



CAPÍTULO 4



SANEAMIENTO

DE LODOS Y BIOSÓLIDOS



DOI: <https://doi.org/10.24267/9789585120136.4>



MIGUEL MANSUR AISSE

Ingeniero civil de la Universidad Federal de Paraná (UFPR). Maestro en Hidráulica y Saneamiento de la Escuela de Ingeniería de San Carlos (USP). Doctor en Ingeniería Civil de la Escuela Politécnica (EP USP). Profesor del Programa de Posgrado en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambiental (PPGERHA) da Universidad Federal de Paraná (UFPR), Brasil. E-mail: miguel.dhs@ufpr.br.

RAQUEL PINHEIRO POMPEO

Ingeniera Química de la Universidad Federal de Paraná-UFPR. Maestría y Doctorado en Ingeniería de Recursos Hídricos de la UFPR. Consultora en temas relacionados con Ingeniería Ambiental.
E-mail: raquelpompeo@gmail.com



4.1 TRATAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DE LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Miguel Mansur Aisse

Para utilizar los biosólidos es necesario disminuir su carga contaminante, especialmente en lo referente a los patógenos contenidos en ellos; entre los tratamientos más comunes se encuentran el compostaje, la estabilización alcalina y el tratamiento térmico.

La Norma 503 de la Agencia de Protección Ambiental establece que los sólidos de las aguas residuales sean procesados antes de ser aplicados o incorporados al terreno. Este proceso, denominado "estabilización", ayuda a minimizar la generación de olores, destruir los agentes patógenos y reducir las probabilidades de atracción de vectores. Existen diversos métodos para la estabilización de los sólidos de las aguas residuales, incluyendo el ajuste del pH o la estabilización alcalina, la digestión, el compostaje y el secado térmico (USEPA,1993).

La selección de los métodos de estabilización depende de las características químicas de los lodos, las condiciones para su disposición final y su posible utilización (Mahamud et al., 1996a). La Tabla 4.1 muestra los diferentes tratamientos para mejorar la calidad microbiológica de los biosólidos y algunas características para ser usados en agricultura.

Tabla 4.1 Métodos de estabilización de biosólidos, efecto en el biosólidos y en la aplicación al suelo

Procesos de tratamiento y definición	Efecto en los biosólidos	Efecto en las prácticas de aplicación al suelo
Espeamiento: baja fuerza de separación de agua y sólidos; mediante gravedad, flotación o centrifugación.	Aumenta el contenido de sólidos mediante la eliminación de agua.	Reduce los costos de transporte.

Procesos de tratamiento y definición	Efecto en los biosólidos	Efecto en las prácticas de aplicación al suelo
<p>Digestión (Aeróbico/Anaeróbico): Estabilización biológica, mediante la conversión de la materia orgánica en dióxido de carbono, agua y metano.</p>	<p>Reduce el contenido biodegradable (estabilización), por la conversión de materiales solubles y gas. Reduce los niveles de patógenos y olor.</p>	<p>Reduce la cantidad de biosólidos y los costos de transporte. Reduce el olor y el potencial de atracción de vectores durante la aplicación.</p>
<p>Estabilización alcalina: estabilización mediante la adición de materiales alcalinos, como cal hidratada.</p>	<p>Eleva el pH. Temporalmente disminuye la actividad biológica. Reduce los niveles de patógenos y controles de olor.</p>	<p>Reduce el contenido de nitrógeno en los biosólidos. Pueden además, tener algún valor como material de encalado.</p>
<p>Acondicionamiento: procesos que causan la coagulación en los biosólidos y ayudan en la separación del agua.</p>	<p>Mejora la característica de deshidratación de lodos. Puede aumentar la masa de sólidos secos y mejorar la estabilización.</p>	<p>El tratamiento de biosólidos con polímeros puede requerir consideraciones especiales de operación en los sitios de aplicación.</p>
<p>Deshidratación: alta fuerza de separación de agua y sólidos. Los métodos incluyen filtros de vacío, máquinas centrifugadoras, filtros de prensa y correas, entre otros.</p>	<p>Aumenta la concentración de sólidos de 15 % a 45 %. Reduce el nitrógeno y las concentraciones de potasio. Mejora la facilidad de manejo.</p>	<p>Puede reducir el valor nutritivo y los requerimientos del suelo. Reduce los costos de transporte.</p>
<p>Compostaje: estabilización aeróbica, termófila y biológica en hileras de pila estática, aireada o recipiente.</p>	<p>Disminuye la actividad biológica, destruye los patógenos y los convierte en precursores húmicos como material de aprovechamiento.</p>	<p>El material tiene excelentes propiedades de acondicionador de suelos. Contiene menos nitrógeno disponible para las plantas que otros tipos de biosólidos. Aumenta los costos de transporte.</p>
<p>Secado por calor: uso de calor para matar los agentes patógenos y eliminar la mayor parte del contenido de agua.</p>	<p>Desinfecta los lodos, destruye la mayoría de patógenos y reduce los olores y la actividad biológica.</p>	<p>Reduce considerablemente el volumen de biosólidos. Puede reducir el contenido de nitrógeno.</p>

Fuente: Jacobs y McCreary, (2001).

Dentro de estos métodos, la estabilización alcalina es una de las más usadas, sin embargo, con este tratamiento el material se endurece al ser expuesto al aire libre y ocurre fijación de metales pesados, insolubilización de fósforo y pérdidas de nitrógeno por volatilización (Agencia de Protección Ambiental, USEPA 1993; Andreoli, et al., 2001).

Las principales desventajas de la estabilización alcalina radican en que el material final es aplicable principalmente a suelos ácidos y el volumen de biosólidos se incrementa por la aplicación de cal, lo que genera mayores costos de transporte y tratamiento final (Mahamud, et al., 1996; Barrios & Cabirol, 2002). Después de la estabilización en el biosólido la alcalinidad total aumenta y disminuyen el nitrógeno amoniacal y el fósforo total (Andreoli, et al., 2001; Williford, et al., 2007).

De otra parte, el alto contenido de organismos patógenos de los lodos es una de sus características más importantes para limitar su manejo, ya que puede provocar problemas de origen sanitario. Las propiedades biológicas de un lodo dependen de la naturaleza de sus constituyentes orgánicos, el contenido de nutrientes y factores de crecimiento, y de la toxicidad de los materiales que lo constituyen. El tipo y cantidad de microorganismos patógenos en un lodo depende básicamente del estado epidemiológico de la comunidad de donde proviene y de los efluentes lanzados en las redes colectoras (Jiménez, Barrios & Maya, 2001).

Ahora bien, los diferentes tratamientos pueden reducir, pero no eliminar completamente tales agentes. Se ha descubierto, por ejemplo, que las bacterias y agentes patógenos presentes en los biosólidos crudos pueden sobrevivir hasta por 2 años (Cortez, 2003).

Los organismos patógenos expuestos al medio ambiente perecen en tiempos variables como resultado del calor, la luz solar, la desecación, entre otros factores. El control de riesgo microbiológico se efectúa con base en la presencia cuantitativa de las bacterias, virus y huevos de helmintos viables por su gran resistencia a los factores ambientales (Jiménez, Barrios & Maya, 2001).

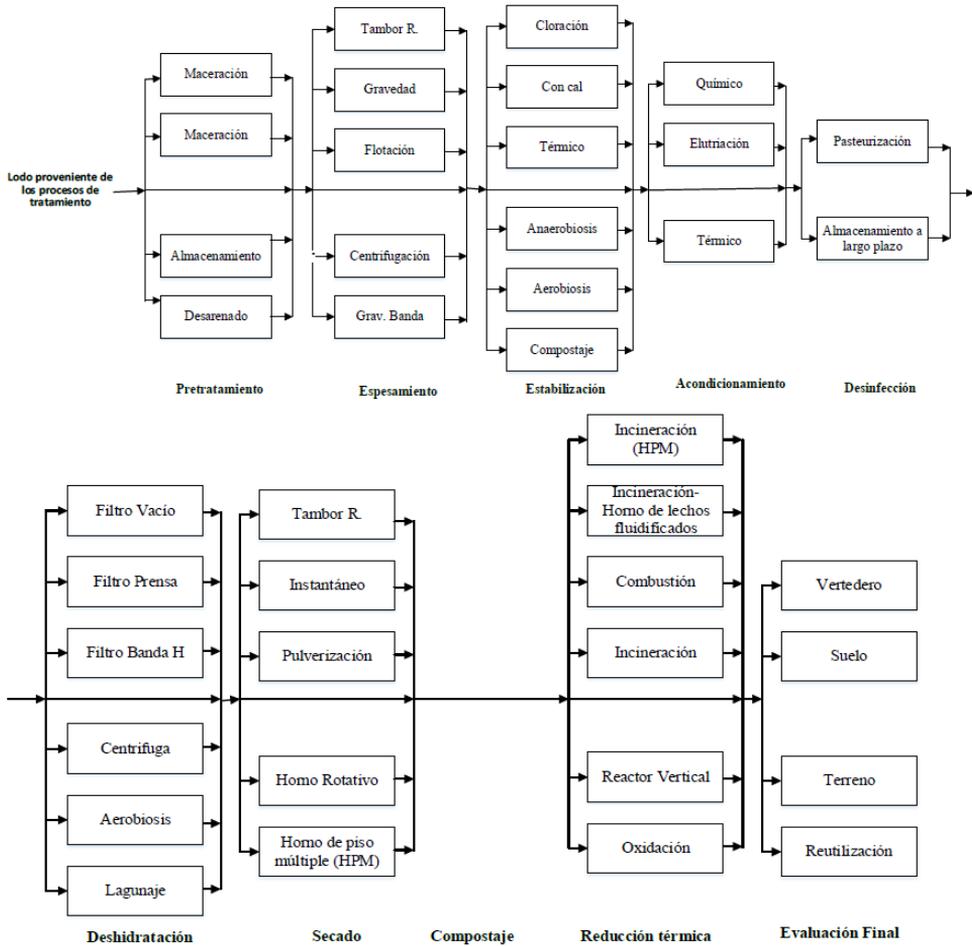
Entre las bacterias patógenas más importantes que pueden estar presentes en los biosólidos se encuentran, *Salmonella typhi* (que produce fiebre tifoidea), *Escherichia coli* (que produce gastroenteritis), *Shigella* sp., (que produce disentería) y *Vibrio Cholerae* (que producen diarreas extremadamente

fuertes o cólera). Entre los protozoos se encuentran la *Cryptosporidium parvum* y *Balantidium coli* (que producen diarrea); también se pueden encontrar huevos de helmintos viables, entre los cuales los que más prevalecen se encuentran: *Ascaris lumbricoides* y *Taenia saginata*. Entre los virus encontrados en los biosólidos frescos están los causantes de la hepatitis A y de la polio-mielitis (Cortez, 2003).

Tratamiento del lodo

Metcalf y Eddy (1991) presentan el flujograma de las etapas del manejo del lodo de agua residual. En este capítulo serán destacados conceptos como la deshidratación, condicionamiento, higienización y disposición final (ver Figura 4.1). La incorporación de estas etapas en el tratamiento del lodo está relacionada con el tipo de tratamiento de agua residual empleado.

Figura 4.1 Flujograma de las etapas de gerenciamiento del lodo.



Fuente: Metcalf y Eddy (1991).

Procesos de estabilización del lodo de aguas residuales

Los procesos de estabilización del lodo visan a la atenuación del olor y la concentración de patógenos, controlando la biodegradación de los compuestos orgánicos. Es una etapa importante del sistema de gestión del lodo producido en las PTAR, cuya articulación es la deshidratación, la higienización y el uso final del producto. En el reciclaje agrícola como destino final del lodo, el grado de estabilización es de fundamental importancia. Cuando es mal ejecutada, la gestión del lodo puede comprometer los beneficios ambientales y sanitarios esperados.

La definición de estabilización permite cierta subjetividad de la estrecha relación entre estabilización del lodo y su destino final. La prueba de ello es que hay un gran número de parámetros de estabilización, que normalmente se eligen de acuerdo con el tipo de destino final del lodo. De esta forma, si el destino es el reciclaje agrícola, el contenido de sólidos fijos y volátiles, por ejemplo, será un buen indicador del grado de mineralización del lodo y por lo tanto de su olor. De acuerdo con la definición adoptada por la Resolución CONAMA 375/2006 (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2006), la estabilización es “un proceso que lleva a los lodos de deshidratación, destinados para el uso agrícola, a no presentar potencial de generación de olores y vectores, incluso cuando se reutilizan”. Asimismo, para fines de uso agrícola, el lodo de AR o productos derivados se considerarán estables si la relación entre sólidos volátiles y sólidos totales es inferior a 0,70.

La estabilización de los lodos ocurre por procesos biológicos, químicos y térmicos, el que se emplea con más frecuencia es el proceso biológico, a través de la digestión aerobia y/o la digestión anaerobia, en condiciones ambientales. En cuanto a la digestión aerobia, para Procesos de Reducción Significativa de Patógenos, según Conama 375/06 (Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2006) esta debe ser realizada con aire u oxígeno, con retenciones mínimas de 40 días a 20 °C o por 60 días a 15 °C. Para el proceso de Reducción Adicional de Patógenos se puede realizar la digestión aerobia termofílica con aire u oxígeno, teniendo tiempos de retención de 10 días a temperaturas de 55 a 60 °C.

Los reactores anaeróbicos más comúnmente utilizados en Brasil, para el tratamiento de aguas residuales son: tanque séptico (decantador-digestor), filtro anaerobio, reactor de manta de lodo y lagunas anaerobias. En el Estado de Paraná, el proceso de estabilización del lodo más usado es el de la digestión anaerobia, también conocido como sistema de tratamiento en reactores anaeróbicos de flujo ascendente, tipo UASB por sus siglas en inglés (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*).

Reactor anaerobio tipo UASB

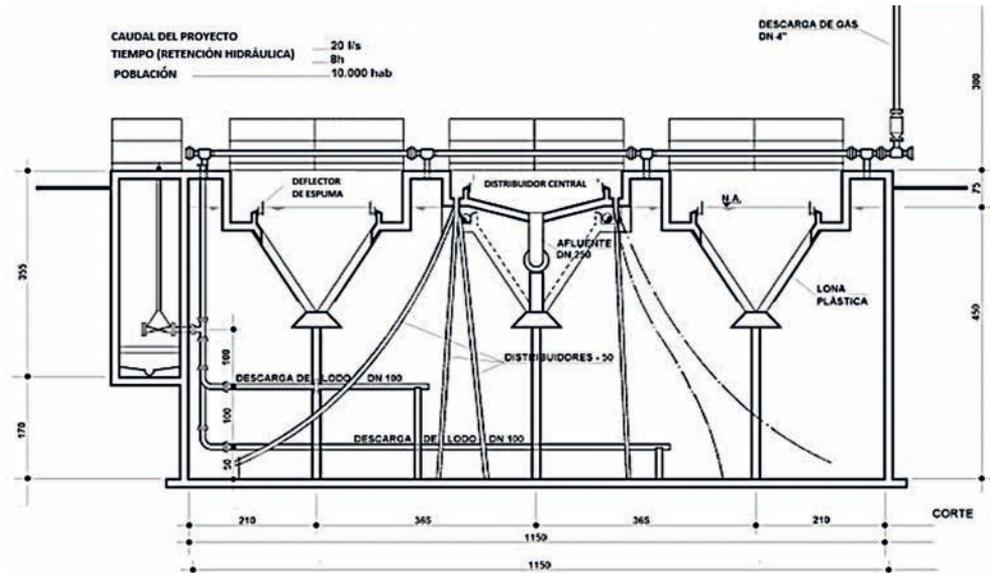
Los reactores anaeróbicos tipo UASB, también denominados reactores aeróbicos de manta de lodo, emplean tecnología desarrollada en Holanda, en la década de 1970, por Lettinga y colaboradores. El tratamiento consiste en un reactor de flujo ascendente, dotado de separación trifásica

en la parte superior, que posibilita la separación del gas (que puede ser captado y aprovechado), de la fase líquida (efluente tratado) y la sedimentación de los sólidos en el interior del reactor. Contiene una zona de lodo, cuya biomasa es responsable de la degradación biológica del lodo (ver Figura 4.2). Las unidades alcanzan niveles de reducción entre el 65% y el 80% de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), a un costo menor que el de los sistemas convencionales de tratamiento. El clima cálido, predominante en el país (Brasil), es altamente favorable en las reacciones de biodegradación que ocurren en el interior de los reactores.

