



DE LA  
**GENERACIÓN AL**  
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE

» **LODOS Y BIOSÓLIDOS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS  
Y AGUAS RESIDUALES**



Universidade  
Estadual de Londrina



"Educação de qualidade com inclusão e responsabilidade social  
al serviço do desenvolvimento regional"

 **Universidad de Boyacá®**

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES PARA EL DESARROLLO "CIPADE"

*Catalogación en la publicación – Biblioteca Nacional de Colombia*

De la generación al aprovechamiento sostenible de lodos y biosólidos de tratamiento de aguas y aguas residuales / autores, Erika Sierra Cárdenas ... [et al.] ; compiladores, Jaime Díaz Gómez, Gabriel Ricardo Cifuentes Osorio. -- 1a. ed. -- Tunja : Universidad de Boyacá, 2020.

p.

Incluye datos de los autores. -- Contiene referencias bibliográficas al final de cada capítulo.

ISBN 978-958-5120-13-6

1. Tratamiento del agua 2. Tratamiento de aguas residuales  
3. Aguas residuales - Tratamiento por proceso de lodo activado  
4. Biodegradación de aguas residuales I. Sierra Cárdenas, Erika  
II. Díaz Gómez, Jaime, comp. III. Cifuentes Osorio, Gabriel Ricardo, comp.

CDD: 628.38 ed. 23

CO-BoBN- a1063894



DE LA  
**GENERACIÓN AL**  
APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE

» **LODOS Y BIOSÓLIDOS DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS  
Y AGUAS RESIDUALES**

**Editores**

Jaime Díaz Gómez

Gabriel Ricardo Cifuentes Osorio



Universidade  
Estadual de Londrina



RED UNIVERSITARIA  
**NEXUS**

"Educación de calidad con inclusión y responsabilidad social  
al servicio del desarrollo regional"

 **Universidad de Boyacá**

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
CENTRO DE INVESTIGACIONES PARA EL DESARROLLO "CIPADE"

**Presidente Emérito**

Dr. Osmar Correal Cabral

**Presidenta**

Dra. Rosita Cuervo Payeras

**Rector**

Ing. MSc. Andrés Correal

**Vicerrector Académico**

Ing. MSc. Rodrigo Correal Cuervo

**Vicerrectora Desarrollo Institucional**

C.S. Mg. Ethna Yanira Romero Garzón

**Vicerrectora Investigación Ciencia  
e Innovación**

Ing. Mg. Claudia Patricia Quevedo Vargas

**Vicerrector Administrativo y de  
Infraestructura**

Dr. Camilo Correal C.

**Decano Facultad de Ciencias  
e Ingeniería**

Ing. Msc. Carlos Rafael Lara Mendoza

**Directora del Centro de Investigaciones  
para el Desarrollo "CIPADE"**

Ft. Mg. Elisa Andrea Cobo Mejía

©

**Los autores**

Jaime Díaz Gómez

Gabriel Ricardo Cifuentes Osorio

Erika Sierra Cárdenas

José Édgar Villalobos Enciso

Carlos Rafael Lara Mendoza

Jorge Antonio Silva Leal

Simone Bittencourt

Miguel Mansur Aisse

Fernando Fernandes

Cristiane Silveira

Emilia Kiyomi Kuroda

Raquel Pinheiro Pompeo

Flávia Gonçalves Pissinati Pelaquim

Raquel Souza Teixeira

**Editores**

Ing. Mg. Jaime Díaz Gómez

Lic. Msc. Gabriel Ricardo Cifuentes Osorio

**Gestión editorial, corrección de texto  
y estilo, diseño y diagramación**

División de Publicaciones

**Director División de Publicaciones**

Ing. D.G. Mg. Johan Camilo Agudelo Solano

**Gestión editorial**

Lcda. Mg. Natalia Elizabeth Cañizalez Mesa

**Corrección de texto y estilo**

Lcda. Esp. Clara Yenny Vanegas Correa

**Diseño y diagramación**

Ing. D.G. Mg. Johan Camilo Agudelo Solano

D.G. Rafael Alberto Cárdenas Estupiñan

**Diseño de Cubierta**

D.G. Diana Lizeth Becerra Castro

© Ediciones Universidad de Boyacá

Carrera 2ª. Este N° 64-169

Tels.: (8) 7452742 - 7450000 Ext. 3104

[www.uniboyaca.edu.co](http://www.uniboyaca.edu.co)

[publicaciones@uniboyaca.edu.co](mailto:publicaciones@uniboyaca.edu.co)

Tunja-Boyacá-Colombia

ISBN: 978-958-5120-13-6

Esta edición y sus características gráficas son propiedad de la

 **Universidad de Boyacá®**

Vigilada Mineducación

© 2020

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este libro, por medio de cualquier proceso reprográfico o fónico, especialmente fotocopia, microfilme, offset o mimeógrafo (Ley 23 de 1982).

DOI: <https://doi.org/10.24267/9789585120136>



# Presentación

Por primera vez en Colombia se publica un libro sobre “DE LA GENERACIÓN AL APROVECHAMIENTO SOSTENIBLE DE LODOS Y BIOSÓLIDOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS Y AGUAS RESIDUALES” que recoge las investigaciones y experiencias que se han realizado tanto en Brasil como en Colombia.

La Universidad de Boyacá ha sido pionera en estos temas desde 1982 cuando iniciamos el programa de Ingeniería Sanitaria y empezamos a hacer contactos con la Universidad del Valle y con la Pontificia Universidad Católica del Paraná, con quien firmamos el primer Convenio de Cooperación Interinstitucional en 1984 (noviembre). En desarrollo de este convenio tuvimos la visita de los profesores Nicolau Leopoldo Obladen y Miguel Mansur Aisse quienes con su experiencia nos mostraron que la investigación en aguas residuales era un campo nuevo para la investigación y entrenamiento de nuestros estudiantes.

