa de los lechos está determinada por la tasa de carga, la tasa de estabilización y el número de lechos. Este último debe calcularse basándose en la cantidad de lodos por tratarse.
Clima		<ul style="list-style-type: none"> Puede hacer falta retener agua en los lechos para evitar los efectos negativos de las sequías y altas temperaturas sobre las plantas (véase "Salidas"). Es recomendable incrementar el tiempo entre dos cargas consecutivas (periodo de reposo) cuando llueva excesivamente.
Medio filtrante		<ul style="list-style-type: none"> Puede incluir arena, grava (piedras de 5 a 75 mm) u otro sustrato grueso. La capa superior debe tener un coeficiente de uniformidad mayor a 3,5 para prevenir una obstrucción precoz. Esto se puede lograr al cernir o lavar las partículas finas no deseadas Es conveniente una pequeña mezcla de tierra o materia orgánica para fomentar el crecimiento inicial de las plantas. Es necesario mantener el lecho húmedo, pero no inundado, hasta que germinen las semillas o los fragmentos de rizomas produzcan nuevos brotes.
Vegetación		<ul style="list-style-type: none"> Se deben elegir especies de plantas acuáticas nativas (no invasoras), comprobadas que se desarrollan bien en los LF. Es importante seleccionar materia vegetativa sin señales de ataque de nematodos. Es preferible sembrar y cosechar en la época lluviosa para facilitar el crecimiento.
Ventilación		<ul style="list-style-type: none"> Es factible lograr más flujo de aire y mejores condiciones hidráulicas al utilizar bloques vacíos o tubos de ventilación.*
Sistema de alimentación		<ul style="list-style-type: none"> Una distribución uniforme de los lodos (preferiblemente desde el centro del lecho) evita el crecimiento desigual de las plantas y la formación de 'zonas muertas'. La alimentación o carga debe realizarse de una a tres veces por semana, según la época del año.

* Se ha determinado por medio de estudios comparativos que los tubos de aeración (tubos perforados de PVC ubicados verticalmente para conducir más aire entre las capas de lodos) no mejoran directamente al proceso de separación del agua, aunque fomentan el crecimiento de las plantas que realizan mayor evapotranspiración (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012a). Por lo tanto, se pueden incluir estas columnas de PVC en un diseño de LSP, pero no son necesarias.

Caso de Estudio 8.3: Diseño y construcción de un lecho de secado con plantas en Tailandia

En 1996, el Instituto Asiático de Tecnología (AIT, por sus siglas en inglés), en colaboración con SANDEC/EAWAG, construyó unos LSP a escala piloto para tratar los LF de Bangkok. Este sistema de tratamiento consistió en las siguientes unidades: (1) un tamiz para retener materiales gruesos; (2) un tanque para mezclar los lodos de diferentes fuentes y así lograr un grado de homogenización de los lodos; (3) tres LSP; (4) una laguna de estabilización de desechos; y (5) un filtro de arena con plantas de flujo vertical para pulir el lixiviado. Cada LSP midió 5 x 5 m en la superficie de la arena (6,2 x 6,2 m en el filo superior de los diques), con un revestimiento de ferrocemento.

Se diseñó la profundidad del medio filtrante en los 65 cm para prevenir la penetración de los rizomas y raíces de *Anea* en el fondo, ya que extienden normalmente solo 30 a 40 cm. El medio filtrante de cada LSP consistió en una capa de 10 cm de arena fina en la superficie, seguida por 15 cm de grava fina, y 45 cm de grava gruesa en el fondo. El dique extendía un metro encima de la arena para la acumulación de los lodos. Se sembró *Anea Estrecha* (*Typha angustifolia*), recolectada en un humedal natural cercano, en la capa de arena de cada lecho, a una densidad de 8 brotes/m². El sistema de drenaje en el fondo fue hecho en el fondo, debajo del medio filtrante, con bloques vacíos de concreto (cada uno de 20 x 40 x 16 cm) y tubos perforados de PVC (20 cm de diámetro). Unos tubos del mismo diámetro fueron colocados sobre la red de drenaje, en forma vertical extendiéndose un metro sobre el lecho para la de ventilación, para aprovechar las corrientes naturales del aire, incrementar la oxigenación de los lodos y disminuir las condiciones anaeróbicas. El lixiviado de cada LSP se recolectaba en un tanque de concreto (3m³) para muestreo y análisis.