En el caso de los reactores tipo UASB, la digestión anaerobia del lodo, ocurre dentro del propio reactor, por lo tanto, al efectuarse la descarga periódica de lodo, este puede ser enviado al proceso de deshidratación. La composición del lodo puede variar en virtud de la periodicidad de las descargas, razón por la cual es un lodo más mineralizado, teniendo humedad variable y menor cantidad de materia orgánica, y nutrientes. Las PTAR que emplean el UASB también presentan menor producción de lodo en relación con los sistemas aerobios.

En el reactor UASB la producción y los procesos de estabilización del lodo se realizan en el medio líquido (manto de lodo) y generan un material de alto contenido de humedad, lo que hace imprescindible la remoción de humedad (deshidratación) si hay necesidad del transporte del lodo para fines diversos, reduciendo así los costos de transporte y disposición final (Aisse, 1999).

Figura 4.2 Reactor UASB en perfil

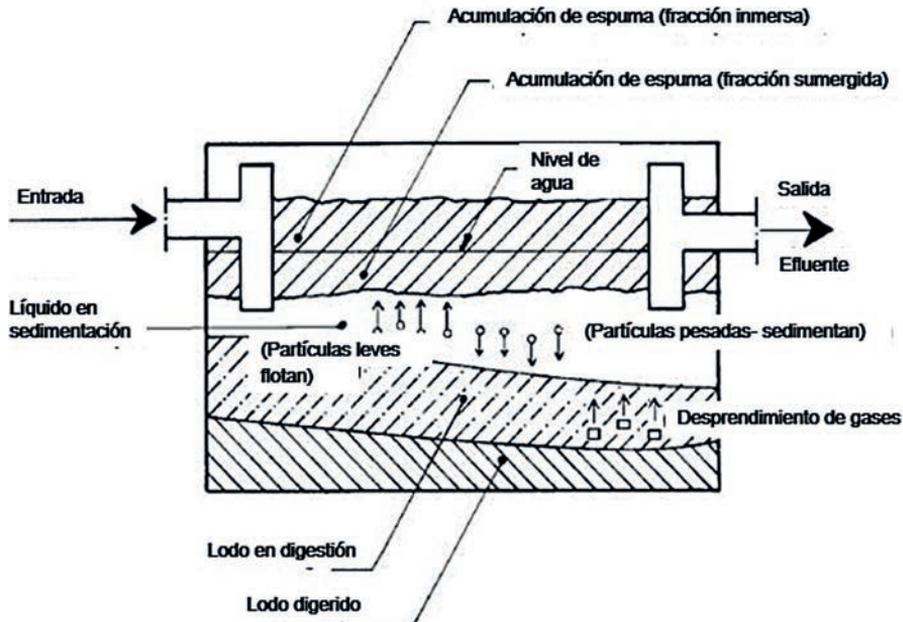


Fuente: Aisse (2000) citando SANEPAR.

Tanques sépticos

De acuerdo con la NBR 7229, de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT, 1993), el tanque séptico es definido como una "unidad cilíndrica o prismática rectangular, de flujo horizontal, que sirve para el saneamiento de AR utilizando los procesos de: sedimentación, flotación y digestión (ver Figura 4.3).

Figura 4.3 Esquema y funcionamiento general de un tanque séptico.



Fuente: NBR (1993)

En los tanques sépticos, parte del lodo sedimenta en el fondo y otra parte flota, formando la espuma o lodo flotante. En la parte intermediaria queda la deshidratación que puede ocupar proporciones distintas del volumen del reactor en función de varios factores de forma y, sobre todo, de las condiciones operacionales.

La fosa rudimentaria es una denominación genérica utilizada para sistemas de tratamiento individualizado que no posee las especificaciones técnicas de construcción y operación satisfactorias, como "fosas negras", "pozo", "hueco", entre otros, entre las cuales comprenden los diversos otros tipos de fosa; a excepción de los tanques sépticos, las fosas rudimentarias no funcionan de manera adecuada, pudiendo contaminar el suelo y, consecuentemente, los acuíferos de agua y ríos.

Los tanques sépticos son ampliamente utilizados en Brasil, generando significativas cantidades de lodos. La necesidad de conocer las características,

cualitativas y cuantitativas, del lodo en esas unidades es imprescindible, para que la gestión del mismo se pueda hacer de la mejor manera en las diversas etapas de generación y disposición.

El uso de tanques sépticos es una forma adecuada para la gestión de los efluentes domésticos como tratamiento individualizado, principalmente en regiones con baja densidad poblacional, donde el costo de conducción a la red de alcantarillado se torna elevado. Sin embargo, esta opción tecnológica requiere la remoción sistemática del lodo y la generación de alternativas para el destino del mismo, lo que raramente se observa en la práctica.

La porción de materia orgánica no estabilizada presente en el lodo séptico es una fuente potencial de contaminación elevada, contribuyendo también a la generación de olores desagradables y atractivos de vectores. El lodo séptico, a ejemplo de otros subproductos generados en el saneamiento, requiere alternativas de tratamiento y de destino final para minimizar los impactos ambientales negativos durante el ciclo de vida de este residuo.

La remoción del lodo producido en los tanques sépticos debe realizarse de forma programada, bien establecida y monitoreada, para que el sistema se mantenga eficiente. La NBR 7229 recomienda intervalos de limpieza de al menos uno y como máximo cinco años. Finalmente, se efectúa la limpieza de los tanques sépticos cuando el lodo alcanza una capa igual o superior a 50 cm, o 1/3 de la profundidad de líquido en el tanque para unidades mayores (Jordão & Pessoa, 2014). Sin embargo, se observa en la práctica que el drenaje no siempre se realiza de acuerdo con la norma.

Los residuos drenados por los camiones encargados de la limpieza son mucho más concentrados que las aguas residuales sanitarias, pero no llegan a tener características similares a las de lodo de PTAR. La materia removida a partir de sistemas de disposición local, los sistemas individuales, sea una fosa rudimentaria o un tanque séptico bien diseñado y construido, es una mezcla de AR proveniente del alcantarillado y lodo que no presenta las características típicas de las ARs ni de lo que se conoce normalmente como lodo en la terminología de la Ingeniería Sanitaria, siendo necesaria una definición propia.

Tratamiento de lodo de tanques sépticos combinados con lodo de alcantarillado bruto en reactores anaerobios de mantos de lodo

El tratamiento del lodo séptico se puede realizar en un sistema destinado exclusivamente al lodo séptico, o de forma asociada a otro sistema de tratamiento de aguas residuales. No obstante, los usuarios de estos sistemas, generalmente utilizan el servicio de empresas especializadas para la remoción del lodo producido en exceso, transfiriendo a estas empresas la responsabilidad de su destino final. Cuando no tienen la infraestructura para el tratamiento individualizado, dichas empresas recurren a las empresas de saneamiento para depositar los lodos producidos en tanques sépticos en PTARs, o directamente en el alcantarillado sanitario. Sin embargo, las descargas no controladas de lodo séptico pueden perjudicar la eficiencia del tratamiento por las características variadas del lodo, ya sea por las descargas irregulares de lodo procedente de otros procesos no domésticos. En la inexistencia de un protocolo de recepción definido, las empresas de saneamiento acaban por recibir la totalidad del lodo séptico en descargas puntuales de gran volumen y con características desconocidas lo cual afecta la eficiencia del tratamiento.

Para el tratamiento del lodo séptico, combinado con el del alcantarillado, en Reactores Anaeróbicos de Manto de Lodo, o *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB), se espera que después de un pretratamiento el lodo pueda ser dosificado en un caudal preestablecido y que esto ocurra sin que haya pérdidas significativas en la eficiencia del reactor y en la calidad del lodo anaeróbico producido.

Samways, et al. (2010) condujeron investigaciones de la capacidad de recibimiento del lodo en reactores UASB, con el fin de organizar los protocolos de recepción de los lodos sépticos en las PTAR, trayendo beneficios tanto para la empresa de servicios públicos como para las empresas limpiadoras de tanques sépticos.

En este sentido, el estudio fue desarrollado en la PTAR Belém (Curitiba-PR, Brasil), de la Compañía de Saneamiento de Paraná (SANEPAR). La investigación fue dividida en siete etapas: Pre-operación, Partida de los Reactores, Operación 1, UASB + dosis de lodos 1, Operación 2, UASB + Dosis de lodos 2 y UASB + Dosis de lodos 3. Se inició la operación sin la utilización de material inóculo, los reactores fueron operados con tiempo de detención hidráulico medios de 8 h y caudal medio en el afluente de

6000 L d⁻¹. Se aplicaron tasas crecientes de lodo séptico en los reactores UASB en los caudales:

- 110 L d⁻¹ (carga de 0,22 kg ST·m⁻³·d⁻¹ y 0,12 kg DQO·m⁻³·d⁻¹) en la fase UASB + Lodo 1;
- 250 L d⁻¹ (carga de 0,5 kg ST·m⁻³·d⁻¹ y 0,28 kg DQO·m⁻³·d⁻¹) en la fase UASB + Lodo 2
- 450 L d⁻¹ (carga de 0,90 kg ST·m⁻³·d⁻¹ y 0,50 kg DQO·m⁻³·d⁻¹) en la fase UASB + Lodo 3.

El lodo séptico se ha condicionado a una concentración de 4.000 mg ST·L⁻¹. También, se analizó el sistema de pretratamiento del lodo séptico y estabilización del lodo anaeróbico, retirado de los reactores UASB.

Se observó una disminución en la eficiencia de la remoción de DQO y alteraciones en la alcalinidad total, acidez y pH. Por lo anterior, las pruebas estadísticas no comprobaron que estas alteraciones fueran significativas. En consecuencia, se asume que los reactores utilizados en la investigación no sufrieron pérdidas en su calidad de tratamiento, en las dosis probadas con lodo séptico. El lodo anaeróbico retirado de los reactores UASB pudo considerarse estable (relación SV/ST entre 0,55 a 0,61 en promedio). Así, el aumento del lodo séptico aparentemente no afectó la estabilidad del lodo anaerobio. El sistema de pretratamiento del lodo séptico atendió las necesidades del estudio (Samways, et al., 2010).

Centros de Recepción de Lodo de Tanque Séptico

Con el fin de mitigar los efectos y permitir el control del descarte del lodo de tanques sépticos en las PTARs, algunos autores sugieren construir, Centrales de Recepción de Lodo de Tanque Séptico (CRLTS). Actualmente, no se tiene un consenso entre los especialistas sobre cuál sería la concepción ideal de CRLTS, teniendo varias propuestas presentadas de forma teórica, algunas construidas como modelo piloto, y a escala real. Samways, et al., (2014) presentaron algunas de esas propuestas, discutiendo desde las condiciones para la mejor ubicación, los pretratamientos requeridos en el lodo, los organigramas de personal pretendidos en estas centrales, y las formas de almacenamiento y aplicación del lodo en las PTARs. Como producto final, los autores sugieren una concepción de CRLTS a ser construida.

Los grupos de trabajo se constituyeron entre personal de la Universidad Federal de Paraná (UFPR) y de la Compañía de Saneamiento de Paraná (SANEPAR), ambos en Brasil. Estos grupos discutieron los parámetros requeridos y propusieron los criterios de concepción de CRLTS que pudieran resolver las necesidades de la compañía en cuanto a la recepción del lodo proveniente de tanques sépticos. En este trabajo no se estudió el concepto donde se tratan los lodos exclusivamente, sin la participación de una PTAR. La Tabla 4.2 resume las propuestas estudiadas.

Tabla 4.2 Centrales de Recibimiento de Lodo de Tanque Séptico (CRLTS) estudiadas

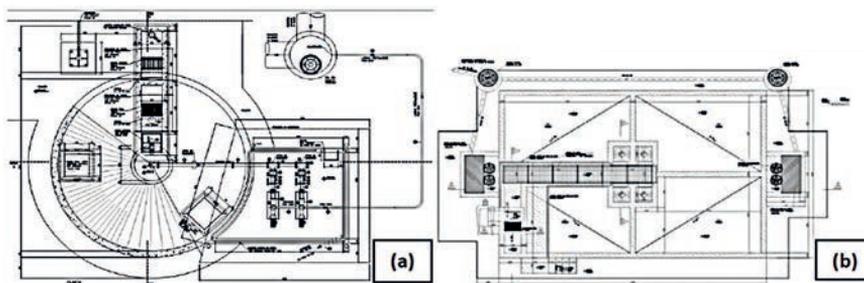
Propuesta	Autor(es)	Lugar	Proponente	Escala
(1)	ECOSOL (2006)	Campo Largo / PR	SANEPAR	Plena
(2)	DALCON (2006)	Contenda / PR	SANEPAR	Plena
(3)	PROENSI (2007)	Londrina / PR	SANEPAR	Plena
(4)	GONÇALVES (2008)	São Carlos / SP	EESC-USP	Piloto
(5)	CRIPPEN et al.(2009)	Líbano	-	Plena
(6)	CAMPOS et al. (2009)	-	EESC-USP	Teórico
(7)	CAMPOS et al. (2009)	São Carlos/SP	EESC-USP	Piloto
(8)	CAMPOS et al. (2009)	Campinas/SP	SANASA	Plena
(9)	SAMWAYS et al. (2010)	Curitiba/PR	UFPR/SANEPAR	Piloto
(10)	AISSE et al.(2014)	-	DHS/UFPR	Teórico
(11)	AISSE et al.(2014)	-	DHS/UFPR	Teórico
(12)	AISSE et al.(2014)	Brasília/DF	UnB/CAESB	Plena
(13)	AISSE et al.(2014)	Brasília/DF	SLU/CAESB	Experimental

Nota: SANASA, SANEPAR y CAESB: empresas de saneamiento brasileñas.

A continuación se presentan las propuestas encargadas por SANEPAR. Tres propuestas fueron enviadas a la compañía: cámara única y formato circular, precedido de rejilla y aplicación del lodo por bombeamiento proyectado por la (1) Ecosol -2006- para la PTAR de Cambuí, localizada en Campo Largo-PR (ver Figura 4.4a); otro tanque de concepción similar a la anterior para la PTAR Contenda, localizada en Contenda-PR, realizada por la (2) Dalcon -2006- y, por último, tanque proyectado por la (3) Proensi -2007- para la PTAR Norte, ubicada en Londrina-PR. Esta última

se compone de un tanque dividido en cuatro cámaras, para la mezcla del lodo procedente de rejilla para la remoción de sólidos gruesos, la aplicación del lodo fue realizada por gravedad, sin la utilización de bombas (ver Figura 4.4b). En este modelo no está prevista la utilización de agitadores mecanizados para promover la mezcla del lodo, pero en discusiones posteriores, se identificó que existe la iniciativa de instalar en el proyecto los agitadores, evitando la separación de fases del lodo. Todas las PTAR citadas emplean reactores del tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) como tratamiento secundario.