Surgió así la necesidad de construir una Planta Piloto que fue diseñada por los Ingenieros Jaime Díaz y Carlos Valencia, quienes habían conocido la experiencia de los profesores holandeses en la Universidad del Valle cuando construyeron el primer reactor anaerobio de flujo ascendente y manto de lodos tipo UASB. El espíritu investigativo de los docentes, que habíamos traído desde Cali, los llevó a pensar que sería posible construir un reactor de este tipo que fuera eficiente por encima de los 1.500 metros de altura sobre el nivel del mar (Tunja está a 2.810 m.s.n.m. y una temperatura promedio de 13°C) y que operara en el rango psicrófilo entre 10° y 18°C. Fue así como obtuvimos apoyo financiero de Colciencias y se construyó la planta en 1.992, que sería la tercera existente en el país, después de Cali y Bucaramanga, y que llegó a ser un proyecto piloto de referencia para el CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria), institución especializada de la OPS (Organización Panamericana de la Salud) con sede en Lima, Perú.

Diversas investigaciones han surgido de las experiencias y modificaciones de nuestra planta piloto a la cual se le añadió un “humedal artificial” para el estudio del postratamiento del efluente del reactor UASB, lo cual ha sido de enorme utilidad para la construcción de otras plantas de escala más grande como la que se diseñó para el municipio de Sotaquirá.

Debo señalar que solamente hasta el año 2014 se expidió la primera norma regulatoria de la generación de lodos y biosólidos en las plantas de tratamiento de agua residual (Decreto 1287 del 2014 del Ministerio de Vivienda, ciudad y territorio) cuando en Brasil existían normas similares desde el Año 2006 (Resolución CONAMA 375).

Como muy bien lo expresan los autores "este libro está dirigido a las personas interesadas en los temas de lodos y biosólidos generados en el tratamiento de aguas; asimismo, proporciona fundamentos básicos derivados de investigaciones científicas, nacionales e internacionales, con el fin de apropiar el proceso investigativo en esta área".

Es importante destacar que este libro será un valioso aporte para las próximas reglamentaciones que deben expedirse cuando se trate del uso de los biosólidos generados en aguas residuales, especialmente los producidos en las Plantas de Tratamiento PTAR que se están construyendo en todo el país, que seguramente tendrán en cuenta la variación del enfoque convencional del tratamiento de agua hacia el concepto de gestión integral de recursos naturales, porque "el lodo generado en el tratamiento de aguas, una vez convertido en biosólido, deja de ser un residuo para ser considerado un recurso benéfico que se puede reutilizar con diferentes propósito".

Felicitaciones a quienes generosamente han querido hacer aportes para este libro, porque sus investigaciones han sido no solo rigurosas desde el punto de vista metodológico sino valiosas desde lo puramente científico.

Osmar Correal Cabral  
**Presidente Emérito**

## EDITORES Y AUTORES

### **Jaime Díaz Gómez**

Ingeniero Sanitario de la Universidad del Valle; Msc. en Ciencias Ambientales y Tecnología del IHE-Delft. Líder del grupo de investigación de Recursos Hídricos y docente del programa de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Boyacá. E-mail: jaimesdiaz@uniboyaca.edu.co

### **Gabriel Ricardo Cifuentes Osorio**

Lic. en Biología y Química de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Especialista en Química Ambiental de la Universidad Industrial de Santander; MsC. en Ciencias Ambientales de la Universidad Jorge Tadeo Lozano. Doctorando en Ciencia y Tecnología del ambiente y la Tierra Universidad de Jaén. España. Docente Titular; Director de Investigaciones Facultad de Ciencias e Ingeniería Universidad de Boyacá, Grupo de investigación Gestión del Recurso Hídrico. E-mail: grcifuentes@uniboyaca.edu.co

## AUTORES

### **Erika Sierra Cárdenas**

Ingeniera Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Boyacá; Msc. en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambientales de la Universidad Federal de Paraná. Docente de tiempo completo en el programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Boyacá- Grupo de Investigación Gestión Ambiental. E-mail: efsierra@uniboyaca.edu.co

### **José Édgar Villalobos Enciso**

Ingeniero Civil de la Universidad Autónoma de Chiapas. Msc. IHE-Delft. Profesor de Tiempo Completo Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas-México. E-mail: eenciso@unach.mx

## **Carlos Rafael Lara Mendoza**

Ingeniero Sanitario de la Universidad de Boyacá, Colombia, Msc. en Ingeniería, área civil, de la Universidad de los Andes, Colombia. Docente de los programas Ingeniería Sanitaria e Ingeniería Ambiental de la Universidad de Boyacá. Investigador del Grupo Gestión del Recurso Hídrico de la Universidad de Boyacá. E-mail: carlara@uniboyaca.edu.co

## **Jorge Antonio Silva Leal**

Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle. Docente Facultad de Ingeniería, Universidad Santiago de Cali. Grupo de Investigación en Ingeniería Electrónica Industrial y Ambiental (GIEIAM). E-mail: jorge.silva04@usc.edu.co

## **Simone Bittencourt**

Ingeniera Agrónoma. Maestría en Agronomía y Doctora en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambientales de la Universidad Federal de Paraná. Profesora de la Facultad Fael. Profesional de la Compañía de Saneamiento del Paraná (Sanepar) en los temas de gestión de residuos de sistemas de residuos líquidos. Email:sbittencourt@sanepar.com.br