Figura 8.4 Lecho de secado con plantas a escala piloto, hecho por el Instituto Asiático de Tecnología (AIT), en el cual se observan los tubos de ventilación, pero no se ven plantas, ya que no estaba en uso (foto: Linda Strande).

Tabla 8.4 Resumen de los parámetros de diseño para los lechos de secado con plantas para tratar lodos fecales en Tailandia.

Componente	Detalles
Pendiente del fondo	1 a 3 %
Pendiente de los diques	50 a 100 %
Sistema de drenaje	Grava gruesa, bloques vacíos de concreto o tubos perforados
Ventilación	Tubos de PVC conectados al sistema de drenaje
Medio filtrante	10 cm de arena (1 mm diámetro) encima 15 cm de grava fina (2 cm diámetro) en el medio 45 cm de grava gruesa (5 cm diámetro) en el fondo
Vegetación	Anea Estrecha (<i>Typha angustifolia</i>)
Altura de los diques encima de la arena (francobordo)	1,0 m
Sistema de alimentación	Distribución uniforme (desde el centro del lecho)
Pretratamiento	Tamiz de barras gruesas

aclimatación para lograr resultados adecuados. La experiencia con los LSP existentes permite resaltar algunas consideraciones que deben ser tomadas en cuenta (Tabla 8.3). El Caso de Estudio 8.3 presenta un ejemplo del diseño de un LSP.

8.6 OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

Como con cualquier tecnología de tratamiento, operación y mantenimiento correctos son imprescindibles para un rendimiento óptimo y una larga vida útil. En general, un ciclo operativo consiste en una fase inicial con cargas pequeñas para permitir la adaptación de las plantas, seguida por cargas de acuerdo con la tasa del diseño, con periódicas cosechas de las plantas y excavaciones de los lodos secos. Estos aspectos serán detallados en las siguientes secciones.

8.6.1 Comisionado y puesta en marcha

Los LSP son técnicamente sencillos pero biológicamente complejos. Por lo tanto, en el inicio de la operación es necesario manejarlos cuidadosamente para asegurar que las plantas tengan el tiempo necesario para adaptarse a vivir en las condiciones de LF concentrados. Durante esta puesta en marcha, los lechos deben ser regados con aguas servidas no tratadas o LF diluidas. En un caso, se inició la operación de un LSP con dos descargas de 25 mm al mes con estiércol de chanchos diluido, durante los primeros 8 meses, a fin de permitir la adaptación de las plantas. Esta baja tasa de carga inicial (3 kg TS/m²/año) fue suficiente para prepararlas para el régimen normal de lodos (Edwards *et al.*, 2001). También es recomendable sembrar las plantas en la época lluviosa para fomentar el desarrollo inicial de las plantas. Dependiendo de las condiciones operativas y climáticas, puede ser necesaria una fase inicial con pocos lodos diluidos, durante varios meses o un año, antes de realizar las descargas al lecho con las tasas previstas en el diseño. En promedio, se recomienda una fase inicial de 6 meses (Kengne *et al.*, 2011). Se ha observado que las Aneas son más sensibles que los Carrizos durante la fase inicial y pueden requerir más tiempo de adaptación antes de poder resistir las cargas completas. Sin embargo, 2 a 3 meses fueron suficientes en el Caso de Estudio 8.3 (Stefanakis y Tsihrantzis, 2012a). Otro factor importante es la densidad de siembra de las plantas, la que puede variar entre 4 y 12 plantas/m² (Edwards *et al.*, 2001). Se deben seleccionar únicamente material vegetativo para la siembra (p.ej., brotes, estacas) que esté vigoroso y libre de parásitos con el fin de asegurar que las plantas sobrevivan y prosperen. A medida que las plantas se desarrollen y aumenten su densidad, la evapotranspiración será mayor (Stefanakis y Tsihrantzis, 2012a). El Caso de Estudio 8.4 presenta dos ejemplos de las condiciones de la puesta en marcha en África Occidental.

Caso de Estudio 8.4: Puesta en marcha de lechos de secado con plantas en África Occidental (Adaptado de SANDEC/EAWAG, 2009)

En Camerún, se colocaron brotes jóvenes o secciones de tallo (con al menos un nudo) de *E. pyramidalis* o fragmentos de rizoma de *C. papyrus* (con un peso fresco entre 300 y 350 g) en el medio filtrante saturado con aguas servidas domésticas no tratadas, durante 6 semanas antes de la aplicación de LF. Durante los siguientes 6 meses, se incrementó paulatinamente la concentración de los LF, hasta alcanzar la tasa completa de carga de 100 a 200 kg TS/m²/año (Kengne *et al.*, 2011). La densidad de las plantas antes de la aplicación de lodos fue de 11 brotes/m² para *E. pyramidalis* y 9 rizomas/m² (con 1 a 4 brotes/rizoma) para *C. papyrus*.