Figura 4.4 Tanque de recepción de lodos provenientes de tanque séptico (planta)



Fuente: (a) ECOSOL (2006); (b) PROENSI (2007)

Digestores anaeróbicos de lodo

Digestión anaerobia

Según la normatividad brasileña (ABNT, 2011), la digestión anaeróbica debe, preferiblemente, ser procesada en el rango de temperatura entre los 30 a 35 °C, o en el rango entre los 50 a 57 °C. Las temperaturas inferiores resultan en menor eficiencia del proceso de digestión. Los siguientes ítems, sin embargo, se refieren a la digestión mesofílica, en el rango entre los 20 a 35 °C. Esta debe preferiblemente ser ejecutada en una sola etapa, seguida por un tanque pulmón con el objetivo de almacenar, espesar y separar el sobrenadante, pudiendo, en consecuencia, ser abierto. En la digestión de una sola etapa, sin tanque pulmón, el digestor debe ser proyectado también para almacenar y espesar el lodo y la remoción de sobrenadante.

Tabla 4.3 Digestión Anaerobia: tasa de aplicación a ser empleada en proyectos

Tipo de digestor	Tasa de aplicación (kg SSV/m ³ ·d)	Tiempo de detención (días)	Comentario
Convencional homogeneizado	≤ 0,5	≥ 45	-----
Convencional homogeneizado	entre 0,5 y 1,2	≥ 30	Homogeneizado 1 W/m ³ (*)
Tipo de digestor	Tasa de aplicación (kg SSV/m ³ ·d)	Tiempo de detención (días)	Comentario
Alta tasa	entre 1,2 y 4,8	≥ 22	Homogeneizado ≥ 5 W/m ³ (*)
		≥ 18	Homogeneizado ≥ 5 W/m ³ (*); Calentado

(*) Nota: Dispositivo de homogeneización cuando no se emplea la recirculación de lodo.

Fuente: ABNT (2011)

Digestión del lodo en dos fases y pretratamiento térmico

Blank y Hoffmann (2011), afirman que la hidrólisis representa la tasa determinante del proceso metabólico en la fermentación anaerobia. Desacoplando la hidrólisis y la acidificación de la fase metanogénica, se propicia la reducción del volumen del reactor biológico, bajo una (o quizás más) actividad metabólica, evaluada por ejemplo por la tasa de producción de biogás. Además de la reducción del volumen total requerido para los digestores, el lodo producido presentó características similares de deshidratación.

Samways (2015), citando varios autores, describe el efecto del pretratamiento térmico sobre la digestión posterior de lodos primarios y secundarios en las fases mesofílica y termofílica. Concluye que la etapa de hidrólisis térmica beneficia al potencial de producción de metano, particularmente de lodos primarios, además de alcanzar la remoción total de *estreptococos fecales*, después de un digestor termofílico. La etapa de pretratamiento térmico provoca el rompimiento de las ligaciones químicas de sustancias poliméricas en solución y de la pared celular de los microorganismos y parásitos presentes, lo que posibilita una mayor solubilización de las partículas orgánicas y mejor

desempeño de la digestión anaerobia del lodo, que tiene por finalidad, la remoción de los patógenos y de huevos helmintos viables. Por lo tanto, la termohidrólisis es una de las técnicas de eliminación o disminución de los microorganismos patógenos, por medio de la combinación de tiempo y temperatura de exposición.

Barés, et al. (2010), afirman que el lodo que pasa por proceso de digestión en reactores UASB (operando la temperatura mesofílica), con pre-tratamiento térmico (termohidrólisis), operando a temperatura controlada, entre 60 y 70°C, por un período de 60 minutos, propicia la higienización, evaluada por la reducción de huevos de helmintos viables. El resultado satisfactorio de la relación de temperatura versus tiempo para lodo mixto (primario y aeróbico), en algunos experimentos de laboratorio, las condiciones fueron de 60 °C, durante 60 minutos.

La opción de incorporar un reactor termófilo, que realiza pre-digestión del lodo, a los sistemas actuales de tratamiento mesofílico de lodo, puede tornarse viable, en el sentido de producir lodo clase A, conforme a la Resolución CONAMA núm. 375 (B Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente, 2006). Sin embargo, la aplicación de este proceso, no sustituye al proceso mesofílico tradicional, solo complementa el sistema para el tratamiento del lodo.

Otras alternativas: minimización del lodo

A pesar de que existen diversos métodos y técnicas para tratar y reutilizar el lodo excedente en las PTAR, las cantidades crecientes, impuestas por el aumento de la cobertura de los sistemas de alcantarillado sanitario en el país, sugieren alternativas para reducir la producción. La producción de lodo de las PTAR puede ser minimizada en la fase sólida del tratamiento, a través del incremento de la biodegradabilidad del lodo en exceso, antes de la etapa de digestión; estabilización avanzada del lodo de descarte por medio de procesos físico-químicos; uso de procesos de estabilización o de higienización que no agreguen masa o volumen al lodo. Se han notificado varios mecanismos con respecto al hidrólisis, entre los cuales se destacan la desintegración mecánica, el ultrasonido, la hidrólisis ácida y la hidrólisis alcalina (ver Tabla 4.4).

Tabla 4.4 Comparación relativa de los diversos procesos hidrolíticos de lodo de aguas residuales.

Características	Hidrólisis térmica	Hidrólisis química	Hidrólisis biológica
Demanda de producto (bio)química	-	+ + +	+ + +
Demanda de energía	+ + +	+	-
Posibilidad de uso del biogás	+ + +	-	-
Eficiencia, solubilización	+ + +	+ + +	+ +
Biodegradabilidad del hidrolizado	+ +	+	+ + +
Degradación de SVT	+ +	+ + +	+ +
Inactivación de patógenos	+ + +	+ +	-
Generación de olores	+ + +	+ + +	ND
Tiempo de retención del lodo	+ +	+	ND
Complejidad operacional	+ +	+	+
Complejidades de manutención	+ +	+	+
Tamaño de la PTAR	+ + a + + +	+ a + + + +	+ a + + + +
Costo de implantación	+ + +	+ +	+ +

Nota: (-) inexistente, (+) poco, reducido, pequeño, (+ +) medio, intermedio, (+ + +) elevado, mucho, (ND) dato no disponible.
Fuente: Cassini et al. (2003).

Velho (2015) condujo experimentos para la minimización del lodo, en el ámbito de las PTAR, que emplean sistemas de lodos activados (tratamiento aeróbico), al respecto, este autor cita que esto puede ser realizado de las siguientes formas: sustituir los receptores de electrones productores de elevada cantidad de energía, como O₂ y el nitrato, o disminuir la eficiencia de estos (tratamiento aerobio). También, expone la necesidad de aumentar el mantenimiento celular, proporcionando menos energía para el crecimiento de la biomasa, que libera productos que puedan ser reutilizados por otros microorganismos en el sistema y aumentar la biodegradabilidad de materiales orgánicos inertes acumulados. Así, la relación de alternativas pasó por el tratamiento físico-químico del lodo de exceso (cloración o desintegración ultrasónica), metabolismo desacoplado (aplicación de ácido fólico o tetracloro salicilato) y tratamiento biológico aplicado en la

línea del lodo (proceso *Oxic- Settling -Anaerobic System*). Este último estudia la aplicación de tratamiento anaeróbico y aeróbico, alternando la porción del lodo de exceso. Todos buscando la minimización de la producción de lodo, sin alterar la calidad del efluente líquido tratado.

Reducción de la humedad del lodo de aguas residuales

Después de la estabilización, el lodo debe someterse a un proceso de reducción de humedad. La deshidratación de lodo es una operación unitaria que reduce el volumen del lodo en exceso, a través de la reducción de su contenido de humedad. Las etapas de espesamiento y deshidratación reducen el del lodo en más del 50% de su volumen inicial, facilitando su destino, que permite su manejo y uso como insumo agrícola.

En vista de la gran diversidad de procesos operativos y unitarios de tratamiento de lodo, se pueden citar inicialmente los procesos de secado natural al aire libre. Así se destacan los lechos de secado convencionales. Estos ocupan áreas no siempre disponibles, en razones como 20 a 50 hab/m², dependiendo de las condiciones climáticas y la naturaleza del proceso de tratamiento (anaerobio o aerobio). Si no hay disponibilidad de área deben ser utilizados equipos mecanizados, que poseen como requisitos: alimentación de energía eléctrica y la adición de polímeros auxiliares en el proceso. Estos procesos se pueden denominar como artificiales o mecanizados.

Procesos Naturales

- *Lechos de secado*: unidades, generalmente rectangulares, donde se procesa la reducción de humedad con el drenaje y la evaporación, donde la mayor parte del agua es removida por percolación. Estructuralmente los lechos de secado son similares a los filtros lentos de arena: se aplica una batelada de lodo, con un espesor inicial de 30 a 60 cm, sobre un lecho de arena eventualmente cubierto de ladrillos, con espacios libres para la percolación. La arena a su vez descansa sobre una capa de grava estratificada, con tubos perforados para recoger el agua percolada por el lecho de arena.

- *Lagunas de secado*: tienen fines y funcionamiento similares a los de los lechos de secado. Se diferencian de los lechos en su funcionamiento debido a que no es basado en la percolación de agua. Al contrario, se busca la posibilidad de retirar la capa de agua que se forma sobre la

torta de lodo, cuando esta es colocada en la laguna. El resto tiene que ser evaporado. En general el secado en las lagunas tarda mucho más que en lechos, pero su ventaja es que la construcción es más simple.

- *Disposición del lodo en el suelo:* el suelo sirve como medio de recepción para el lodo. Muchas veces el lodo se aplica en el suelo y se mezcla, como fertilizante o acondicionador del suelo.

Procesos Mecanizados

- *Filtros prensa de placas:* son filtros de presión, constituidos de placas de hierro entre las cuales se sujetan tejidos filtrantes.

- *Filtros de prensa de cintas:* poseen dos correas sin fin en movimiento continuo, de las cuales al menos una está constituida por una tela filtrante.

- *Filtros al vacío:* el lodo es aspirado de afuera hacia adentro y queda retenido en un tejido filtro, que envuelve un cilindro rotativo, parcialmente inmerso en el lodo.

- *Centrífugas tipo decanter:* son equipos que separan los sólidos del agua por diferencia de fuerza centrífuga.

La concentración en la torta al final del proceso puede alcanzar valores entre el 15 al 40%, según lo expresado en la Tabla 4.5. La eficiencia del proceso de deshidratación está relacionada con la concentración de sólidos volátiles en el lodo, así entre mayor el grado de estabilización del lodo a ser desaguado, mejor será el rendimiento de la centrífuga, por ejemplo, y, por consiguiente, el contenido de sólidos en la torta (Gonçalves, et al., 2014).

Tabla 4.5 Contenido de sólidos obtenidos en la deshidratación mecánica

Equipo	Contenido de sólidos (%)	Comentarios (*)
Filtros de cintas	15 a 20	Lodo primario digerido por vía anaerobia.
o prensas	13 a 20	Lodo mixto digerido por vía anaerobia.
desaguadoras	17 a 25	Lodo de digestión aerobia.

Equipo	Contenido de sólidos (%)	Comentarios (*)
Filtro prensa	30 a 45	Lodo primario digerido por vía anaerobia.
	25 a 40	Lodo mixto digerido por vía anaerobia.
	20 a 25	Lodo de digestión aerobia.
Centrifuga	20 a 35	Lodo primario digerido por vía anaerobia.
	18 a 30	Lodo mixto digerido por vía anaerobia.
	15 a 20	Lodo de digestión aerobia.

Nota: (*) El uso de polímeros es necesario para aumentar la captura de sólidos y la tasa de aplicación de sólidos.

Fuente: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2011)

Secado térmico

El Secado Térmico es una operación que permite la obtención de una torta con contenidos de sólidos del orden del 90%, cuya consistencia es de gránulos o polvo, siendo, por lo tanto, un proceso de remoción de humedad que obtienen resultados bastante superiores a los demás en términos de concentración de sólidos. Sin embargo, cabe resaltar que el lodo en la entrada del proceso ya debe estar desaguado, con valores entre el 20 y 35% de sólidos. El proceso de secado térmico consiste en el calentamiento del lodo en un ambiente herméticamente cerrado, con la evaporación de la humedad y recirculación del vapor condensado a la entrada de la PTAR. El lodo sale del secador en forma de "*pellets*" con un diámetro medio entre 2 y 5 mm y con un contenido de sólidos por encima del 90% (Gonçalves, et al., 2014). En la NBR 12.209 (ABNT, 2011) se recomienda que, para proyecto, el contenido de sólidos en la torta proveniente de secado térmico sea considerado en el rango entre el 60 al 90%. MetCalf y Eddy (1991) citan una serie de tecnologías disponibles de secado térmico, clasificadas según la forma en que se efectúa la transferencia de calor al lodo. Los equipos pueden funcionar por conducción, convección, e irradiación, o por combinación de dos o más de estos métodos.

El proceso de secado térmico se presenta no solo en el ámbito de la remoción de humedad, sino también como una alternativa de estabilización e higienización, ya que, además de volatilizar buena parte de la materia orgánica, promueve la inactivación de organismos patógenos, transformando el lodo en producto de valor agregado. Según MetCalf y Eddy (1991), el secado térmico posee, entre otras, las ventajas de producir un

lodo compatible con la Clase A (en la clasificación americana de la USEPA), pudiendo este lodo ser utilizado incluso en césped y jardines de casas.

Se debe destacar que el secado térmico tiene desventajas, o contra puntos, como alto costo de inversión inicial, relativa complejidad operacional y alto consumo de combustible, sin embargo, investigaciones se han realizado en cuanto a la utilización del lodo como fuente alternativa de combustible, por poseer elevado poder calorífico, aprovechado como combustible en calderas, calentadores industriales, hornos de cemento, etc.

Possetti, et al. (2015) obtuvieron lodo con un 84% de sólidos en un secador térmico piloto, utilizando biogás de reactores UASB como fuente de combustible. Además, los autores obtuvieron, a partir de los análisis microbiológicos del lodo, resultados de remoción de los indicadores biológicos: huevos de helmintos viables, *Salmonella*, virus entéricos y coliformes termotolerantes. Los resultados demostraron remociones suficientes para clasificar el lodo como clase A, según la Resolución CONAMA 375/06, sin la adición de productos químicos, viabilizando así la utilización del lodo en la agricultura.

Higienización del lodo

Los lodos generados por los procesos físicos y biológicos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, presentan algunas características indeseables que dificultan su manipulación y procesamiento; entre estas características indeseables está la presencia de microorganismos patógenos. Los procesos de estabilización son eficientes en la disminución de microorganismos patógenos, sin embargo, la concentración de microorganismos patógenos en estos lodos estabilizados sigue siendo grande y, para que su reciclaje agrícola se haga sin riesgos, es necesario estabilizar el lodo con el objetivo de obtener un lodo sanitario seguro.

Estabilización Alcalina Prolongada

Desde finales del siglo pasado se sabe que la adición de productos químicos alcalinos tiene efecto estabilizante en el lodo de AR. La cal es uno de los productos alcalinos más baratos y usados en el saneamiento: se utiliza para elevar el pH en los digestores, remover fósforo en los tratamientos avanzados de efluentes, condicionar el lodo para la deshidratación mecánica y para estabilizar químicamente el lodo.