## **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

## **Fernando Fernandes**

Ingeniero Civil de la UNICAMP (Universidad Estatal de Campinas), Doctor en Ingeniería por el Instituto Nacional Politécnico de Toulouse (INPT), Francia. Profesor del Centro de Tecnología y Urbanismo de la Universidad Estatal de Londrina (UEL) en el programa de ingeniería civil y en el programa de posgrado en ingeniería civil a nivel de maestría y doctorado en el Estado de Paraná, Brasil. E-mail: fernando@uel.br

## **Cristiane Silveira**

Graduada en Tecnología en Gerenciamiento Ambiental por la UTFPR campus Medianeira. Ingeniera Ambiental de la Faculdade Pitágoras Londrina. Maestra en Ingeniería de Edificios y Saneamiento de Universidade Estatal de Londrina y Especialización en Docencia de la Educación Superior. E-mail: cristina.silveira@pitagoras.com.br

## **Emilia Kiyomi Kuroda**

Ingeniera Civil de la Escuela de Ingeniería de San Carlos Universidad de San Pablo - EESC-USP (1999), Maestría (2002) y Doctorado (2006) en Hidráulica y Saneamiento de las mismas instituciones y pos-doctorado en University of Meijo, Japón (2007 - 2008) y la Universidad Estatal de Londrina UEL (2008-2009). Profesora en el Centro de Tecnología y Urbanismo de la Universidad Estatal de Londrina. E-mail: ekkuroda@uel.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

## **Flávia Gonçalves Pissinati Pelaquim**

Ingeniera Civil y Ambiental. Especialista en Ingeniería de Seguridad en el Trabajo y Maestría Ingeniería de Edificaciones y Saneamiento. Doctoranda en Ingeniería Civil. Docente en la Universidad Estatal de Londrina (UEL) y la Universidad del Norte de Paraná (Presencial e EAD. E-mail: flaviagoncalves@uel.br

## **Raquel Souza Teixeira**

Ingeniera Civil de la Universidad Federal de Ouro Preto (1992), maestría en Geotecnia de la Escuela de Ingeniería de San Carlos (EESC)/Universidad de San Pablo (1996) y Doctora en Ingeniería Civil de la Universidad Federal de Santa Catarina (2008). Profesora Asociada de la Universidade Estatal de Londrina - UEL-PR/BR / Programa de Pós-Graduação en Ingeniería Civil. Especialista en: Geotecnia, Mecánica de Suelos y Contaminación de suelos. E-mail: raquel@uel.br



# Contenido

<b>CAPÍTULO 1. LODOS Y BIOSÓLIDOS GENERADOS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS: DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE UN RESIDUO A LA GESTIÓN, MANEJO Y APROVECHAMIENTO DE UN RECURSO .....</b>	<b>21</b>
Lodo y biosólidos generados en el tratamiento de aguas residuales .....	24
Características de los biosólidos provenientes del tratamiento de aguas residuales .....	24
Reutilización de biosólidos producidos en el tratamiento de aguas residuales .....	25
Lodos y biosólidos generados en la operación de sistemas de potabilización de agua .....	26
Características del lodo originado en el proceso de tratamiento de agua potable .....	26
Reutilización de los biosólidos de tratamiento de agua .....	27
Conclusiones .....	29
Referencias .....	29
<b>CAPÍTULO 2. NORMATIVIDAD .....</b>	<b>30</b>
<b>2.1 NORMATIVIDAD SOBRE LODOS Y BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....</b>	<b>37</b>
Normatividad internacional .....	37
Normatividad colombiana .....	41
Referencias .....	46
<b>2.2 LEGISLACIÓN BRASILEÑA SOBRE USO EN LA AGRICULTURA DEL LODO GENERADO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....</b>	<b>48</b>
Resolución CONAMA 375/06 .....	50
Aspectos relacionados con la calidad del biosólido .....	51
Frecuencia de monitoreo de los biosólidos .....	61
Cultivos aptos para recibir biosólidos .....	64
Tasa de aplicación de biosólidos .....	66
Consideraciones finales .....	68
Referencias .....	69
<b>CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN GENERAL DE LODOS Y BIOSÓLIDOS .....</b>	<b>73</b>
<b>3.1 PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICO, QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LOS LODOS Y BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES .....</b>	<b>75</b>
Características de los lodos y los biosólidos .....	76

Producción de lodo en las instalaciones de saneamiento de aguas residuales .....	78
Cantidades producidas de lodo .....	81
Remoción de los lodos en las unidades de tratamiento .....	83
Composición del lodo de agua residual .....	85
Contaminantes contenidos en los lodos generados en el saneamiento de AR .....	88
Lodos generados en tanques sépticos .....	90
Material grueso (desechos) residuos de las rejillas .....	97
Residuos de los desarenadores .....	98
Material Flotante .....	99
Referencias .....	100

### **3.2 DESHIDRATACIÓN DE LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP) ..... 102**

Reducción de la humedad en los lodos generados en PTAPs .....	102
Centrifugación y otros medios mecánicos .....	105
Lechos de secado convencionales .....	106
Lechos de secado con bloques drenantes .....	108
Lechos de drenaje con material geotextil .....	109
Torre de deshidratación .....	114
Consideraciones finales .....	115
Referencias .....	115