En Senegal, la fase inicial de un LSP a escala completa, con *E. pyramidalis*, tardó 4 meses, durante los cuales los lechos fueron regados con el efluente líquido de un tanque de sedimentación y espesamiento de LF. Luego, los LSP recibieron LF en concentraciones entre 13 y 235 kg/m²/año. Al inicio, las densidades de las plantas variaban entre 9 y 12 brotes/m².

8.6.2 Tasas de carga y acumulación de lodos

Antes de cargar los lodos en los lechos, deberían ser descargados desde los camiones tanqueros en tanques de almacenamiento y homogenización que cuentan con rejillas o tamices de barras para retener material grueso y basura, con el fin de prevenir la obstrucción de tubos y lechos. Este tanque también sirve para regular e igualar el flujo de lodos hacia el lecho. Debe haber siempre algún tipo de unidad de almacenamiento y mezclado antes de su colocación sobre los lechos.

Los datos sobre LSP que operan a las tasas de carga nominales varían según su extensión y resaltan la influencia del clima sobre los parámetros operativos. En general, las condiciones cálidas y secas que incrementan la evapotranspiración permiten mayores tasas de carga de los lodos. En Europa, las tasas de carga con lodos de aguas servidas han sido generalmente bajas (< 80 kg/m²/año) y en los países tropicales las tasas de carga con LF pueden ser casi tres veces mayor. Por ejemplo, una serie de experimentos de AIT en Tailandia demostró que un



Figura 8.5 Tanque de almacenamiento y mezclado en Senegal, con un tamiz de barras para prevenir el ingreso de basura que podría atascarse en los equipos (foto: Linda Strande).

LSP con Aneas operaba adecuadamente con hasta 250 kg/m²/año de LF (Koottatep *et al.*, 2005). Asimismo, en Senegal, unos LSP con *E. pyramidalis* funcionaron bien con cargas de LF hasta de 235 kg/m²/año. En Camerún, se demostró que a escala de patio los LSP pueden funcionar eficientemente con hasta 100 kg/m²/año con *C. papyrus* y hasta 200 kg/m²/año con *E. pyramidalis*. Sin embargo, los intentos de incrementar la tasa de carga hasta 300 kg/m²/año ocasionaron taponamientos severos de los lechos (Kengne *et al.*, 2011). Entre 1996 y 2003, AIT operó LSP experimentales en Tailandia y monitoreó la concentración de sólidos en los lodos secos y en los lixiviados (Tabla 8.5).

Es interesante remarcar que aproximadamente un 47 % de los sólidos se retiene en los lodos secos, un 12 % sale en los lixiviados y un 41 % es ‘no contabilizado’, en otras palabras ‘se pierde’ por medio de la mineralización o la sorción sobre o dentro del medio filtrante. Estos resultados resaltan la necesidad de regeneración del medio filtrante y la importancia de continuar el tratamiento de los lixiviados, debido a su alta concentración de sólidos (entre otras cosas).

8.6.3 Frecuencia de carga y fases de reposo

La colocación de LF en el LSP siempre debe ser intermitente, con una frecuencia que varía de sitio en sitio. Se ponen los lodos normalmente de una a tres veces por semana, por medio de válvulas, bombas o sifones instalados en el tanque de igualación o homogenización (lo que es preferible a descargas directas desde los camiones de recolección). Una vez colocada una capa de lodos, se permite que el lecho se drene completamente, con la salida de lixiviados y su reemplazo por aire nuevamente en los espacios entre las partículas del medio filtrante. La siguiente capa sella, en efecto, estas pequeñas bolsas de aire adentro. Cuando esto sucede, el oxígeno, que es fundamental para el proceso de nitrificación, se agota rápidamente (Kadlec y Wallace, 2009). Por lo tanto, el tiempo de reposo entre sucesivas cargas es muy importante, ya que previene la obstrucción biológica y permite que los poros se llenen de nuevo con oxígeno (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012a).