Se puede utilizar la cal virgen (CaO) o la cal hidratada [Ca (OH)₂]. La cal virgen es más utilizada a granel y grandes cantidades, mientras que la cal hidratada se vende en envases de 20 kg y se manipula más fácilmente en pequeñas cantidades. La cal virgen también libera calor en contacto con el agua, pero al ser mezclada al lodo, la elevación de la temperatura no es suficiente para eliminar los patógenos. La eliminación de los patógenos se da por efecto de la elevación del pH del lodo a niveles iguales o superiores a 12 (Aisse, 1999). La legislación estatal de Paraná exige un período mínimo de 30 días.

Compostaje

El compostaje es un proceso de tratamiento biológico, donde una mezcla inicial de residuos sufre la acción de varios grupos de microorganismos. Durante el proceso de biodegradación de la materia orgánica la temperatura se eleva naturalmente, por lo general en el rango de 60 a 65 °C, en los primeros días del proceso. Esta elevación de la temperatura es responsable de la eliminación o reducción de los microorganismos patógenos presentes en el lodo.

En el proceso de compostaje el lodo debe ser mezclado a un residuo estructuralmente rico en carbono (paja, residuos de podas de árboles triturados, bagazo de caña, aserrín de madera, etc.). En un proceso biológico, su éxito depende del control de algunos parámetros físico-químicos básicos: aireación, humedad, relación carbono/nitrógeno (C/N), pH, granulometría y estructura (Aisse, 1999).

Otros procesos se muestran en la Figura 4.1, incluyendo la digestión termofílica, el almacenamiento prolongado, entre otros. El presente artículo representa una primera aproximación al tema. La higienización del lodo se detalla en otro capítulo.

Costos del tratamiento del lodo

Dependiendo de la tecnología elegida, el tratamiento y la disposición final del lodo, dentro del costo operacional de una planta de tratamiento de aguas residuales, puede corresponder de 20 a 60%. Solo los costos operativos asociados al destino final del lodo corresponden a más del 40% del total.

Referencias

- Andreoli, C. V., Ferreira, A. C., Cherubini, C., Rodrigues, C., Carneiro, C., & Fernandes F. (2001). Capítulo 4 Higienização do lodo de esgoto. En *Resíduos sólidos do saneamento; processamento, reciclagem e disposição final*. ABES y PROSAB. Brasil. 282 p. ISBN 85-86552-19-4.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2011). *ABNT NBR 12.209 - Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários*. (2ª ed.) Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1993). *NBR 7229 - Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Aisse, M. M. (1999). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo. En: Campos, J. R. (Coord.). *Tratamento e destino final do lodo gerado em reatores anaeróbios* (pp. 271 - 99). Rio de Janeiro: ABES.
- Aisse, M. M. (2000). *Sistemas econômicos de tratamento de esgotos sanitários*. Rio de Janeiro - RJ, ABES.
- Bares, M. E., Braga, S. M., Aisse, M. M., Noyola, A., & Braga, M. C. B. (2010). Avaliação da higienização térmica de lodo de estação de tratamento de esgoto In *XXXII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Punta Cana. Rep. Dominicana: AIDIS.
- Barrios, J. A., & Cabirol, N. (2002). Estabilización de lodos. En *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 28. Cancún, México, 27 - 31 de octubre. 10 p.
- Blank, A., & Hoffmann, E. (2011). Upgrading of a co-digestion plant by implementation of a hydrolysis stage. *Waste Management y Research*, 29(11), 1145-52.
- Cassini, S. T., Chernicharo, C. A. L., Andreoli, C. V., França, M., Borges, E. S. M., & Gonçalves, R. F. (2003). Hidrólise e Atividade Anaeróbia em Lodos. In: Servio Túlio Cassini (Coord.). *Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás* (pp. 11-52). Rio de Janeiro: ABES.
- Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama, Brasil). (2006). Resolução 375, de 29 de agosto de 2006. *Critérios e procedimentos para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências*. 32 p.
- Cortez, E. (2003). *Fundamentos de ingeniería para el tratamiento de biosólidos generados por la depuración de aguas servidas de la región*

metropolitana (Tesis de pregrado Ingeniería Civil). Universidad de Chile, Santiago de Chile.

Gonçalves, R. F., Luduvic, M., Von Sperling, M., Andreoli, C. V., Pegorini, E. S., & Fernandes, F. (2014). Remoção da Umidade de lodo de esgotos. In: Andreoli, C. V., Von Sperling, M. y Fernandes, F. (Ed). *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final* (pp. 157- 258). Belo Horizonte: UFMG.

Jordão, E. P., & Pessoa, C. A. (2014). *Tratamento de esgotos domésticos*. 7a ed. Rio de Janeiro: ABES.

Jacobs, L. W., & D. S. McCreary. (2001). *Utilizing biosolids on agricultural land. Extension bulletin E-2781*. Lansing MI, USA: Michigan State University.

Jiménez, B., Barrios, J. A., & Maya, C. (2001). *Estabilización alcalina de lodos generados en un tratamiento primario avanzado.*, Ciudad de México: Instituto de Ingeniería UNAM. 14 p.

Mahamud, M., Gutiérrez, A., & Sastre, H. (1996). Biosólidos generados en la depuración de aguas. I. Planteamiento del problema. *Ingeniería del Agua*, 3(2)47-62.

Metcalf y Eddy. (1991). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. Tchobanoglous, G. e Burton F.L. (Eds.), (3a ed.). New York: McGraw-Hill.

Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente. (30 agosto 2006). CONAMA nº 375: Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*. Brasília, 167, 141-146.

Possetti, G. R. C. (2015). Investigación Experimental de um Sistema Piloto de Secagem Térmica de Lodo Movido a Biogás. *28 Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Anais. Rio de Janeiro: ABES.

Samways, G., Aisse, M. M., & Andreoli, C. V. (2010). Tratamento do lodo de tanques sépticos combinados com esgoto sanitário bruto em reatores anaeróbios de manta de lodo em escala piloto In *XXXII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Punta Cana, Rep. Dominicana: AIDIS.

Samways, G., Barea, L. C., Busato, R., & Aisse, M. M. (2014). Concepção de Central de Recebimento de Lodo de Tanque Séptico (CRLTS) em Estações de Tratamento de Esgotos Domésticos In *XXXIV Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. México: AIDIS.

- Samways, G. (2015). *Estratégias de co-processamento de lodo séptico em ETES empregando Reatores UASB* (Tese Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná Paraná.
- USEPA (1993). *Method 3050B: Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Soils*. Washington, DC, EUA. Environmental Protection Agency.
- Velho, V. F. (2015). *Estudo da minimização da produção de lodo em sistemas de lodos ativados para esgotos sanitários* (Tese Doutorado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.
- Williford C., Chen WY., Shamas N.K., Wang L.K. (2007) Lime Stabilization. In: Wang L.K., Shamas N.K., Hung YT. (eds) *Biosolids Treatment Processes. Handbook of Environmental Engineering*. Humana Press, 6 (pp. 207-241).

4.2 HIGIENIZACIÓN DE LODOS ORIGINADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL

Raquel Pinheiro Pompeo y Miguel Mansur Aisse

En sus directrices para el destino seguro de residuos del tratamiento de aguas residuales, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda su utilización agrícola para minimizar las presiones causadas por el aumento de la población, degradación de los recursos hídricos, destino inadecuado de residuos y la creciente demanda de alimentos.

De este modo, las tecnologías disponibles para higienización del lodo buscan minimizar los riesgos de la transmisión de enfermedades cuya fuente de difusión son los recursos hídricos, por medio de la reducción de la concentración de patógenos, en niveles que aseguren su utilización agrícola sin restricciones. La mayoría de los países que poseen normas en cuanto a los aspectos sanitarios de la disposición agrícola del lodo relacionan varias tecnologías de procesamiento que, si se operan adecuadamente, son capaces de generar lodo con niveles de patógenos aceptables dentro de los criterios establecidos.

Según Bastos, Bevilacqua y Mara (2013), el enfoque brasileño no considera la dificultad del monitoreo de rutina para patógenos, el concepto de organismos indicadores ni la utilidad de variables de control operacional; por lo tanto, se hace necesaria la realización de investigaciones que verifiquen la eficacia de los procesos de higienización en la inactivación de organismos patógenos, así como el establecimiento de parámetros de control operacional, tales como pH, temperatura y tiempo de almacenamiento, de forma que puedan ser utilizados en la verificación de la eficacia del proceso, junto con análisis de laboratorio de organismos indicadores.

La concentración de patógenos en el lodo está directamente relacionada con el nivel de contaminación de la población, variando en función de las condiciones socioeconómicas y sanitarias de la misma. Otros factores están relacionados principalmente con la variabilidad de la cantidad y diversidad de patógenos presentes en el lodo, también, incluyen la naturaleza del agua residual y el tipo de tratamiento efectuado, así como la población atendida, las condiciones sanitarias y la región geográfica.

En Brasil, se generan en promedio, 5,4 mil millones de litros de agua residual, de los cuales, 8.400 millones son vertidos diariamente. Este dato fue publicado por el Neri (2007), con el apoyo del Sistema Nacional de Información sobre Saneamiento - SNIS, en un estudio que abarca el período de 2002 a 2007.

La situación brasileña, en cuanto a los datos referentes a la salud de la población, es críticos. Los índices de mortalidad de enfermedades relacionadas directamente a la falta de saneamiento básico y la pobreza en el país disminuyeron en las últimas décadas, sin embargo, los índices todavía son muy elevados. De acuerdo con la nota técnica del Instituto Oswaldo Cruz - IOC (2011), en los últimos 50 años el perfil epidemiológico general de Brasil cambió y el impacto de las enfermedades infecciosas que causan las muertes cayó en casi el 50% en la década de los 30 y al menos el 5% actualmente. Sin embargo, el impacto en términos de morbilidad e incapacidad para el trabajo sigue siendo muy elevado, incluso sin un panorama exacto y actualizado.

La estimación es que hay 93 millones de infectados por diversos agentes patógenos: 41,7 millones por *Ascaris*, 32,3 millones por *Ancilostoma* y 18,9 millones por *Trichuris* (Instituto Oswaldo Cruz, 2011). Los niños en edad escolar infectados por parasitosis intestinal son aproximadamente 15,4 millones. Se estima una prevalencia promedio del 30%, con una variación del 40% al 70%, dependiendo de la región (Instituto Oswaldo Cruz, 2011).

La alta incidencia de diarrea, responsable de la muerte de 1,5 a 2,5 millones de niños menores de 5 años y causantes de 900 millones de episodios de enfermedades al año (OPS, 2007), además, es consecuencia de la falta de tratamiento adecuado de las aguas residuales.

Patógenos encontrados en el lodo

Como muchos microorganismos patógenos están presentes en números muy bajos en el lodo de AR y también las técnicas de enumeración de microorganismos patógenos son difíciles y no confiables, los microorganismos indicadores adecuados se utilizan como sustitutos para medir el decaimiento de patógenos en el biosólido (Sidhu y Toze, 2009). Para que un organismo pueda ser utilizado como indicador de la calidad microbiológica de lodos, debe atender a diversos criterios, como estar presente en materia fecal, presentar incapacidad de multiplicarse fuera del organismo huésped, ser resistente a las condiciones ambientales y a los procesos de

tratamiento de lodo, estar asociado a la presencia de patógenos y ser de fácil detección y cuantificación.

El uso agrícola de lodo proveniente de aguas residuales domésticas es regulado a nivel federal por la Resolución CONAMA 375/06 (2006). En la Resolución se encuentran relacionados los procesos necesarios para la obtención de lodos de acuerdo con la calidad del lodo requerida, definida esencialmente por sus cualidades microbiológicas (ver Tabla 4.6) para los parámetros coliformes termotolerantes, huevos de helmintos viables, *Salmonella* sp. y los virus entéricos. Estos criterios se basaron en la normativa de la USEPA (2003), *Standards for the Use and Disposal of Sewage Sludge*.

Tabla 4.6 Clases de lodo o producto derivado por la presencia de agentes patógenos.

Clase	Coliformes Termotolerantes	Huevos de helmintos viables	Salmonella sp.	Virus	
Resolución CONAMA 375/2006	A	<10 ³ NMP/g de ST	< 0,25 huevos / g de ST	Ausencia en 10 g de ST	< 0,25 UFP o UFF / g de ST

Fuente: Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente (2006)

Nota: NMP: número más probable; UFP: unidad formadora de placa; UFF: unidad formadora de foco; ST: sólidos totales;

Estudio de Caso-Characterización microbiológica, prevalencia y viabilidad de huevos de helmintos viables en los lodos generados en la fosa séptica y el reactor UASB.

Metodología

En un estudio efectuado en el municipio de Fazenda Río Grande, ubicado en la Región Metropolitana de Curitiba, del Estado de Paraná, Brasil, se llevó a cabo un análisis en cuanto a la enumeración de coliformes termotolerantes, *Salmonella* sp., además, se caracterizó y se hizo el recuento de los huevos de helmintos en lodos generados en dos plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR Cachoeira y PTAR Fazenda Río Grande), así como en lodos provenientes de fosas sépticas. Los análisis comenzaron en abril de 2012.

Los lodos analizados fueron generados en procesos anaeróbicos que sanearon aguas de origen estrictamente doméstico, resultantes del tratamiento en reactores UASB. El lodo proveniente de la PTAR Cachoeira fue desaguado en lechos de secado (L_{UASB} 1), siendo que cada descarga de lodo permaneció en el lecho por aproximadamente 30 días, mientras que el lodo generado en la PTAR Fazenda Río Grande fue desaguado en centrífuga (L_{UASB} 2).

El lodo proveniente de fosas sépticas fue generado en diversos municipios de la Región Metropolitana de Curitiba, así como en la mayoría de las escuelas públicas del municipio de Almirante Tamandaré, en las cuales se llevó a cabo una confirmación previa de la presencia de un gran número de huevos de helmintos viables, utilizando el Laboratorio de Parasitología de la UFPR. El lodo fue transportado por camiones y descargado en el espesador de la PTAR Fazenda Rio Grande, siendo adaptada en este espesador una rejilla con aberturas de 10 mm, a fin de retener piedras y el material grueso que pudiera estar contenido en el lodo, para luego ser sometido al proceso de centrifugado.

El recuento de Coliformes Termotolerantes y *Salmonella* sp. efectuado tanto en las muestras de lodo proveniente de las PTARs como de tanques sépticos se efectuó mediante la técnica de tubos múltiples, de acuerdo con lo estipulado en la norma CONAMA 375/2006. El método utilizado para el conteo de huevos de helmintos viables contenidos en los lodos provenientes de AR fue el de Yanko (1989), modificado por Thomaz-Soccol, et al. (2000); de esta forma, los resultados se expresan como el número de huevos por gramo de materia seca. Finalmente, de manera simultánea se llevó a cabo la obtención del pesado de la materia seca resultante.