## **CAPÍTULO 4. SANEAMIENTO DE LODOS Y BIOSÓLIDOS ..... 117**

### **4.1 TRATAMIENTO Y ESTABILIZACIÓN DE LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ..... 119**

Tratamiento del lodo .....	122
Procesos de estabilización del lodo de aguas residuales .....	123
Reactor anaerobio tipo UASB .....	124
Tanques sépticos .....	126
Tratamiento de lodo de tanques sépticos combinados con lodo de alcantarillado bruto en reactores anaerobios de mantos de lodo .....	129
Centros de Recepción de Lodo de Tanque Séptico .....	130
Digestores anaeróbicos de lodo .....	132
Otras alternativas: minimización del lodo .....	134
Reducción de la humedad del lodo de aguas residuales .....	136

Secado térmico .....	138
Higienización del lodo .....	139
Costos del tratamiento del lodo .....	140
Referencias .....	141
<b>4.2 HIGIENIZACIÓN DE LODOS ORIGINADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL ....</b>	<b>144</b>
Patógenos encontrados en el lodo .....	145
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. ....	146
Procesos de higienización de lodos provenientes de AR .....	152
Estudio de caso .....	156
Referencias .....	170
<b>CAPÍTULO 5. APROVECHAMIENTO DE LODOS Y BIOSÓLIDOS .....</b>	<b>175</b>
<b>5.1 USO AGRÍCOLA DEL LODO GENERADO EN LA PTAR DEL ESTADO DE PARANÁ, BRASIL .....</b>	<b>177</b>
El sistema de alcantarillado sanitario en Paraná .....	179
Gestión del uso agrícola de lodo en Paraná .....	180
Ámbito de la UGL .....	182
Ámbito Agrícola en Brasil .....	184
Informe de trazabilidad .....	186
Referencias .....	194
<b>CAPÍTULO 6. LODOS Y BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE ....</b>	<b>199</b>
<b>6.1 USO DEL BIOSÓLIDO GENERADO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLEBLE .....</b>	<b>201</b>
Incorporación en ladrillo cerámico .....	201
Cobertura de celdas de rellenos sanitarios .....	205
Disposición en rellenos sanitarios convencionales .....	211
Referencias .....	215
<b>6.2 DESTINO DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP) .....</b>	<b>217</b>
Contexto mundial .....	218
Alternativas de destino final de lodos generados en las PTAPs .....	219
Contexto brasileño .....	225
Destinación final de lodo generado en las PTAPs del estado de Paraná .....	227
Referencias .....	229

# Figuras

<b>Figura 3.1</b> Flujograma típico de una PTAR completa. ....	72
<b>Figura 3.2</b> Variación de volumen del lodo en función del contenido de sólidos. ....	104
<b>Figura 3.3</b> Esquema básico en planta de un proyecto de lechos de secado convencional. ....	107
<b>Figura 3.4</b> Esquema básico en corte de un proyecto de lechos de secado convencional. ....	107
<b>Figura 3.5</b> Esquema básico en planta de proyecto de lecho de drenaje con bloques drenantes. ....	108
<b>Figura 3.6</b> Esquema básico en corte de proyecto de lecho de drenaje con bloques drenantes. .	109
<b>Figura 3.7</b> Etapas de desarrollo de los sistemas de lechos de drenaje/secado. ....	110
<b>Figura 3.8</b> Esquema de los prototipos a escalas reducidas y piloto de un sistema de deshidratación de lodos por decantación para las PTAP. ....	111
<b>Figura 3.9</b> Torta del lodo tipo A luego de la fase de drenaje (ST 12,9%). ....	112
<b>Figura 3.10</b> Torta del lodo tipo A en el 4º día de secado (ST 15%). ....	112
<b>Figura 3.11</b> Torta del lodo tipo A después de 7 días de secado (ST 16,6%). ....	113
<b>Figura 3.12</b> Torta del lodo tipo B después de la fase de drenaje (ST 11,2%). ....	113
<b>Figura 3.13</b> Torta de lodo tipo B después de 7 días de secado (ST 30,2%). ....	113
<b>Figura 3.14</b> Torre de deshidratación lista funcionar. ....	114
<b>Figura 4.1</b> Flujograma de las etapas de gerenciamiento del lodo. ....	123
<b>Figura 4.2</b> Reactor UASB en perfil. ....	126
<b>Figura 4.3</b> Esquema y funcionamiento general de un tanque séptico. ....	127
<b>Figura 4.4</b> Tanque de recepción de lodos provenientes de tanque séptico (planta). ....	132
<b>Figura 4.5</b> 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. ....	150
<b>Figura 4.6</b> Patios de almacenamiento del lodo. ....	154
<b>Figura 4.7</b> Compostaje en pilas estáticas. ....	155
<b>Figura 4.8</b> 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. ....	158
<b>Figura 4.9</b> Flujograma 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 por tratamiento en los municipios; sólidos totales correspondientes; número de huevos viables de <i>Ascaris</i> / g ST en los tratamientos que no alcanzaron el estándar estipulado en la resolución. ....	159
<b>Figura 4.10</b> Lechos de secado piloto: (a) subdivisión-lechos L1 y L2; (b) llenado del lecho 1 (año 2012). ....	165