Sin embargo, al incrementar el periodo de reposo, se incrementa el número de LSP necesario para tratar un volumen dado de lodos. Basándose en una ecuación semiempírica, se determinó que para maximizar la separación de agua y minimizar los costos, 11 días sería el óptimo plazo entre cargas (Giraldi e Iannelli, 2009). Esto concuerda con la práctica reportada de esperar de una a tres semanas (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012a).

Tabla 8.5 Un balance de masas del Total de Sólidos de lodos fecales de tanques sépticos en lechos de secado con plantas, luego de 300 días de operación (adaptado de Koottatep y Surinkul *et al.*, 2004)

	Unidad #1		Unidad #2		Unidad #3		Promedio
	(kg TS/m ²)	(%)	(kg TS/m ²)	(%)	(kg TS/m ²)	(%)	(%)
Lodos fecales	187	100	115	100	112	100	100
Lodos secos	93	50	60	52	43	38	47
Lixiviados	20	11	14	12	13	12	12
‘No contabilizado’	74	39	41	36	56	50	41

8.6.4 Cosecha y rebrote de las plantas

Como se mencionó en la Sección 8.5.2, un beneficio de los LSP es que las plantas acuáticas pueden ser cosechadas para algún uso final productivo (y detallado en el Capítulo 10). Las plantas acuáticas en LSP generan dos o tres veces la biomasa que producen humedales naturales, debido a la disponibilidad de nutrientes, especialmente nitrógeno y fósforo (Warman y Termeer, 2005). En general, se realizan estas cosechas con un ritmo establecido (p.ej., al momento de excavar los lodos secos), pero puede corresponder a otras situaciones, como la venta de plantas (p.ej., para forraje) o el control de insectos (Altieri y Nicholls, 2003; Pimental y Warneke, 1989). Los insectos pueden hacer mucho daño a las plantas, en especial cuando estas son de tamaño grande o se encuentran en monocultivos densos, de modo que a veces es conveniente cortar las plantas viejas y permitir el crecimiento de brotes nuevos y vigorosos. *E. pyramidalis* es muy cotizado como forraje en algunas regiones y puede ser cosechado hasta tres veces al año (Kengne *et al.*, 2008).

Actualmente, la cosecha es manual, ya que la mayoría de los LSP son de escala experimental o piloto. Se aplicarán probablemente métodos mecánicos cuando los LSP son operados a escala completa. Al cosechar las plantas, se debe cortarlas cerca de la superficie (no arrancarlas de la raíz), para prevenir daños al filtro y a los rizomas y raíces, de donde saldrán nuevos brotes.

8.6.5 Extracción de lodos secos

Es importante determinar la tasa de carga que sea óptima para la operación y mantenimiento de un LSP, para asegurar que la capa de lodos no llegue a ser demasiado gruesa, como para requerir su excavación antes de que se haya drenado completamente. A una escala experimental, se definió que una tasa de carga de 100 kg TS/m²/año ocasiona la acumulación de unos 30 a 40 cm/año de lodos, comparada con 50 a 70 cm/año con una carga de 200 kg TS/m²/año. Para los LSP con diques que se extienden de 1,5 a 2 m encima de la arena, esto daría para una operación de 3 a 5 años antes de tener que excavar los lodos secos (Kengne *et al.*, 2011). Antes de su extracción, los lodos deben permanecer durante varios meses sin lodos adicionales, para una mayor reducción de humedad y patógenos. Por ejemplo, se logró un gran aumento en el contenido de materia seca, de 25 a 43 %, al dejar LSP a escala piloto en Camerún reposar durante un mes antes de excavar los lodos y la concentración de huevos de helmintos (*Ascaris*) se redujo a menos de 4 huevos viables/g TS de 79 huevos/g TS y una viabilidad del 67 % (Kengne *et al.*, 2009b).

En la actualidad, se realiza la excavación de los lodos en forma manual, aunque se podrá utilizar maquinaria a futuro. Según el cuidado aplicado en esta excavación, puede hacer falta reconstituir el medio filtrante del lecho, al aumentar o reemplazar la capa superior de arena o grava fina, o, a veces, reemplazarlo por completo.