Resultados

En los resultados obtenidos, el recuento inicial de Coliformes Termotolerantes en los lodos provenientes de tanques sépticos fue del orden de 10^5 NMP/g ST, lo cual cae dentro del rango reportado por Ingunza, et al. (2009) [10^4 - 10^8 NMP/g ST], para lodos provenientes de tanques sépticos ubicados en diversas regiones de Brasil, y por Da Silva Jr. et al. (2015) [10^5 - 10^7 NMP 100 mL⁻¹] en lodo séptico de la región metropolitana de Goiânia. Esta concentración es inferior a la encontrada por Santos (2010) y Ratis (2009), quienes detectaron densidades variando de 10^6 y 10^7 NMP / g ST en lodo séptico de la ciudad de Natal (RN) y también Gonçalves (2008)

quien encontró concentraciones en el orden de entre 10^6 y 10^7 UFC/100 ml. La concentración inicial de la bacteria se encontraba en el orden de 10^5 NMP / g ST en el lodo desaguado en lechos de secado, similar al encontrado por Correia (2015) en lodos activados desaguados en lecho de secado por 3 meses en PTAR localizada en el Estado de Bahía. Almeida, et al. (2006) encontraron $1,3 \times 10^7$ NMP de coliformes termotolerantes en lodo oriundo de reactor UASB, que permaneció durante tres meses en el lecho de secado para la deshidratación, en la PTAR ubicada en el Estado de Paraná.

En el lodo $L_{UASB}2$ la concentración inicial de coliformes termotolerantes era de 10^6 NMP / g ST, con un 70% de humedad, valores inferiores a los reportados por Bastos, et al. (2013), en concentraciones típicas de lodos procedentes de UASB, de las órdenes de 10^7 - 10^8 NMP / g ST.

Además, el desaguado del lodo del reactor UASB en lechos de secado por 30 días contribuyó en la reducción de dichos valores, en relación con los típicos encontrados en el lodo estudiado en el presente trabajo.

Los resultados de las muestras de lodo séptico en la implantación del experimento para el parámetro Salmonella no se consideraron debido a la adaptación del laboratorio y problemas con la dilución de las muestras. En los análisis, correspondientes a cuatro semanas, la densidad de la bacteria varía de 4 NMP / g ST (16 NMP / 4 g de ST) a 21,5 NMP / g ST (86 NMP / 4 g ST). Se han reportado resultados superiores (Ingunza, et al., 2009) en lodo séptico, variando de 10^2 a 10^4 NMP / g ST. El recuento inicial de Salmonella en el lodo del reactor UASB fue de 33,47 NMP / g ST.

Las concentraciones elevadas fueron las reportadas por Espericueta y González (2008) en lodo de una PTAR de Juárez, México, en el orden de 10^{13} NMP / g ST, y Jiménez, et al. (2000), en el mismo país, en las PTAR en la Ciudad de México, con concentraciones del orden de 10^{10} NMP/g ST. En Brasil, densidades elevadas fueron obtenidas por Santos (2011), $1,82 \cdot 10^7$ UFC/g ST, en una PTAR, situada en Bahía. Una discusión más profunda de este tema se puede encontrar en Pompeo, Aisse y Andreoli (2015).

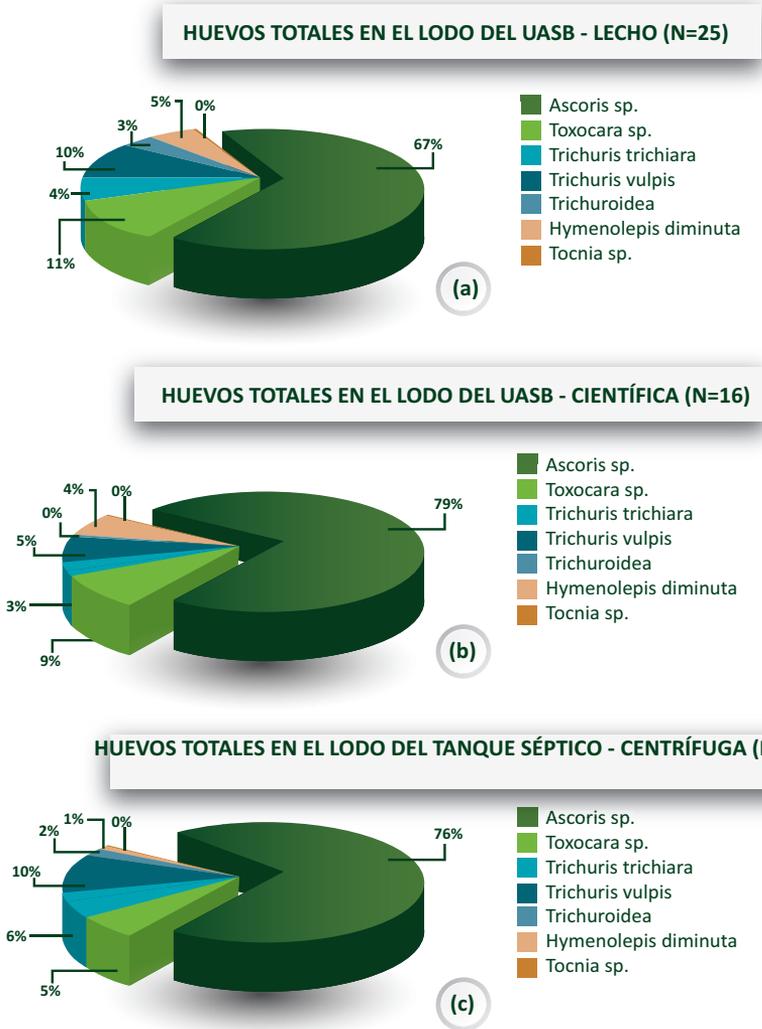
Al comparar la frecuencia y el recuento de *Salmonella sp.*, en las muestras analizadas en este estudio, con los valores de esa bacteria en estudios realizados en otras regiones del país, se verificó una elevada variabilidad en los resultados. Estas diferencias, como se mencionó anteriormente, pueden ser explicadas por: las diferencias en las condiciones socioeconómicas y sanitarias de la población, y por la posible contaminación de la misma;

por la región geográfica; por la diversidad de patógenos presentes en el lodo; por la naturaleza del agua residual y el tipo de tratamiento efectuado. Además, diferentes compuestos orgánicos e inorgánicos encontrados en los lodos pueden actuar como inhibidores o incluso como promotores del crecimiento bacteriano. La digestión anaerobia presenta una eficiencia variable en la remoción de *Salmonella sp.*, y en la mayoría de las veces, los lodos así tratados contendrán el microorganismo.

La fauna parasitaria encontrada en los lodos generados en tanques sépticos la componen: *Ascaris sp.*, *Toxocara sp.*, *Trichuristrichiura*, *T. vulpis*, *Trichuroidea* y *H. diminuta e Taenia sp.* huevos de *Ascaris sp* fueron encontrados en el 100% de las muestras analizadas, con mayor prevalencia sobre los demás helmintos (ver Figura 4.5). La prevalencia de los huevos de *Ascaris sp* sobre los demás parásitos fue como se esperaba.

Como ya se mencionó, los huevos de *Ascaris sp* fueron encontrados en el 100% de las muestras analizadas que presentaron huevos viables, con mayor prevalencia sobre los demás helmintos, lo cual era esperado, en virtud de la mayor resistencia de esos huevos en el ambiente (Sidhu & Toze, 2009). Los huevos de *Ascaris sp.*, seguido de huevos de *Toxocara canis*, son más resistentes a los diferentes tratamientos empleados, debido a su gruesa cáscara o envoltura. Esta característica del *Ascaris*, que los diferencia entre los helmintos, los convierten en un organismo indicador de la sanidad de los lodos provenientes de AR. En la Figura 4.5 se presentan los resultados de las medias para las prevalencias de los tipos de helmintos, en porcentaje (%) de las muestras.

Figura 4.5 Prevalencia por especie de huevos de helmintos en el recuento de huevos totales efectuado en lodos: (a) generados en reactores UASB y deshidratados en lechos de secado; (b) generados en reactores UASB y deshidratados con centrifugadora, y (c) generados en tanques sépticos.



Nota: N - número de muestras.

Fuente: los autores.

Los resultados obtenidos reflejan el parasitismo de la población residente en la Región Metropolitana de Curitiba. La prevalencia encontrada en los análisis efectuados a lodos generados en tanques sépticos fue: *Ascaris sp.* (75-81%), *T. vulpis* (7-13%), *Trichuris trichiura* (5-7%), *Toxocara sp.* (4-7%), *H. diminuta* (1-2%), *Trichuroidea* (0-1%) y *Taenia sp.* (<1%). En estos lodos, el mayor número de huevos totales encontrados fue 20,32 huevos totales, y de estos, 6.04 viables, siendo 91.7% de *Ascaris sp.*

En los lodos provenientes de reactores UASB, la prevalencia encontrada fue de: *Ascaris sp.* (79-89%), *T. vulpis* (4-5%), *Toxocara sp.* (1-9%), *Trichuris trichiura* (2-5%), *Trichuroidea* (<1%), *H. diminuta* (1-5%) y *Taenia sp.* (<1%). Se encontró también una prevalencia significativa de *Trichuris trichiura* que tiene su presencia asociada a *Ascaris lumbricoides*, como lo reportado por Leles et al. (2010), O'lorcain y Holland (2000).

Mayor cantidad de *Trichuris sp.* podrían estar presentes en el afluente de AR, teniendo en cuenta que esos huevos son más sensibles a la desecación y no sobreviven por tiempo prolongado en humedades bajas. Además, se observó la presencia de *Trichuris vulpis* y *Toxocara sp.* (con menor viabilidad), parásitos fundamentalmente de perros, siendo el hombre considerado huésped accidental. La técnica utilizada posibilita la recuperación de otros huevos como *Toxocara sp.*, que tienen una densidad similar a la de *Ascaris sp.* y *Trichuris sp.*, ya que su forma ovalada posibilita que se queden retenidos en el tamiz.

El parásito *Taenia sp.* estuvo presente en pocas muestras. Cabe señalar que las técnicas comúnmente utilizadas se basan en sedimentación y/o fluctuación, siendo estas satisfactorias para los huevos de nematodos, sin embargo, para los huevos de *Taenia sp.* son poco eficientes, ya que por el menor tamaño de estos no pueden quedar retenidos en el tamiz.

El *Hymenolepis diminuta* fue encontrado con frecuencia en las muestras, pero en pequeñas concentraciones y baja viabilidad. Este parásito se hospeda principalmente en ratas, mismas que están presentes en el alcantarillado urbano y también en las PTARs. La presencia de perros y ratas en las PTARs es frecuente, con probable contaminación del lodo almacenado. La especie que se hospeda en el hombre, *Hymenolepis nana*, puede utilizar pulgas como hospedero intermedio, aumentando las posibilidades de existencia de este parásito en lugares donde hay mayor presencia de perros y gatos.

Cabe resaltar que la no identificación de otros tipos de huevos en el lodo puede ser derivada de algunas enfermedades que no son endémicas de la región donde los lodos fueron recolectados, estando estos presentes en las heces de la población contribuyente.

Hay poca información sobre el comportamiento y la fauna helmíntica en los diferentes procesos de tratamiento de aguas residuales y en el lodo resultante de estos tratamientos. Jiménez-Cisneros (2007) cita que la mayor parte de la información relacionada con los helmintos en el lodo es sobre el *Ascaris* y no refleja situaciones reales en países en desarrollo, donde los huevos de otras especies de helmintos son comunes, lo que quedó evidenciado en los resultados obtenidos en esta y en otras investigaciones en Brasil, reportadas por este trabajo y por Paulino, et al. (2001).

A pesar de estar en cantidades diferentes, la fauna parasitaria encontrada en el lodo fue la misma, teniendo como origen diferentes localidades que forman parte de la Región Metropolitana de Curitiba. Parte del lodo séptico utilizado en la investigación fue oriundo de escuelas públicas de Almirante Tamandaré, con elevado número de huevos de helmintos. Los huevos de *Ascaris sp.* predominan debido a sus características, ya relacionadas a lo largo del trabajo, sin embargo, la presencia de los huevos de los parásitos detectados es importante para fines sanitarios y ambientales.

Procesos de higienización de lodos provenientes de AR

Durante la etapa de estabilización del lodo ocurre una reducción significativa de patógenos, sin embargo, hay necesidad de una etapa posterior de tratamiento. El principal objetivo de la higienización del lodo es la eliminación o reducción de la densidad de microorganismos patógenos para que sea destinado adecuadamente para usos diversos.

Los estudios nacionales e internacionales han sido conducidos con el propósito de perfeccionar la técnica de higienización del lodo, buscando adaptar condiciones locales del área de estudio, así como la viabilidad económica. Estos incluyen procesos térmicos, compostaje, caleación o estabilización alcalina prolongada, digestión anaeróbica mesofílica, digestión aeróbica termofílica, secado y almacenamiento, almacenamiento del lodo líquido e irradiación, entre otros.

Higienización alcalina

En el proceso de higienización adoptado por el Estado de Paraná - Brasil, empleado por la Compañía de Saneamiento del Estado (SANEPAR), el lodo de AR pasa por estabilización alcalina prolongada (Andreoli, et al., 2001, Bittencourt, et al., 2013).

En la higienización, la cal se añade al lodo ya desaguado a través de equipos especiales de mezcla; el anterior, es un proceso de higienización que resulta de la mezcla de la cal virgen (CaO) o cal hidratada [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] con el lodo, con variaciones de dosis del 30% al 50% de su masa seca. Sin embargo, la cal virgen es más utilizada en ese proceso debido a su reacción exotérmica con el agua, pudiendo la mezcla del lodo con la cal alcanzar una temperatura superior a 50 °C, lo suficientemente alta para permitir la inactivación de los patógenos. El contacto de la cal con el agua libre del lodo provoca una reacción exotérmica, ocasionando aumentos de temperatura cercanos a 60 °C durante el choque alcalino, seguidos por elevación del pH a niveles superiores a 12 y posterior actuación del amoníaco formado a partir del nitrógeno. La inactivación de los organismos patógenos en procesos de caleación es resultado de los efectos de la elevación del pH, temperatura, y de la liberación de amoníaco.

En función del grado de hidratación del lodo, se verifica la conveniencia de aplicación de la cal virgen o cal hidratada en su descontaminación. La cal hidratada es más empleada en el lodo líquido como "leche de cal", lo que facilita las reacciones entre los sólidos del lodo y la cal en el tanque de mezcla.

Los indicadores para la caleación son: la cantidad y la calidad de la cal utilizada, el pH, el tiempo y las condiciones de almacenamiento. Estos parámetros se señalan como los principales factores asociados a la eliminación de los parásitos del lodo en el proceso de caleación. Los patrones de contaminación biológica exigidos en la Instrucción Normativa del Instituto Ambiental del Paraná - IAP (PARANÁ, 2009) se alcanzan con la caleación al 50% del peso seco, cuando el proceso eleva el pH del lodo a niveles por encima de 12 y se mantiene cerca a este durante el período de curación mínimo de 30 días, idealmente en patio cubierto.

Adicionalmente, la cal minimiza olores generados por lodos, promoviendo una mayor estabilización de los procesos biológicos. La caleación (CaO) es un proceso de fácil aplicabilidad y bastante eficiente, generando un

producto alcalino de alta reactividad, en condiciones de corregir la acidez del suelo para fines de uso agrícola.

Los óxidos e hidróxidos de Ca y Mg que constituyen al lodo poseen una velocidad de reacción más rápida comparada a los carbonatos de Ca y Mg, constituyentes de cal, que normalmente se utiliza como correctivo de acidez de suelos agrícolas.

Los lodos obtenidos quedan almacenados en patios cubiertos (Figura 4.6), en las PTAR, hasta su destino final.