<b>Figura 4.11</b> 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). .....	167
<b>Figura 4.12</b> Valores medios de precipitación, temperatura ambiente máxima, media y mínima, humedad relativa del aire. ....	168
<b>Figura 4.13</b> Conteo de huevos de <i>Ascaris</i> y coliformes termotolerantes en los lechos de secado pilotos. ....	169
<b>Figura 5.1</b> Localización del Estado de Paraná y municipios atendidos por la Compañía de Saneamiento de Paraná (SANEPAR, 2017). ....	179
<b>Figura 5.2</b> Diagrama de flujo de las etapas de gestión del proceso de uso agrícola de lodo en Paraná. ....	181
<b>Figura 5.3</b> Cantidad lodo de AR higienizado por estabilización alcalina prolongada y de áreas agrícolas que recibieron lodo, por el grupo de la UGL, en Paraná en 2014 y 2015. ....	188
<b>Figura 6.1</b> Módulo de resistencia a la flexión de los cuerpos de prueba usados. ....	204
<b>Figura 6.2</b> Transformación del lodo de PTAP del estado líquido a sólido. ....	206
<b>Figura 6.3</b> Curva granulométrica, porcentajes y clasificación textural de los materiales estudiados. ....	207
<b>Figura 6.4</b> Curvas de compactación de los suelos y de las mezclas. ....	209
<b>Figura 6.5</b> Esquema y foto del ensayo de lixiviación de los lodos tipos A y B. ....	213
<b>Figura 6.6</b> Fotografías de las muestras compuestas de los líquidos percolados de las columnas de lixiviación de las muestras que contenían lodos tipos A y B. ....	214
<b>Figura 6.7</b> Aplicación de lodo de las PTAP con contenido de sólidos de 2 a 4% en suelo. ....	218
<b>Figura 6.8</b> Porcentaje de municipios con generación de lodos en el proceso de purificación del agua y por destinos finales de los lodos generados en el 2008. ....	226
<b>Figura 6.9</b> Ubicación del Estado de Paraná. ....	227
<b>Figura 6.10</b> Recuperación de área de cava de minería de arena con lodo de estación de tratamiento de agua, Región Metropolitana de Curitiba. ....	229

# Tablas

<b>Tabla 2.1</b> Parámetros microbiológicos y parasitológicos para la caracterización de biosólidos. .	38
<b>Tabla 2.2</b> Contenido máximo de metales pesados (en mg/kg) establecidos por diferentes países. ....	39
<b>Tabla 2.3</b> Tratamientos para catalogar un biosólido como de clase A, y disminuir la cantidad de patógenos en un biosólido clase B. ....	40
<b>Tabla 2.4</b> Métodos de tratamiento recomendados para obtener biosólidos de clase B. ....	41
<b>Tabla 2.5</b> Valores máximos de contaminantes contenidos en biosólidos para que se permita su uso en la agricultura. ....	42
<b>Tabla 2.6</b> Usos para los biosólidos categoría A y B en Colombia. ....	43
<b>Tabla 2.7</b> Límites de concentración de organismos patógenos e indicadores bacterianos en lodo proveniente de aguas residuales destinado a usos agrícolas. ....	52
<b>Tabla 2.8</b> Límites de sustancias inorgánicas contenidas en lodos con fines de uso agrícola en Brasil, el estado del Paraná, la unión europea, Holanda, EUA y México. ....	54
<b>Tabla 2.9</b> Límites de carga acumulada de sustancias inorgánicas después de la aplicación de lodo en suelo para Brasil, el estado de Paraná, la Unión Europea y EUA. ....	55
<b>Tabla 2.10</b> Límites de sustancias inorgánicas en el suelo (pH 6 a 7) definidos en la Directiva 86/278/EEC de la UE. ....	56
<b>Tabla 2.11</b> Lista de sustancias orgánicas a ser cuantificadas en lodos provenientes de PTAR según las resoluciones CONAMA 375/06 y SEMA 021/09, a fin de dar uso agrícola a los lodos. .	57
<b>Tabla 2.12</b> Límites de concentraciones de contaminantes orgánicos contenidos en biosólidos destinados a usos agrícolas establecidos en la normatividad de diferentes países. ....	58
<b>Tabla 2.13</b> Concentraciones de sustancias orgánicas permitidas en suelos agrícolas según las resoluciones CONAMA 375/06, SEMA 021/09, y valores de prevención de la CETESB (2014). ...	59
<b>Tabla 2.14</b> Frecuencia de monitoreo para biosólido que pueden ser utilizados en agricultura según reglamentación de los EUA, Unión Europea, México y Brasil. ....	62
<b>Tabla 2.15</b> Restricciones de uso para el biosólido clase “B” y de estándar convencional, según la reglamentación de los EUA y de la Unión Europea respectivamente. ....	65
<b>Tabla 3.1</b> Tipos de lodos generados durante el saneamiento de aguas residuales. ....	76
<b>Tabla 3.2</b> Comparación de parámetros físico-químicos entre lodos y biosólidos. ....	78
<b>Tabla 3.3</b> Componentes en los que se generan los principales subproductos sólidos en las PTAR. ....	80
<b>Tabla 3.4</b> Características y cantidades de lodo producido en diferentes tipos de sistemas de saneamiento de AR. ....	81
<b>Tabla 3.5</b> Intervalos típicos de remoción de lodos, a partir de la fase líquida, que se presentan en las unidades o sistemas de las PTAR. ....	84
<b>Tabla 3.6</b> Composición química típica de los lodos crudos y digeridos generados durante el saneamiento de AR. ....	86