8.6.6 Lixiviados

Los lixiviados son los líquidos que filtran a través de los lodos y el medio filtrante, los cuales deben ser recolectados y tratados antes de su descarga en el ambiente. Sin embargo, también pueden ser utilizados para el riego de cultivos o en la acuicultura (detallados en el Capítulo 10). Si el LSP está ubicado cerca de una EDAR, los lixiviados pueden ser tratados juntos con las aguas servidas. Otras opciones incluyen tecnologías descentralizadas, como lagunas de estabilización (Capítulo 5; Strauss *et al.*, 1997). La medición de las características de los lixiviados a lo largo del tiempo demuestra que la mayoría de los parámetros (como DQO, PO₄³⁻, TSS, VSS) suben después de cada carga de lodos y luego bajan otra vez rápidamente, lo que indica que se trate de un fenómeno de 'lavado' o bien que los mecanismos de tratamiento en estos lechos son muy dinámicos. Un estudio llevado a cabo con lodos de una EDAR demostró una reducción de 80 % en DQO (desde 2.500 mg/L) durante los primeros 10 minutos después de una carga y más del 92 % en dos días. Además, las concentraciones iniciales de amoníaco, que estaban por encima de 350 mg/L, se disminuyeron un 90 % en los primeros 10 minutos. Esta disminución estuvo acompañada por un aumento en la concentración de nitratos, lo que indica un veloz proceso de nitrificación (Stefanakakis y Tsihrintzis, 2012a). Una investigación del AIT demostró que aproximadamente un 12 % de los sólidos permanece en los lixiviados (Tabla 8.5). La misma investigación en lechos paralelos también demostró que un 45 % del líquido de los LF sale en los lixiviados (mientras un 5 % permanece en los lodos y un 50 % va al aire a través de la evapotranspiración). Además, los lixiviados contenían solo un 5 % del nitrógeno, con la mayor parte (82 %) asimilada por las plantas y un porcentaje menor (13 %) que se queda en los lodos (Koottatep y Surinkul, 2004). En general, los lixiviados solo drenan de un LSP durante uno o dos días después de una carga. La producción de lixiviados es altamente variable y se debe diseñar del tratamiento subsiguiente de estos líquidos tomando muy en cuenta los cambios bruscos e intermitencia de este flujo.

8.6.7 Factores que influyen en el rendimiento

Las principales causas de un rendimiento operativo inadecuado incluyen: lechos mal contruidos; inadecuadas conexiones capilares; un número insuficiente de lechos; una extensión total demasiado pequeña; o excesivas cargas durante la puesta en marcha y en la operación normal (Nielson, 2005). También se ha comentado sobre los siguientes factores como causantes de taponamiento: sedimentación de partículas; una película biológica que crece demasiado rápido; precipitación química; formación de sales; y el desarrollo excesivamente denso de las raíces. Se debe diseñar el horario de cargas para evitar que la capa de lodos se acumule demasiado

rápidamente, puesto que esto puede inhibir el crecimiento de las plantas. La Tabla 8.6 presenta un resumen de los parámetros sugeridos para los LSP, junto con un listado de los aspectos operativos para tomar en cuenta.

8.7 COSTOS Y BENEFICIOS

Uno de los aspectos más atractivos de los LSP, comparados con otras tecnologías de tratamiento de lodos, es el hecho de que tiene costos bajos de inversión inicial, operación, mantenimiento, supervisión y energía (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012a). Los LSP no requieren floculantes químicos, centrífugas, ni prensas de cinta coladora (Edwards *et al.*, 2001). Sin embargo, pueden costar más que los lechos de secado sin plantas, tanto en la inversión (p.ej., la compra de las plantas) como en la operación (p.ej., cosecha de las plantas, deshierbe, control de vectores), pero tienen la ventaja de requerir menos frecuente extracción de los lodos (p.ej., después de varios años, comparado con cada dos o tres semanas).

Tabla 8.6 Parámetros operativos para un lecho de secado con plantas

Componente de tratamiento	Detalles	Comentarios
Carga	60 a 250 kg TS/m ² /año	Depende de la fuente y las condiciones de los LF.
Frecuencia de alimentación	1 a 3 veces por semana	Depende de las condiciones climáticas, el porcentaje de materia seca en los lodos y la especie de planta.
Periodo de reposo	De 2 días a varias semanas	Depende de las condiciones climáticas, el porcentaje de materia seca en los lodos y la especie de planta.
Adaptación de las plantas	Puesta en marcha con 4 a 12 brotes/m ² Comenzar con aguas servidas domésticas y agregar LF paulatinamente hasta que las plantas tengan una altura de 1 m	Se recomienda realizar la puesta en marcha en la época lluviosa.
Cosecha de las plantas	Hasta 3 veces por año, después de varios años de operación, o durante la extracción de lodos secos.	Depende de la especie de planta, su crecimiento y la necesidad de generar ingresos (en especial en el caso de <i>Echinochloa pyramidalis</i>).