Figura 4.6 Patios de almacenamiento del lodo



Fuente: los autores

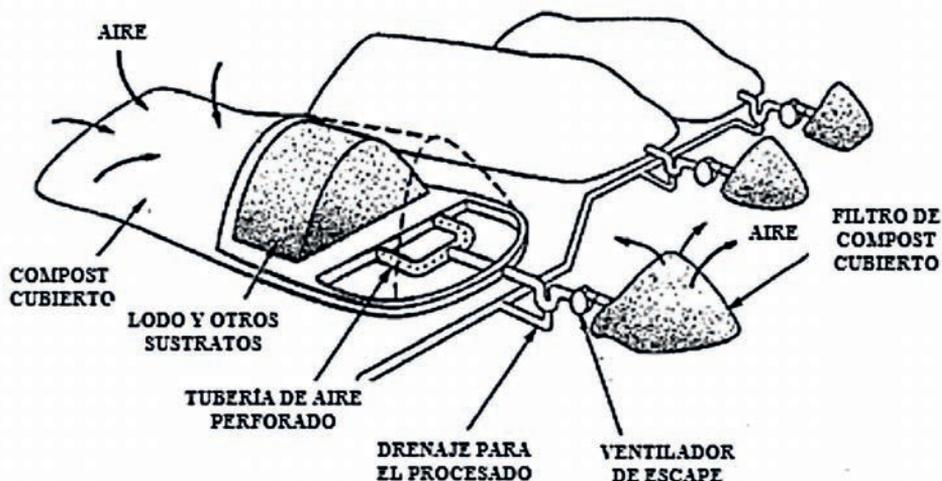
Compostaje

El compostaje como tratamiento higienizante es un proceso comúnmente utilizado en la higienización del lodo, debido principalmente a los bajos costos. Su empleo es reportado en países como EUA, Francia (Pourcher, et al., 2005), China (Zhang, 2011), y Eslovaquia (Szabová, et al., 2010) (ver Figura 4.7).

Este proceso puede ser definido como una biooxidación aeróbica exotérmica de un sustrato orgánico heterogéneo, en el estado sólido, que se caracteriza por la producción de CO_2 , agua, liberación de sustancias minerales y formación de materia orgánica estable. Los componentes

orgánicos biodegradables atraviesan sucesivas etapas de transformación bajo la acción de diversos grupos de microorganismos, resultando en un proceso bioquímico altamente complejo. Una variable del compostaje es el vermicompostaje o lombricultura de residuos orgánicos que implica la acción de las lombrices sobre el residuo orgánico.

Figura 4.7 Compostaje en pilas estáticas



Fuente: Metcalf e Eddy (1991).

Los factores más importantes que interfieren en el proceso de degradación de la materia orgánica son la aireación, los nutrientes, la humedad y la temperatura. La temperatura es importante tanto en la velocidad del proceso de biodegradación como en la eliminación de patógenos, debido a la actividad biológica por tratarse de un factor independiente.

En los procesos de alta tasa, como la digestión anaeróbica y el compostaje, la temperatura y el tiempo son los factores con mayor influencia en la destrucción de patógenos y la desecación es importante en el caso de secado pasivo del lodo por aire.

Higienización de lodo por almacenamiento prolongado

El uso agrícola del lodo requiere la verificación de los parámetros de calidad definidos en la Resolución CONAMA 375/06. En general, los lodos producidos

en Brasil presentan indicadores sanitarios, como huevos de helmintos viables, coliformes termotolerantes, *Salmonella sp.* y Virus que sobrepasan los parámetros, requiriendo, por lo tanto, la adopción de métodos de higienización. Por otro lado, se ha observado que lodos almacenados por largos períodos pueden presentar indicadores biológicos dentro de los estándares definidos por la Resolución CONAMA 375/06.

El almacenamiento prolongado es un proceso que prevé la reducción de patógenos en el lodo a través de la desinfección natural. Entre las principales ventajas asociadas destacan el bajo costo de inversión, la simplicidad operativa, el bajo consumo de energía y productos químicos. Para uso en la agricultura, los componentes del lodo sustituyen parte de los nutrientes y de la materia orgánica, necesarios para los cultivos; de esta forma, pueden ser insumos agrícolas que traen beneficios económicos, mejoras para el suelo y para la productividad de cultivos.

Estudio de Caso

Esta investigación aborda la influencia del almacenamiento prolongado de lodo en diferentes condiciones operativas, en el decaimiento de coliformes termotolerantes, *Salmonella* y huevos viables de *Ascaris*, buscando el reciclaje agrícola en dos municipios con condiciones climatológicas distintas, Curitiba y Apucarana.

El conteo de los microorganismos fue monitoreado en el lodo de la fosa, en el tanque séptico y lodo del reactor UASB desaguado por los lechos de secado y centrifugado.

Debido al gran volumen necesario para la investigación, los lodos fueron generados por un tiempo aproximado de dos meses, obtenidos en la Región Metropolitana de Curitiba (Paraná, Brasil), antes de la implantación del experimento, formando tres lotes distintos. Parte de este lodo fue transportado al municipio de Apucarana, suficiente para montar 9 unidades experimentales con lodo séptico junto con el mismo volumen de lodo de UASB, desaguado en lechos de secado. Los tratamientos experimentales realizados permitieron observar el comportamiento de los lodos en relación a su higienización y secado, a través de diferentes factores aplicados, o sea, la influencia de esos procesos en la inviabilización de los huevos de helmintos. Se evaluó la influencia del revolvimiento en ambas estaciones y de la cobertura solamente en la Fazenda Rio Grande.

En la PTAR Granja Río Grande se implantaron 12 tratamientos con 3 tipos de lodo (UASB desaguado en lecho y en centrífuga y tanque séptico desaguado en centrífuga), evaluando la influencia de la cobertura y de la mezcla, cada tratamiento tuvo 4 repeticiones.

Los materiales fueron dispuestos en cajas de madera de 1,0 m de ancho, 2,0 m de longitud y 0,50 m de altura, con control automático de la temperatura (ver Figura 4.6). El cambio fue realizado manualmente (ver Figura 4.8), con frecuencia semanal en los dos primeros meses y quincenal en los demás.

Las colectas fueron realizadas en la implantación del experimento (0), en 4, 9, 13, 17, 30, 43, 61 y 104 semanas. Las muestras fueron recolectadas en tres puntos de las cajas desde la superficie hasta el fondo y luego homogeneizadas formando una muestra compuesta.

Se analizaron las concentraciones de huevos de helmintos viables, *Salmonella* sp. y coliformes termotolerantes.

El perfil de temperatura en la masa de lodo de las unidades experimentales fue monitoreado a través de sensores conectados a un datalogger, así como a temperatura ambiente y humedad relativa del aire. Los datos meteorológicos también fueron proporcionados por el SIMEPAR - Sistema Meteorológico de Paraná.

La investigación de almacenamiento prolongado de lodo se realizó en dos municipios del Estado de Paraná (Brasil), en Fazenda Rio Grande - Región Metropolitana de Curitiba y Apucarana, Norte del Estado, en las Plantas de Tratamiento de las aguas residuales (PTAR) de la Compañía de Saneamiento del Paraná (SANEPAR) denominadas PTAR Granja Río Grande (PTAR FRG) y PTAR Barra Nova. Las principales diferencias entre las dos ciudades se refieren a la ubicación geográfica y la condición climatológica, lo que determinó la elección de los lugares para el desarrollo de los pilotos.

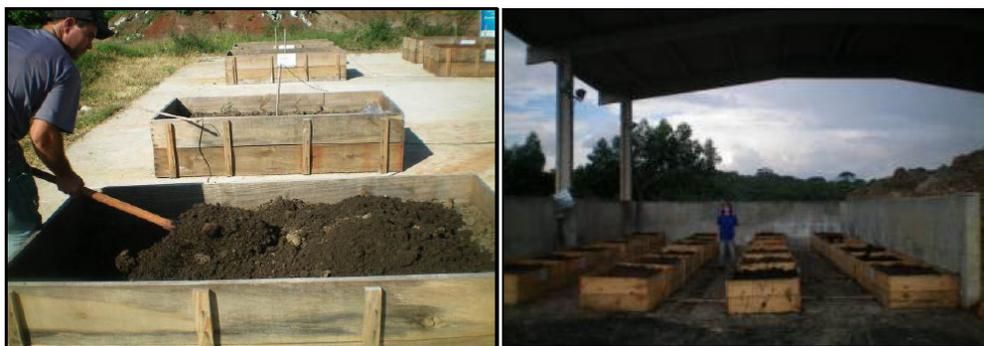
Metodología

En total se realizaron 18 tratamientos de lodos, sintetizados en la Figura 5, sin embargo, en los tratamientos llevados a cabo en Apucarana, bajo patio cubierto, no se realizaron repeticiones, se evaluaron solo dos unidades experimentales, una de lodo séptico y la otra de lodo del lecho del UASB, ambas sin mezcla.

Mezcla y Cobertura

La mezcla de las unidades experimentales, sometidas a este proceso, fue realizada durante dos años, siendo la frecuencia semanal en los tres primeros meses y después de este período cada 14 días, en las dos localidades. Este procedimiento operativo se realizó manualmente (Figura 4.8) durante un mínimo de 15 minutos en cada unidad. Para evaluar la influencia de la cobertura en la higienización de los lodos se realizaron tratamientos en patio cubierto (Figura 4.8) y bajo cielo abierto, en el municipio de Fazenda Río Grande, y en patio descubierto en el municipio de Apucarana.

Figura 4.8 Patio experimental en Apucarana y Fazenda Río Grande: (a) revoltura manual del lodo utilizando pala o azada; (b) patio cubierto utilizado para el almacenamiento de lodo.

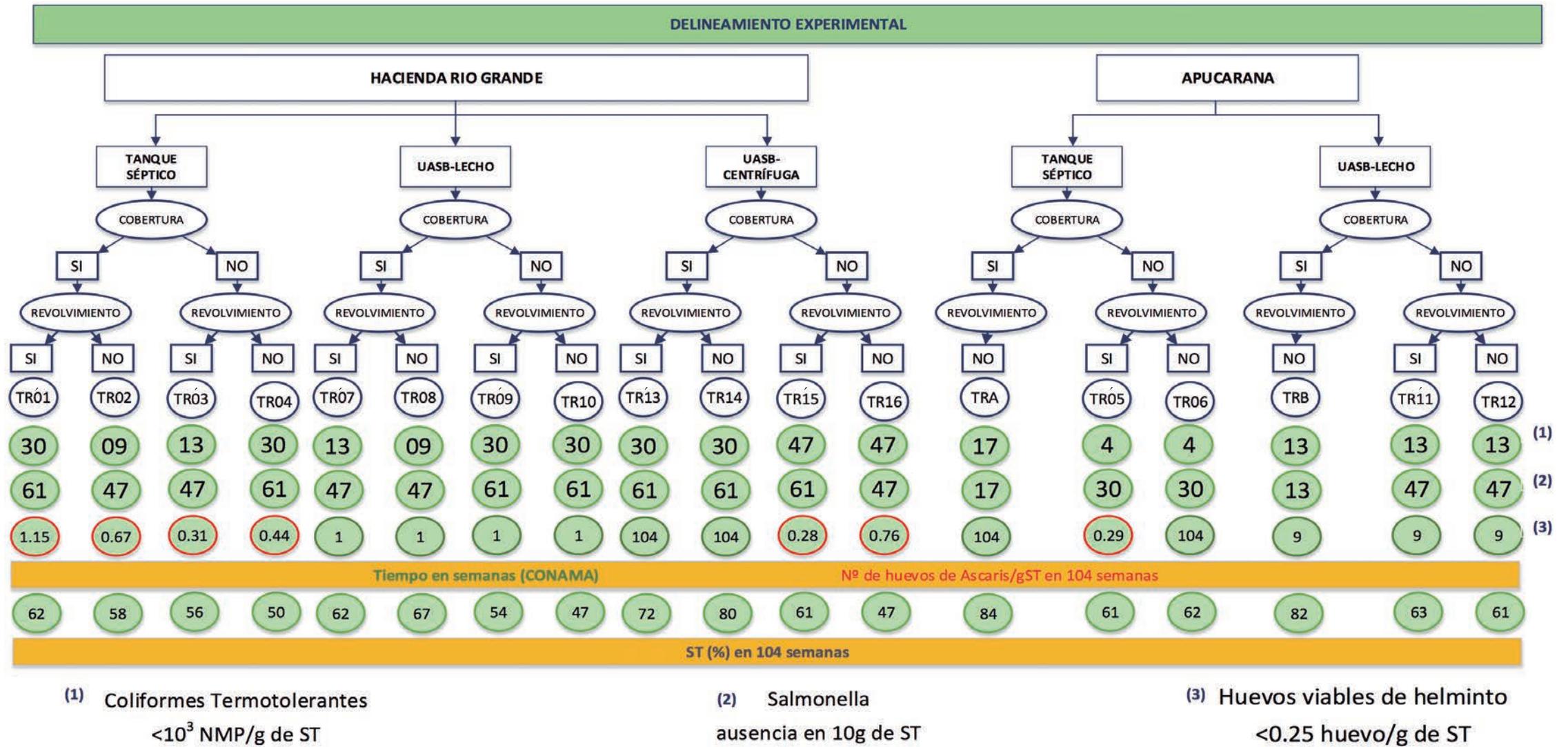


Fuente: Autores

Resultados

En la Figura 4.9 se presenta el delineamiento experimental junto con los resultados finales obtenidos después de 104 semanas (2 años) de monitoreo del lodo, tiempo para que los indicadores biológicos alcancen los estándares definidos por la Resolución CONAMA 375/2006 para tratamiento en los municipios.

Figura 4.9 Flujoograma de los tratamientos realizados en el experimento de almacenamiento prolongado de lodo y tiempo para que los indicadores biológicos alcancen los estándares definidos por la Resolución CONAMA 375/2006.



Nota: TR – Tratamiento
Fuente: Autores

La reducción en el número de huevos viables de *Ascaris* en Fazenda Río Grande ocurrió de forma lenta a lo largo del tiempo. Entre los resultados obtenidos, la mejor condición metodológica en la inviabilización de huevos de *Ascaris* en lodo séptico fue en el tratamiento realizado en Apucarana, a cielo abierto, que pasó por el proceso de revolución. Este tratamiento TR5, tuvo un 99,67% de eficiencia, con una reducción de 2,33 a 0,01 huevo viable por gramo de materia seca, después de 2 años de almacenamiento, atendiendo al estándar establecido por la Resolución CONAMA 375/2006. En TR6 la eficiencia fue de 91,70%, disminuyendo de 3,38 a 0,28 huevos viables, muy cerca de la condición de higienización contenida por la Resolución. En 11 meses de almacenamiento del lodo (Pompeo, et al., 2014) la reducción de viabilidad para los huevos de helmintos en estos tratamientos era del 43,9% (TR5) y del 59,63% (TR6). Los huevos de *Ascaris sp* fueron encontrados en el 100% de las muestras analizadas con mayor prevalencia sobre los demás helmintos, como era el esperado en virtud de su mayor resistencia.

El aumento del contenido de sólidos totales (ST) en el lodo promovió la reducción de los organismos patógenos evaluados por los resultados obtenidos. El mayor contenido de sólidos totales alcanzado en los lodos en FRG fue 80% ST en lodo centrifugado, bajo cubierta. En los tratamientos realizados aisladamente en Apucarana (tanque séptico y lecho, bajo cubierta) el contenido de sólidos totales alcanzado fue de 84 y 82%, respectivamente. En los tratamientos bajo estas condiciones, el lodo fue higienizado para todos los parámetros estudiados: viabilidad de huevos de helmintos, concentración de *Salmonella sp.* y coliformes termotolerantes. Los contenidos por encima del 90% que inviabilizan la sobrevivencia de patógenos (Yeager & O'brien, 1983, Lima, 2010) no se alcanzaron.