<b>Tabla 3.7</b> <i>Contenidos de nutrientes y de sustancias inorgánicas en los lodos generados en diferentes sistemas de tratamiento de AR en Brasil.</i> .....	87
<b>Tabla 3.8</b> <i>Contenidos de sustancias inorgánicas (metales pesados) en los lodos generados en diferentes sistemas de tratamiento de AR en Brasil.</i> .....	89
<b>Tabla 3.9</b> <i>Tanque séptico: contribución diaria de desechos y carga orgánica.</i> .....	91
<b>Tabla 3.10</b> <i>Características físico-químicas de los lodos generados en tanques sépticos.</i> .....	92
<b>Tabla 3.11</b> <i>Características fisicoquímicas de lodos generados en tanques sépticos en algunas locaciones de Brasil.</i> .....	95
<b>Tabla 3.12</b> <i>Cantidad de sólidos gruesos removidos en función del espaciamiento entre barras.</i> .....	98
<b>Tabla 3.13</b> <i>Eliminación de arenas y otras partículas, según varias referencias académicas.</i> .....	98
<b>Tabla 3.14</b> <i>Porcentajes de volumen de drenado logrados en cada condición, a escala piloto.</i> ....	111
<b>Tabla 4.1</b> <i>Métodos de estabilización de biosólidos, efecto en el biosólidos y en la aplicación al suelo.</i> .....	119
<b>Tabla 4.2</b> <i>Centrales de Recibimiento de Lodo de Tanque Séptico (CRLTS) estudiadas.</i> .....	131
<b>Tabla 4.3</b> <i>Digestión Anaerobia: tasa de aplicación a ser empleada en proyectos.</i> .....	133
<b>Tabla 4.4</b> <i>Comparación relativa de los diversos procesos hidrolíticos de lodo de aguas residuales.</i> .....	135
<b>Tabla 4.5</b> <i>Contenido de sólidos obtenidos en la deshidratación mecánica.</i> .....	137
<b>Tabla 4.6</b> <i>Clases de lodo o producto derivado por la presencia de agentes patógenos.</i> .....	146
<b>Tabla 5.1</b> <i>Destino agrícola de lodo higienizado por estabilización alcalina prolongada, por grupo de UGL, en el estado de Paraná en 2014 y 2015.</i> .....	187
<b>Tabla 5.2</b> <i>Parámetros de sanidad de los lotes de lodo, higienizados por EAP aplicados en áreas agrícolas, en Paraná en 2014 y 2015.</i> .....	188
<b>Tabla 5.13</b> <i>Media y desviación estándar de los parámetros agronómicos de los lotes de lodo higienizados por estabilización alcalina prolongada, aplicados en áreas agrícolas en Paraná, en 2014 y 2015.</i> .....	189
<b>Tabla 5.4</b> <i>Concentraciones de sustancias orgánicas permitidas en suelos agrícolas según las resoluciones CONAMA 375/06 y SEMA 021/09.</i> .....	190
<b>Tabla 5.5</b> <i>Sustancias orgánicas detectadas en lote de lodo de AR de la UGL Río de las Antas, municipio de Iratí, aplicado en áreas agrícolas en 2015.</i> .....	192
<b>Tabla 5.6</b> <i>Media y coeficiente de variación de los parámetros inorgánicos (metales) de los lotes de lodo higienizados por estabilización alcalina prolongada, aplicados en áreas agrícolas en Paraná, en 2014 y 2015.</i> .....	193

<b>Tabla 6.1</b> Composición granulométrica de los materiales usados en la producción de ladrillos cerámicos. ....	202
<b>Tabla 6.2</b> Datos de composición de los materiales usados en los experimentos, los metales se expresan en mg/kg de peso seco. ....	203
<b>Tabla 6.3</b> Características físico-químicas de los suelos y del lodo generado en la PTAP utilizados en el estudio. ....	207
<b>Tabla 6.4</b> Valores de $\omega_{\text{óptima}}$ y $\rho_{\text{d Máxima}}$ de los suelos y de las mezclas. ....	110
<b>Tabla 6.5</b> Coeficientes de permeabilidad ( $k$ ) obtenidos en el laboratorio sobre los materiales utilizados. ....	110



# CAPÍTULO 1

**LODOS Y BIOSÓLIDOS GENERADOS  
EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS:**

**DE LA DISPOSICIÓN FINAL DE UN**

**» RESIDUO A LA GESTIÓN, MANEJO Y  
APROVECHAMIENTO DE UN RECURSO**



DOI: <https://doi.org/10.24267/9789585120136.1>



#### JAIME DÍAZ GÓMEZ

Ingeniero Sanitario de la Universidad del Valle; Msc. en Ciencias Ambientales y Tecnología del IHE-Delft. Líder del grupo de investigación de Recursos Hídricos y docente del programa de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Boyacá. E-mail: jaimediaz@uniboyaca.edu.co

#### GABRIEL RICARDO CIFUENTES OSORIO

Lic. en Biología y Química de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; Especialista en Química Ambiental de la Universidad Industrial de Santander; MsC. en Ciencias Ambientales de la Universidad Jorge Tadeo Lozano. Doctorando en Ciencia y Tecnología del ambiente y la Tierra Universidad de Jaén. España. Docente Titular; Director de Investigaciones Facultad de Ciencias e Ingeniería Universidad de Boyacá, Grupo de investigación Gestión del Recurso Hídrico. E-mail: grcifuentes@uniboyaca.edu.co

#### ERIKA SIERRA CÁRDENAS

Ingeniera Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Boyacá; Msc en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambientales de la Universidad Federal de Paraná. Docente de tiempo completo en el programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Boyacá- Grupo de Investigación Gestión Ambiental. E-mail: efsierra@uniboyaca.edu.co

#### JOSÉ ÉDGAR VILLALOBOS ENCISO

Ingeniero Civil de la Universidad Autónoma de Chiapas. Msc IHE-Delf. Profesor de Tiempo Completo Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas-México. E-mail: eenciso@unach.mx

#### CARLOS RAFAEL LARA MENDOZA

Ingeniero Sanitario de la Universidad de Boyacá, Colombia, Msc. en Ingeniería, área civil, de la Universidad de los Andes, Colombia. Docente de los programas Ingeniería Sanitaria e Ingeniería Ambiental de la Universidad de Boyacá. Investigador del Grupo Gestión del Recurso Hídrico de la Universidad de Boyacá. E-mail: carlara@uniboyaca.edu.co



Una de las consecuencias del crecimiento de la población mundial es el incremento en la demanda de agua potable y el respectivo aumento en la cantidad de las aguas residuales generadas. Para satisfacer esa demanda, es necesaria la implementación de estaciones de tratamiento que suministren suficiente agua con la calidad requerida. Al mismo tiempo, se deben construir las estaciones de tratamiento de las aguas residuales para el mejoramiento de la calidad de los efluentes y, además, reducir los impactos ambientales causados por su inadecuada disposición en el ambiente. La implementación de estos sistemas trae como consecuencia la generación de un subproducto denominado comúnmente como lodo.