En Italia, se estudiaron los costos de construcción y operación de unos LSP para tratar los lodos generados en el tratamiento de aguas servidas. Aunque no sean necesariamente representativos para todos los países, los resultados son muy útiles. Se estimaron los costos de construcción, incluyendo la mano de obra y la compra de las plantas, en US\$ 350/m² y los costos operativos, incluyendo la cosecha de las plantas y el transporte y disposición de los lodos secos, en US\$ 180/m²/año (Giraldi e Iannelli, 2009). Con una tasa de producción de lodos del tratamiento primario de aguas servidas de 16 kg TS/persona/año y suponiendo tasas de carga entre 30 y 75 kg TS/m²/año, estos LSP podrían tratar los lodos de 1,7 a 4 personas por m² (Stefanakis y Tsihrintzis, 2012a). Dado que una gran proporción del presupuesto operativo se asocia con el transporte (p.ej., transporte al sitio de disposición o uso final), los costos locales de transporte contribuyen considerablemente al total. Además, los costos de construcción varían mucho según la disponibilidad y tarifas de mano de obra y materiales locales (Giraldi e Iannelli, 2009).

8.8 Ejercicio

Para demostrar los cálculos necesarios para diseñar y construir un LSP, se ofrece un ejercicio de un ejemplo práctico a continuación y algunos insumos para estos cálculos en la Tabla 8.7.

8.8.1 Pregunta

Luego de llevar a cabo un estudio preliminar, una municipalidad decide diseñar un LSP para la separación del agua de LF con las siguientes características:

Volumen estimado anual de LF: 5.000 m³/año
Contenido promedio de TS en los LF sin tratar: 30.000 mg/L (=30 kg/m³)

Basándonos en esto, determinemos el total de sólidos en los LF del año:
5.000 m³/año x 30 kg TS/m³ = 150.000 kg TS/año

Elijamos una tasa de carga de 200 kg TS/m²/año y ahora podemos calcular la extensión necesaria para los LSP:

150.000 kg TS/año / 200 kg TS/m²/año = 750 m²

Esta extensión puede dividirse entre varios lechos, según la topografía del sitio y para permitir sus respectivos periodos de reposo. Suponiendo que la topografía del sitio sea uniforme, se podría construir 5 lechos de 150 m² cada uno. Habrá que contemplar también espacios adicionales para el tamiz, los tanques de igualación, tanques para los lixiviados y el parqueo de los camiones tanqueros, lo que suma mínimamente un 20 % de la extensión calculada.

Tabla 8.7 Parámetros sugeridos del diseño de lechos de secado con plantas para la separación del agua de lodos fecales (LF)

Parámetro	Rango sugerido	Unidades
Tasa de producción de LF	1,5	L/persona/día
Contenido de TS	30	mg/L
Tasa de carga de sólidos	200	kg TS/m ² /año
Frecuencia de aplicación de LF	1 a 2	veces por semana

8.9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los LSP constituyen una tecnología relativamente nueva para el tratamiento de los LF de tanques sépticos y otras tecnologías descentralizadas de saneamiento en los países de bajos o medianos ingresos. La amplia experiencia en Europa y EE.UU. ha generado resultados muy sólidos, pero no completamente aplicables a los LF, debido a diferencias en tipos y diluciones de los lodos y en las condiciones climáticas. Actualmente, se están investigando muchos LSP a escalas experimental y piloto en varias partes del mundo, en particular en climas tropicales, donde la radiación solar y la evapotranspiración son altas. Desde hace mucho tiempo, los LSP han sido conocidos como una tecnología confiable para el tratamiento de los lodos de aguas servidas, pero se han vuelto recientemente más atractivos para MLF en las ciudades de rápido crecimiento en los países de bajos y medianos ingresos, ya que son menos costosos para construir que las tecnologías convencionales para el tratamiento de los lodos de aguas servidas. Además, pueden ser construidos con materiales y mano de obra locales y requieren poco mantenimiento, poco o nada de químicos y mínima energía para su operación exitosa. Aunque las plantas acuáticas tardan un tiempo para adaptarse a estos lodos tan ricos en nutrientes, un LSP puede funcionar durante hasta 10 años sin necesidad de excavar los lodos secos y las plantas pueden ser cosechadas para usos productivos. Los lodos secos y estabilizados también podrán ser utilizados como fertilizante orgánico y enmienda de los suelos.