El tiempo de almacenamiento de dos años, como método de higienización de lodo de tanque séptico, no fue suficiente para la inviabilización de huevos de *Ascaris sp.* en todos los tratamientos. La ausencia de *Salmonella sp.* en 10g ST ocurrió en hasta 13 semanas en los tratamientos realizados en Apucarana y en 61 semanas en los tratamientos realizados en Fazenda Río Grande. La reducción de coliformes termotolerantes, en concentraciones inferiores a 10^3 NMP/g ST, fue obtenida también en 13 semanas en los tratamientos realizados en el municipio de Apucarana y en 30 semanas en los tratamientos realizados en Fazenda Río Grande, en atención a la Resolución CONAMA 375/2006, para el reciclaje agrícola de lodo.

Para los lodos procedentes de un reactor UASB con bajas concentraciones de huevos de helmintos viables (hasta 3 huevos viables/g ST), el almacenamiento prolongado como método de higienización fue eficiente en la inviabilización de huevos de helmintos, destrucción de *Salmonella sp* y reducción de coliformes termotolerantes en valores en atención a la Resolución CONAMA 375/2006, para el reciclaje agrícola de lodo. El tiempo necesario para obtener el lodo higienizado fue de 61 semanas, teniendo como parámetro limitante a *Salmonella sp*.

Para los lodos generados en reactor UASB con concentraciones de huevos de helmintos viables entre 3 y 10 huevos/g ST, los tratamientos realizados bajo cobertura alcanzaron valores que atiende al límite máximo estipulado por la Resolución CONAMA 375/2006 para lodo Clase A después de dos años de almacenamiento. Los dos tratamientos presentaron los niveles más altos de sólidos totales, 72% y 80%, entre los 18 tratamientos realizados.

La lluvia tuvo una fuerte influencia en la variación de humedad en los lodos de UASB centrifugados, siendo observada menor pérdida de humedad en los dispuestos en patio descubierto en los meses con mayor índice pluviométrico, principalmente en los primeros meses en FRG.

Entre las localidades, la bacteria coliforme termotolerante se mostró más sensible a las condiciones ambientales de Apucarana cuando fueron expuestas a cielo abierto. En cuanto al factor cobertura, el decaimiento de los coliformes fue más rápido en los tratamientos realizados bajo cobertura, comparados con los expuestos a cielo abierto en la Fazenda Río Grande en lodo de UASB, desaguados de diferentes formas.

En cuanto al factor de rotación, el decaimiento de la bacteria coliforme termotolerante fue similar en ambas condiciones, con y sin rotación, no presentándose como un diferencial en el tiempo de decaimiento de las bacterias. Los tratamientos realizados en Apucarana fueron más eficientes en la inviabilización de los huevos de helmintos comparados a los de Granja Río Grande, utilizando lodo de fosa y tanque séptico. Al final del experimento solo el TR5 (revuelto a cielo abierto) alcanzó valor inferior a 0,25 huevo viable por gramo de ST. La densidad en TR6 (sin rotación, a cielo abierto) fue de 0,28 huevo viable por gramo de ST.

Los tratamientos realizados en patio descubierto con lodo séptico se mostraron más eficientes que los realizados en patio cubierto, al contrario de

lo ocurrido con el lodo de UASB centrifugado en la reducción de los huevos viables de *Ascaris*. En los tratamientos con lodo de UASB centrifugado, TR13 (cubierto, revuelto) y TR14 (cubierto, sin mezcla) se alcanzaron concentraciones inferiores a 0,25 huevo viable / g ST y el contenido de sólidos totales (ST) era del 72% y 80 %, respectivamente. El factor determinante en la inactivación del patógeno fue la reducción de la humedad a niveles superiores al 70%. La densidad de los patógenos al final fue menor en los tratamientos en patio descubierto, muy cerca del estándar CONAMA 375/2006 para uso agrícola de lodo clase A (1 huevo viable / 4 gST).

En cuanto al factor de mezcla, estadísticamente no se señalaron diferencias significativas con ninguno de los tres tipos de lodo, sin embargo, con lodo de fosa séptica, el TR5 se mostró más eficiente que el TR6, ambos tratamientos realizados bajo condiciones similares, en patio descubierto en Apucarana, teniendo como diferencia el revolvimiento, realizado en TR5. El contenido de ST al final estaba muy cerca en los dos tratamientos, aproximadamente el 62%.

Los tratamientos realizados en Apucarana fueron más eficientes en relación con los realizados en Fazenda Río Grande. La pérdida de humedad fue más acentuada en Apucarana debido a las diferencias climatológicas, como la temperatura ambiente más elevada, menor humedad relativa del aire y mayor insolación, la mayor parte del tiempo a lo largo de los dos años de monitoreo, así como la temperatura de la masa del agua, el lodo fue más elevado en los tratamientos realizados en este municipio.

El período de 24 meses de almacenamiento de lodo séptico no fue suficiente para la inviabilización de huevos de *Ascaris*, estando los números por encima del estándar establecido por la Resolución CONAMA 375/06. Este lodo no estaría apto para ser aplicado en la agricultura, observando que la aplicación de lodo proveniente de fosas y tanques sépticos aún no está permitida en el país según la resolución del CONAMA. En el lodo del reactor UASB, desaguado en lecho de secado, el patrón definido en la Resolución para lodo clase A fue alcanzado en todos los tratamientos para huevos de *Ascaris*, en 9 semanas de almacenamiento. El lodo del reactor UASB desaguado en centrífuga presentó una contaminación inicial de huevos de *Ascaris* viables en promedio de 5 huevos por gramo, pero siempre por debajo de 10. Fueron necesarios dos años de almacenamiento para que los lodos con cobertura alcanzaran el valor definido por la Resolución, sin embargo, para los tratamientos sin cobertura no se alcanzó, incluso después de dos años de almacenamiento.

Higienización en lechos de secado

La deshidratación de lodo en lechos de secado es una técnica bastante difundida, siendo una de las primeras usadas para la separación sólido-líquido del lodo. Estos se destacan por su simplicidad de operación y mantenimiento; asimismo, factores climáticos como precipitación, insolación y vientos pueden interferir en el ciclo de secado, en las diferentes regiones del país, además de la humedad inicial del lodo. Sin embargo, este proceso es bastante atractivo, incluso para las regiones templadas del sur, donde las condiciones climáticas no son tan favorables. Aisse & Andreoli (1999) y Bueno (2001) describieron tiempos de ciclo de deshidratación para lodo anaeróbico, criterios de diseño y operación para lechos de secado.

La Norma Brasileña de tratamiento de aguas residuales (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011) cita que la carga de SST en el lecho no debe exceder de 15 kg / m², este valor indica una altura de lodo la cual, en la práctica se acerca a la altura de 50 cm, límite del muro de contención del lecho.

El *Ascaris lumbricoides* es el parásito más frecuentemente encontrado en la población y principal indicador de la sanidad del lodo de alcantarilla. Los principales factores relacionados con este aspecto son la amplia distribución geográfica; la alta frecuencia del parasitismo en la población en diferentes partes del mundo; mayor capacidad de resistencia a las condiciones del medio; baja dosis infectante y ausencia de inmunidad específica permanente en el huésped.

Estudio de caso

El objetivo de este trabajo fue evaluar la higienización de lodo anaeróbico desaguado en lechos de secado, construidos a escala piloto.

Materiales y métodos

El experimento fue conducido en la Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) Menino Deus, de la Empresa de Saneamiento del Paraná (SANEPAR), ubicada en el Municipio de Quatro Barras, Región Metropolitana de Curitiba (PR, Brasil). El clima, según la clasificación de Köppen es del tipo Cfb, clima subtropical húmedo mesotérmico, con veranos frescos y ocurrencia de heladas severas y frecuentes, no presentando estación seca. La temperatura media de los meses más cálidos es inferior a 22°

C y debajo de 18°C en los meses más fríos (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba, 2013). La PTAR trata un caudal de 63 L/s, correspondiente a 51.090 habitantes, y opera con tratamiento preliminar compuesto de rejilla, desarenador y canal parshall, un reactor tipo UASB y una laguna facultativa aerada (Ross, et al., 2015).

El lodo de los reactores anaerobios fue encaminado a cinco lechos de secado, cada uno con dimensiones de 17 x 10 m y 0.50 m de profundidad. Una de las cámaras de secado fue modificada para atender al proyecto, el cual se subdividió áreas menores de 5 x 3 m, ahora denominadas L1 y L2 (Figura 4.10a). Para la descarga del lodo anaerobio se utilizó la tubería existente en la PTAR, y en el momento del llenado del lecho de secado se realizó el muestreo del lodo líquido (Figura 4.10b). En L1 la altura del lodo fue de 37 cm y en el L2 la altura fue 44 cm. Se evaluó el contenido de sólidos totales y huevos de helmintos viables el primer día. Después del período de 27 días (ciclo de secado), se tomaron muestras simples en 4 puntos a lo largo de toda la profundidad, para formar una muestra compuesta representativa del lecho de secado. La altura del lodo después de la deshidratación era de 7 cm en L1 y la de 12 cm en L2. El líquido drenado de los lechos retornó al inicio del tratamiento en la PTAR sin ser analizado.

Figura 4.10 Lechos de secado piloto: (a) subdivisión-lechos L1 yL2; (b) llenado del lecho 1 (año 2012)



Fuente: Autores

Lodo inoculado con huevos de helmintos

En 2015, el lecho de secado localizado en la PTAR pasó por otro proceso de división, seis lechos de 50 x 50 cm (ver Figura 4.10a). La división fue hecha en albañilería y posibilitó la evaluación de diferentes tasas de aplicación de sólidos al mismo tiempo. Cada lecho recibió una capa extra de arena de recubrimiento, con un grosor de 5 cm (Ross, et al., 2015). Se realizó un nuevo desagüe del lodo anaeróbico en el mes de abril. En tres (3) mini-lechos, se desaguaron 75 litros de lodo oriundo de reactores UASB de la PTAR *Padilha* (ver Figura 4.10b), aproximadamente 30 cm de altura (carga) y fueron inoculados con un número conocido de 1800 huevos; en los otros tres lechos se despejaron 36 litros de lodo (50 cm de altura) que, además, se contaminaron con 3600 huevos; por otra parte, se hicieron muestreos el día 1, 15, 23 y 30. Este período de observación es cercano al tiempo medio del ciclo de secado, en lecho, observado en la Región Sur de Paraná, en el invierno. A partir de la segunda colecta realizada, con el lodo de consistencia más sólida, fue utilizado un muestreador que, a través de la presión ejercida (tipo pistón), succionaba el lodo; de esta forma, fue posible recoger la muestra en todo su perfil, desde la parte interna, más húmeda, a la superficie, con menor contenido.

Los huevos viables de *Ascaris suum* fueron importados por LBEAM, de la Universidad Federal de Paraná, de la empresa Excelsior Sentinel (ITHACA, NY, EE.UU.), estos se aislaron de los intestinos de cerdos contaminados por el parásito, a partir de filtraciones secuenciales, con la finalidad de purificar y concentrar el material. Durante el proceso, los huevos no se sometieron a ningún reactivo o tratamiento químico. El número de huevos en suspensión fue de 4×10^4 huevos / ml y la viabilidad del 90%. Inmediatamente, después de la recolección, las muestras fueron acondicionadas en envases estériles y almacenados en cajas del tipo *cooler*, manteniendo la temperatura en torno a 4°C. El método utilizado para el recuento y caracterización de los huevos de helmintos fue el de Yanko (1989) modificado (Thomaz - Soccol, Paulino & Castro, 2000). Se evaluó el contenido de ST, SFT y SVT de acuerdo con el Standard Methods (APHA, 1998) y el análisis de coliformes termotolerantes, efectuado por el método de tubos múltiples.

Figura 4.II Lechos de secado-piloto (a) subdivisión de lechos-lechos 1 a 6; (b) llenado de los lechos a través de manguera procedente de camión pipa; (c) huevos de helmintos concentrados; (d) inoculación de los huevos en el lecho (2015).



Fuente: Autores

Resultados y discusión

Evaluación de la deshidratación e higienización de lodo de UASB en lechos de secado

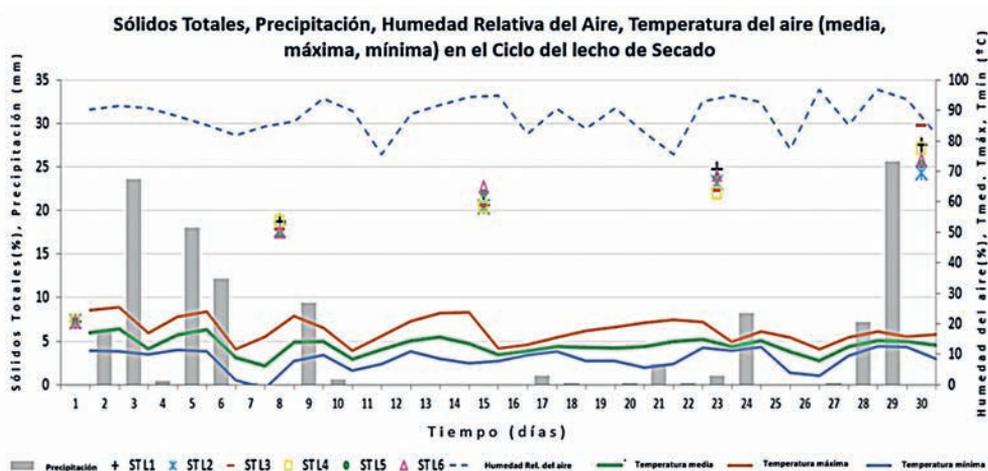
El contenido inicial de sólidos en los lodos fue del 3,5% de ST, llegando al 30,1% en 27 días con tasa de aplicación de 15,8 kg de ST / m². En el día 24, cuando se realizó el análisis de huevos de helmintos, el contenido de ST era 23,3% en L1 y 24,7% en L2, con alturas de 10 y 13 cm, respectivamente. La concentración inicial de huevos de *Ascaris* en L1 fue 0,72 huevos / g ST, siendo 0,25 viable. Después de 23 días de desagüe fue encontrado en el lodo 1,25 huevo / g ST, siendo 0,47 viable. En L2 también se observó aumento en el número de huevos después de 23 días en lecho. En el primer muestreo se encontró 0,48 huevo de *Ascaris*, 0,12 era viable. Después de 23 días se encontró 1,05 huevos por gramo de ST, siendo 0,42 viable. El aumento en el número de huevos, observado al final del desagüe, puede ocurrir debido a la sedimentación de los huevos, según lo reportado por Cherubini, et al. (2002). Debido al bajo conteo de huevos en el lodo, que refleja la salud de la población contribuyente, se realizó una nueva etapa experimental, siendo inoculado número conocido de huevos de *Ascaris summ*.