Con el aumento global de la cantidad de estaciones de tratamiento de agua y aguas residuales, la gestión del lodo, de forma económica y ambientalmente aceptable, es uno de los aspectos más críticos que enfrenta la sociedad contemporánea (Spinosa, 2004).

Actualmente, el lodo es reconocido como un subproducto del tratamiento del agua que una vez tratado, contiene recursos valiosos como agua, nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, entre otros), minerales, carbono orgánico y energía, que pueden ser recuperados y obtener de ellos múltiples usos (Drechel, Qadir & Wichelns, 2015).

Reconociendo los beneficios y el valor económico en su apropiada gestión, la denominación "lodo" se refiere a los sólidos generados por los sistemas de tratamiento sin ningún tipo de adecuación; asimismo, el concepto "biosólido" remite al recurso cuyas características permiten su reutilización benéfica para un uso específico (Bridle, 2001). Esta es una visión integral en la que el tratamiento de agua ya no está orientado solamente a la calidad del efluente líquido, pues adquiere una dimensión en la que se habla de manejo integral de recursos, involucrando uso y generación de recursos en términos de agua, energía y minerales (Wilsenach, Maurer, Larsen & van Loosdrecht, 2003). Por lo anterior, actualmente las plantas de tratamiento de aguas residuales son consideradas Estaciones de Aguas Residuales para Recuperación de Recursos (EARR). En las EARR se producen recursos valiosos que pueden ser productos químicos como nutrientes (principalmente fósforo), bioenergía (metano de digestión anaerobia) y biosólidos (Guest et al., 2009). Este mismo concepto es aplicable a los sólidos producidos en las plantas convencionales empleadas para la producción de agua potable (Babatunde et al., 2007).

## Lodo y biosólidos generados en el tratamiento de aguas residuales

En el caso del lodo proveniente del tratamiento de aguas residuales, el lodo en exceso, también conocido como lodo activado, puede ser clasificado en primario y secundario (Tchobanoglous et al., 2014). El lodo primario está compuesto de los sólidos sedimentables removidos del agua cruda en la sedimentación primaria. Adicionalmente, se deben incluir los residuos como: la arena y los materiales sólidos de diferente constitución y tamaño, generados en el tratamiento preliminar como el cribado y la desarenación. El lodo activado es el lodo generado por los procesos biológicos de tratamiento secundario. Este lodo consiste básicamente de sustancias orgánicas e inorgánicas sobre las cuales se desarrollan poblaciones de bacterias en continuo crecimiento, sustancias poliméricas extracelulares, excretadas por las bacterias, compuestos orgánicos recalcitrantes (originalmente presentes en el agua residual cruda o formados durante el decaimiento de los microorganismos), y compuestos inorgánicos presentes en el agua residual (Zhang, Hu, Lee, Chang & Lee, 2017).

En el contexto mundial, se estima que la producción per cápita de lodo generado en el tratamiento de aguas residuales se encuentra dentro de un amplio rango de entre 16 a 94 g/persona, esto debido a las diferencias en los grados de tratamiento que reciben las aguas residuales (Werle, 2013).

### Características de los biosólidos provenientes del tratamiento de aguas residuales

El lodo residual del tratamiento de aguas puede recibir la denominación de biosólido cuando es debidamente procesado y tiene una calidad apropiada para ser empleado con propósitos de aprovechamiento como recurso (Andreoli, Von Sperling & Fernandes, 2007). La producción, reutilización y disposición final de este subproducto están entre los aspectos más relevantes en el tratamiento de las aguas residuales tanto en los países desarrollados como en los que se encuentran en vías de desarrollo. Dentro de los procesos a que son sometidos estos lodos se encuentran el espesamiento y la digestión, complementados con secado térmico y tratamiento alcalino para su estabilización, y la reducción de los niveles de microorganismos patógenos dentro de ellos (Silva-Leal, Bedoya-Rios & Torres-Lozada, 2013).

Los biosólidos generados en los procesos biológicos contienen cantidades significativas de fósforo (P) (2-4%, en peso seco) y nitrógeno (N) (2.8-3.8%, en peso seco), siendo ambos elementos esenciales para el crecimiento de las plantas (Haynes, Murtaza & Naidu, 2009). Adicionalmente, el lodo es rico en materia orgánica, potasio y micronutrientes como cobre y zinc (Sternbeck, 2011). El fósforo presente en el biosólidos es reconocido como el elemento más valioso desde el punto de vista del valor económico, además, es coadyuvante de la sostenibilidad en el uso del agua. Lo anterior, adquiere mayor relevancia ante la gran demanda de fertilizantes fosfatados en la agricultura, mismos que actualmente se producen a partir de roca fosfórica, un recurso natural no renovable que podría ser sustituido por el fósforo contenido en los biosólidos (Childers, Corman, Edwards & Elser, 2011).