Sin embargo, los LSP requieren un amplio espacio (0,25 a 1,0 m²/persona) y, por lo tanto, no son tan convenientes en los centros urbanos densamente poblados. Además, los lechos deben contar con acceso para los camiones tanqueros que transportan los lodos y, por eso, deben construirse cerca de un camino que sea transitable para este tipo de camión. Por más que sean resistentes, las plantas acuáticas pueden ser atacadas por insectos y otros parásitos; entonces, requieren de un mantenimiento diligente, aunque no constante. En los últimos años, se ha realizado mucha investigación para determinar los parámetros óptimos para el diseño y la operación de los LSP que sean los más robustos posibles. Sin embargo, hay todavía preguntas sin respuestas, como las siguientes:

- ¿Cómo influye la frecuencia de alimentación en el rendimiento de los LSP?
- ¿Qué vulnerabilidades y resistencias tienen las plantas acuáticas frente a ataques de insectos?
- ¿Qué efectos tienen el amoníaco y la alta conductividad?
- ¿Qué métodos son los más eficientes para el tratamiento de los lixiviados?
- ¿Cómo es la eficiencia de los LSP a largo plazo, después de los 10 años? y
- ¿Cómo saldría un análisis completo de los costos y beneficios de los LSP?

Cada uno de estos aspectos debe ser investigado bajo diferentes tasas de carga, con diferentes tipos de LF y bajo diferentes condiciones climáticas. Por más que sea importante la investigación, la promoción de los LSP y su aplicación a escala completa, donde sea factible y apropiado, deben gozar de mayor prioridad. No es el momento para perder tiempo en el perfeccionamiento de esta tecnología, sino para seguir aumentando nuestros conocimientos al aplicarlos y difundir lo que aprendamos a medida que se acumule.

8.10 BIBLIOGRAFÍA

- Altieri, M. A., Nicholls, C. I. (2003). Soil fertility management and insect pests: harmonizing soil and plant health in agroecosystems. *Soil and Tillage Research* 72(2), p.203-211.
- Bialowiec, A., Wojnowska-Baryla, I., Agopsowicz, M. (2007). The efficiency of evapotranspiration of landfill leachate in the soil-plant system with willow *Salix amygdalina* L. *Ecological Engineering* 30(4), p.356-361.
- Breen, P. F. (1997). The performance of vertical flow experimental wetland under a range of operational formats and environmental conditions. *Water Science and Technology* 35(5), p.167-174.
- Brix, H. (1994). Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology* 29(4), p.71-78.
- Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology* 35(5), p.11-17.
- Chen, W., Chen, Z., He, Q., Wang, X., Wang, C., Chen, D. (2007). Root growth of wetland plants with different root types. *Acta Ecologica Sinica* 27(2), p.450-457.
- Clarke, E., Baldwin, A. H. (2002). Responses of wetland plants to ammonia and water level. *Ecological Engineering* 18(3), p.257-264.
- Davis, L. (1995). A handbook of constructed wetlands: A guide to creating wetlands for--agricultural wastewater, domestic wastewater, coal mine drainage, stormwater in the Mid-Atlantic Region. Vol 1. General considerations (Vol. 1). Washington, DC: USDA-NRCS, EPA Region III.
- De Maeseneer, J. L. (1997). Constructed wetlands for sludge dewatering. *Water Science and Technology*, 35(5), 279-285.
- EAWAG/SANDEC. (2009). Recueil des résultats de recherche sur la gestion des boues de vidange du projet de collaboration ONAS-EAWAG/SANDEC- Phase I, 2006-2009. Dakar: EAWAG/SANDEC.
- Edwards, J. K., Gray, K. R., Cooper, D. J., Biddlestone, A. J., Willoughby, N. (2001). Reed bed dewatering of agricultural sludges and slurries. *Water, Science and Technology* 44(10-11), p.551-558.
- Gagnon, V., Chazarenc, F., Comeau, Y., Brisson, J. (2007). Influence of macrophytes species on microbial density and activity in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 56(3), 249-254.
- Giraldi, D., Iannelli, R. (2009). Short-term water content analysis for the optimization of sludge dewatering in dedicated constructed wetlands (reed bed systems). *Desalination* 246(1-3), p.92-99.