Evaluación de la deshidratación e higienización de lodo de UASB en lechos de secado, inoculado con huevos de *Ascaris*

En los seis lechos monitoreados el contenido inicial de sólidos era del 7.3%, con incremento en los 7 primeros días para valores entre 17 y 19%, y al final entre 24 y 30% de sólidos totales, valor satisfactorio para su desagüe

en lecho (Gonçalves, et al., 2014). En los 3 lechos, con altura inicial de 30 cm, al final del ciclo la altura varió entre 11 y 13 cm, mientras que, en los lechos con 50 cm de altura inicial, al final estaban entre 18 y 20 cm. La precipitación acumulada durante el ciclo fue de 116,6 mm. En la Figura 4.12 se presentan los datos climáticos diarios correspondientes al período. Aisse y Andreoli (1999) evaluaron el desagüe de lodo anaerobio, obtenido de reactores tipo UASB, en instalación piloto ubicada en Curitiba - PR. El resultado en el ciclo de invierno (junio y julio) fue de 34 días, para obtener ST de 24,9% y bajo precipitación pluviométrica atípica acumulada de 128,2 mm. Los mismos autores evaluaron simultáneamente el desagüe en lechos de secado, escala real, ubicados en la ciudad de Lapa -PR. En esta evaluación el tiempo fue de 29 días para obtener ST de 27,6%, para una precipitación pluviométrica acumulada de 161 mm, en el período. En ambos casos la carga (altura) de lodo aplicada fue de 40 cm.

Figura 4.12 Valores medios de precipitación, temperatura ambiente máxima, media y mínima, humedad relativa del aire

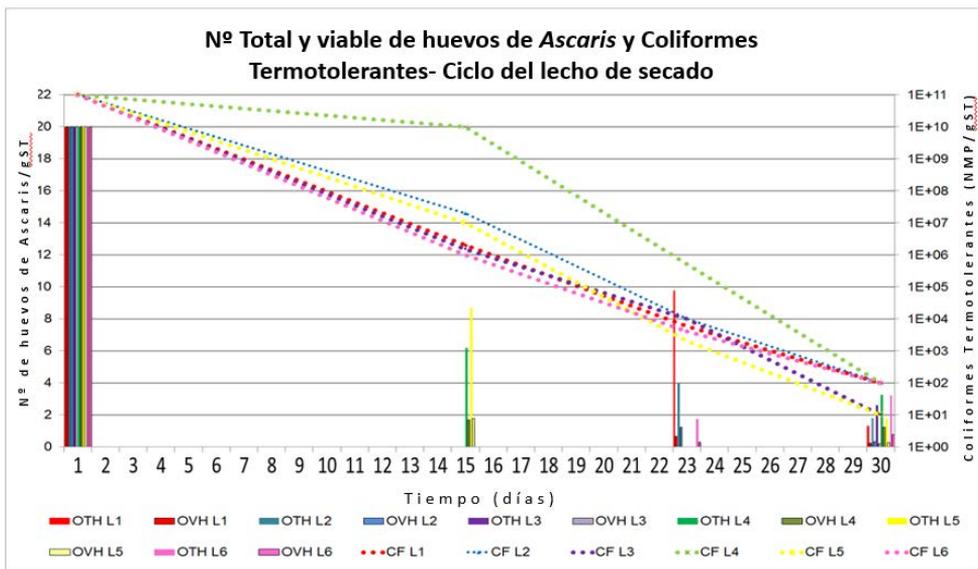


Fuente: Autores.

La concentración inicial de coliformes termotolerantes en el lodo fue de 10^{11} NMP/g ST, el decaimiento de los mismos fue similar entre los lechos, reduciendo a la concentración entre 10^6 y 10^7 NMP/g ST en 15 días de permanencia, salvo en el lecho 4 (L4), que tuvo reducción menor (10^{10} NMP/g ST). Después de 30 días en los lechos, el conteo final de coliformes termotolerantes evidenció la eficiencia del lecho de secado en densidades

inferiores a 10^2 NMP/g ST. La eficiencia en el decaimiento de la bacteria fue menor que en el estudio de Santos (2010), donde se obtuvo una reducción de 10^6 a 10^5 en 30 días (30% ST) y 10^3 después de 90 días en el lecho (Figura 4.13). La eficiencia del lecho de secado en la inviabilización de huevos de helmintos varía desde el 93,8% (L4) hasta el 99% (L3). En los lechos L1 y L3 el número de huevos de *Ascaris* quedó por debajo de 0,25 huevo viable / g ST, en los demás lechos los números fueron inferiores a 1,25 huevos viables/g ST. A pesar de no alcanzar el límite estipulado por la Resolución CONAMA para uso agrícola ($<0,25$ huevos viables/g ST), el lecho de secado se mostró un buen mecanismo de higienización e inviabilización de huevos de helmintos.

Figura 4.13 Conteo de huevos de *Ascaris* y coliformes termotolerantes en los lechos de secado pilotos.



Fuente: Autores

Nota: OTH - huevos totales de helmintos; OVH - huevos de helmintos viables; CF - coliformes termotolerantes.

La eficiencia del lecho de secado en la reducción del número de huevos de helmintos en lodo de UASB también fue reportada por Santos (2010); después de 90 días en lecho de secado, el conteo fue reducido de 107 a 2,84 huevos viables/g ST, sin embargo, la eficiencia en la reducción de coliformes termotolerantes fue menor que la obtenida en esta investigación.

Otros aspectos relativos a la deshidratación y a la higienización natural (almacenamiento prolongado) del lodo se pueden encontrar en Pompeo (2015), Pompeo, et al. (2016a) y Pompeo, et al. (2016b).

El proceso de deshidratación de lodo anaeróbico en lechos de secado fue suficiente para reducir los niveles de coliformes termotolerantes a niveles considerados seguros para uso agrícola del lodo, con eficiencia del 99% en la reducción coliformes. El lecho de secado mostró un buen mecanismo para la reducción de huevos viables de *Ascaris sumu* en lodo anaeróbico oriundo de Reactor UASB, sin embargo, el ciclo de 30 días del lecho no fue suficiente para alcanzar el límite estipulado por la Resolución CONAMA 375/06 para uso agrícola, es decir, 0.25 huevos / g ST.

Referencias

- Almeida, G. C., & Fanhani, J. C. (2006). Eficiência dos processos químicos e térmicos na higienização de lodo de esgoto. *Iniciação Científica - CESUMAR*, 8(1), 95-99. <https://doi.org/10.17765/1518-1243.2006v8n1p95-99>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT] (2011). NBR 12.209: *Elaboração de Projetos Hidráulicos-Sanitários de Estações de Tratamento de Esgotos Sanitários*. Río de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Aisse, M. M., & Andreoli, F.D. (1999). Estudo da desidratação do lodo anaeróbico, obtido em reatores tipo RALF, através do uso de leito de secagem e de centrífuga tipo decanter. *Sanare*, 11(11), 37-43.
- Andreoli, C.V., Pegorini E., & Fernandes F. (2001). In Andreoli, C.V. (Coord). *Resíduos sólidos do saneamento: processamento, reciclagem e disposição final*. Río de Janeiro: RiMa/ABES.
- APHA (1998). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th Edition, Washington DC: American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environmental Federation,
- Bastos, R. K. X., Bevilacqua, P. D., & MARA, D. D. (2013). Análise crítico-comparativa das regulamentações brasileira, estadunidense e britânica de qualidade microbiológica de biossólidos para uso agrícola. *Revista DAE*, 191, 10-20.
- Bittencourt, S., Serrat, B. M., Andreoli, C.V., Moura, E.N., Tognny, F. L., & Silva, L.A.T.P. (2013). Lodo de esgoto submetido ao revolvimento: efeito sobre sólidos totais, pH e ovos viáveis de helmintos. *Ciências Agrárias e Ambientais (PUCPR.)*, 11, 191-200.

- Bueno, R.C.R. (2001). Biossólido - Processo de redução adicional de patógenos com a utilização de energia solar. In *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21*. João Pessoa/PB. João Pessoa: ABES.
- Correia, J. E. (2015). Caracterização físico-química e microbiológica do lodo gerado na estação de tratamento de esgoto Contorno. Feira de Santana, BA. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais, 2*(2).
- Cherubini, Paolo & Fontana, Giovanni & Rigling, Daniel & Dobbertin, Matthias & Brang, Peter & Innes, John. (2002). Tree-life history prior to death: Two fungal root pathogens affect tree-ring growth differently. *Journal of Ecology, 90*, 839 - 850. 10.1046/j.1365-2745.2002.00715.x.
- Da Silva Júnior, É. D., De Araújo Almeida, R., Siqueira, E. R., Da Silva, Á. R., & De Melo Rodrigues, A. (2015). Tratamento de resíduos sépticos em wetlands construídos de fluxo vertical. *Engenharia e Construção Civil, 2*(2).
- Espericueta, A. D. C., & González, F. J. V. (2008). Desinfección de lodos residuales con alto contenido de Salmonella mediante secado solar. In *Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, XXXI*. Santiago, Chile: Aidis. (CD ROM).
- Gonçalves, C. do P. (2008). *Impacto do lançamento de lodo de tanques/ fossas sépticas em estação de tratamento de esgoto com reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB)*. (Dissertação). Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Gonçalves, R. F., Ludovice, M., Von Sperling, M. gAndreoli, C. V., Pegorini, E. S., & Fernandes, F. (2014). Remoção da Umidade de lodo de esgotos. In Andreoli, C. V., Von Sperling, M. y Fernandes, F. (Ed). *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final* (pp. 157- 258). Belo Horizonte: UFMG.
- Ingunza, M.D.P.D., Andrade Neto, C.O., Araújo, A.L.C., Souza, M.A.A., Medeiros, S.A., Borges, N.B., & Hartmann, C.M. (2009). Caracterização física, química e microbiológica do lodo de fossa séptica/tanque séptico. In Andreoli, C.V. *PROSAB - Lodo de Fossa Séptica e Tanque Séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final*. Rio de Janeiro: ABES.
- Instituto Oswaldo Cruz. (2011). *Nota técnica N.º 1/2011/IOC-FIOCRUZ/ DIRETORIA*. Recuperado de www.fiocruz.br/ioc/media/NotaTecnica_1_2011_IOCatual.pdf
- Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba. (2013). *Curitiba em dados*. Curitiba: IPPUC. Recovered from: <<http://ippucweb>.

ippuc.org.br/curitibaemdados/Curitiba_em_dados_Pesquisa.htm>

- Jimenez-Cisneros, B., Barrios, J.A., & Maya, C. (2000). Class B biosolids production from wastewater sludge with high pathogenic content generated in an advanced primary treatment. *Water Science and Technology*, 42(9), 103-10.
- Leles, D., Araújo, A., Vicente, AC., & Iñiguez, AM. (2010). ITS1 intra-individual variability of *Ascaris* isolates from Brazil. *Parasitol Int*, 59, 93-96.
- Lima, M. R. P. (2010). *Use of agricultural greenhouse for drying and sanitizing sewage sludge* (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo). (en Portuguese).
- Metcalf, & Eddy, INC. (1991). *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, and Reuse*, Tchobanoglous, G. e Burton F.L. (eds.), 3 ed., Estados Unidos: McGraw-Hill. 1336 p.
- Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente. (30 de agosto 2006). CONAMA no 375. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, 167, 141-146.
- Neri, M. C. (2007). *Trata Brasil: Saneamento e Saúde*. Fundação Getúlio Vargas, 163.
- O'lorcain, P., & Holland, c. (2000). The public health importance of *Ascaris lumbricoides*. *Parasitology*, 121(S1), S51-S71. doi:10.1017/S0031182000006442
- Organização Pan-Americana da Saúde [OPS] (2007). *Saúde nas Américas*. Washington, D.C.: OPAS.
- Paraná. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Natal.
- Ross, B. Z. L., Barcelos, D.S., Marques, C. J., Carneiro, C., & Aisse, M. M. (2015). Desaguamento de espuma produzida em reatores anaeróbios de manta de lodo em leitos de secagem no estado do Paraná. *Congresso 28 da Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Rio de Janeiro: Anais.
- Santos, Y. T. da C. (2010). *Caracterização do conteúdo de fossas e tanques sépticos na cidade de Natal* (Dissertação Mestrado em Engenharia Sanitária). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Sidhu, J., & Toze, S. G. (2009). Human pathogens and their indicators in biosolids: A literature review. *Environment International*, 35(1), 187-201.

- (2009). Resolução Sema 021/09. Determinations about environmental license, conditions and standards and other requirements for sanitation ventures. *Diário Oficial do Estado do Paraná, Curitiba*, n. 7962, pp. 13-16. (en Portuguese)
- Paulino, R. C., & Castro, E. A. (2001). Tratamento anaeróbico de esgoto e sua eficiência na redução da viabilidade de ovos de helmintos Helminth eggs and protozoan cysts in sludge obtained by anaerobic digestion process. *Revista Da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical*, 34(5), 421-428.
- Pompeo, R. P., Castro, E. A., Aisse, M. M., & Andreoli, C. V. (2014). Higienização de lodo séptico submetido a 11 meses de estocagem prolongada. In *XXXIV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Monterrey, México: AIDIS.
- Pompeo, R. P. (2015). *Influência da Estocagem Prolongada de lodos de esgoto, em diferentes condições operacionais, na redução de patógenos visando a reciclagem agrícola* (Tese Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Paraná.
- Pompeo, R. P., Canova, T., Andreoli, C. V., & Aisse, M. M. (2016a). Influência dos Leitões de Secagem na Redução de Ovos de Helmintos e Coliformes Termotolerantes em Lodo de Esgoto Provenientes de Reatores Anaeróbios de Manta de Lodo (UASB). In *XXXV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Cartagena, Colombia: Anais.
- Pompeo, R. P., Andreoli, C. V., De Castro, E. A., & Aisse, M. M. (2016b). Influence of Long-Term Storage Operating Conditions on the Reduction of Viable Ascaris Eggs in Sewage Sludge for Agricultural Reuse. *Water, Air y Soil Pollution*, 227(5), 1-14.
- Pourcher, A.M., Morand, P., Picard-Bonnaud, F., Billaudel, S., Monpoeho, S., Federighi, M., & Moguedet, G. (2005). Decrease of enteric microorganisms from rural sewage sludge during their composting in straw mixture. *Journal of Applied Microbiology*, 99(3), 528-539.
- Resolução No 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Ministério Do Meio Ambiente, Conselho Nacional Do Meio Ambiente. Recuperado de <http://www2.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>
- Ratis, A. N. F. A. (2009). *Caracterização dos resíduos esgotados de sistemas de tratamento individual de esgotos domésticos de Natal* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Norte,

- Szabová, E., Juriš, P., & Papajová. (2010). Sanitation composting process in different seasons. *Ascaris suum* as model. *Waste Management*, 3(30), 426-432.
- Thomaz-Soccol, V., Paulino, R.C., & Castro, E. A. (2000). Manual de métodos para análises microbiológicas e parasitológicas em Reciclagem Agrícola de Lodo de Esgoto. (2 ed). Sanepar, Curitiba.
- Trata Brasil. (2012). Encontro Conasa. Recuperado de: <http://www.trata-brasil.org.br/datafiles/uploads/apresentacoes/conasa-apresentacao.pdf>
- USEPA(2003). *Environmental regulations and technology - control of pathogens and vector attraction in sewage sludge (Including Domestic Septage). Under 40 CFR Part 503. Appendix F: Sample Preparation for fecal coliform test and Salmonella sp Analysis. United States Environmental Protection Agency.* Recuperado de www.epa.gov/ORD/NRMRL/pubs.
- Yeager, G.J., O'Brien, R.T (1983): Irradiation as a means to minimize public health risks from sludge-borne pathogens. *J. Wat. Poll. Contr. Fed*, 55 (7): 977-983.
- Yanko W. A. (1989). *Analytical Method for Viable Helminth Ova. Laboratory Section Procedures for the Characterization of Water and Wastes* (4th ed.). Los Ángeles, California: Sanitation Districts of Los Angeles.
- Zhang, X. (2011). Study on composting of sewage sludge with matured compost. In *5th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. Wuhan, China: Proceedings.