Este uso ha sido sugerido también por otros autores a fin de reemplazar el fósforo, y parcialmente el nitrógeno, que toma la producción de vegetación; no obstante, la disponibilidad de fósforo proveniente de los biosólidos, comparada con la de los fertilizantes comerciales, ha sido tradicionalmente baja (Seyhan & Erdinçler, 2003), aunque algunos estudios reportan que la cantidad de P y N utilizable en los biosólidos se asimila a la de los fertilizantes inorgánicos (Kahiluoto, Kuisma, Ketoja, Salo & Heikkinen, 2015; Rigby, et al., 2016). Adicionalmente, el riesgo potencial de introducir metales pesados en los suelos, relacionado con la aplicación directa de biosólidos, ha fomentado el desarrollo de procesos dirigidos a la extracción del fósforo dentro de ellos. Sin embargo, dichos manejos aún no demuestran viabilidad económica (Egle, Rechberger, Krampe & Zessner, 2016).

Los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales también pueden contener otros contaminantes que pueden limitar su uso en agricultura, como son: organismos patógenos y parásitos (huevos de helminto) (Vieira da Rocha, Bares & Borba, 2016; Pinheiro, Andreoli, Alcantara & Aisse, 2016); empero, se ha demostrado que con el tratamiento por diversos métodos se logran reducir los niveles de estos organismos en los biosólidos hasta porcentajes seguros para actividades como la agricultura.

## **Reutilización de biosólidos producidos en el tratamiento de aguas residuales**

Históricamente, la disposición final de los biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales se ha centrado en la incineración, disposición final en relleno sanitario y uso agrícola (Fijalkowski, Rorat, Grobelak &

Kacprzak, 2017). Hoy en día, se reconocen alternativas de reuso como recuperación de suelos degradados; paisajismo y horticultura; fertilización de bosques; procesos industriales; recuperación de minerales y materiales, así como la recuperación de energía (Zhang, et al., 2017).

Reconociendo su valor como recurso, es importante mencionar que los biosólidos contienen sustancias que pueden afectar el balance ambiental, en especial cuando se aplican directamente en el suelo (Xia, Bhandari, Das & Pillar, 2005). Entre estos constituyentes, se pueden mencionar los residuos de los productos empleados en la economía doméstica conocidos como contaminantes emergentes (CE) (Jelic, et al., 2011). Ejemplos de estos residuos, son los restos de los productos farmacéuticos y del cuidado personal, no aprovechados (Clarke y Cummins, 2015). En la actualidad, se considera que esta situación debe recibir especial atención y estudio, ya que no existen suficientes análisis sobre su acumulación y uso en el ambiente ni legislación que regule el uso de biosólidos en suelo agrícola con respecto a la concentración de este tipo de sustancias (Sörme Lindqvist y Söderberg, 2003; Petrie, Barden & Kasprzyk-Hordern, 2015).

## **Lodos y biosólidos generados en la operación de sistemas de potabilización de agua**

Dentro del tratamiento del agua para abastecimiento humano, los procesos que generan lodo incluyen: filtración (lavado de filtros), procesos de membrana e intercambio iónico (regeneración de intercambiadores iónicos). El lodo de tratamiento de agua para potabilización se produce durante operaciones unitarias como coagulación con sales de aluminio o hierro y ablandamiento del agua por precipitación. La cantidad producida depende de la calidad y cantidad del agua tratada, el tipo y dosis de coagulante y las condiciones del proceso como la mezcla (Torres, Hernández & Paredes, 2012). El contenido de agua está entre 98.5 y 99.9%. En la actualidad, se estima una producción a nivel global alrededor de 10,000 ton/d de lodo de tratamiento de agua (Babatunde & Zhao, 2007).

## **Características del lodo originado en el proceso de tratamiento de agua potable**

De acuerdo con Sales et al. (2011), los coagulantes más comúnmente usados en el tratamiento de agua para abastecimiento son los óxidos o sales de aluminio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ ), hierro férrico (e.g.,  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) e hierro

(e.g.,  $\text{FeCl}_2$ ,  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), por tanto, el lodo producido en este tipo de tratamiento contiene residuos de estos productos coagulantes, además de concentraciones variables de microorganismos, sólidos suspendidos orgánicos y elementos químicos (Babatunde y Zhao, 2007).

La composición de óxidos varía según la calidad del agua cruda, naturaleza del coagulante, tecnología de tratamiento empleada y la calidad de agua producida (Ahmad, Ahmad & Alam, 2016). En general, el  $\text{SiO}_2$  forma la mayor porción del lodo, seguido por el  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y el  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , también se encuentran otros óxidos como:  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , y en una pequeña porción el  $\text{TiO}_2$  (Huang, Pan & Liu, 2005). La cantidad de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en el lodo está asociada con el tipo de coagulante empleado (sales de Al o Fe), y la concentración de esos metales en el agua cruda. Algunos metales pesados también pueden estar presentes asociados con el agua cruda y/o como impurezas en los coagulantes (Chiang, Chou, Hua, Chien & Cheeseman, 2009; Ippolito, Barbarick & Elliott, 2014; Zou, Xu & Li, 2009).

## **Reutilización de los biosólidos de tratamiento de agua**

El lodo generado por el uso de sales de aluminio empleadas en el tratamiento de agua para abastecimiento humano ha sido clasificado como un residuo no peligroso (Chiang, et al., 2009). Esto implica que no está sujeto a las restricciones de ese tipo de residuos. De acuerdo con Elliot y Dempsey (1991), las concentraciones de metales en lodos de tratamiento de agua son generalmente bajas y similares a las de los suelos. Sin embargo, para uso agrícola, Dassannayake, Jayasinghe, Surapaneni y Hetherington (2015) sugieren que se deben evaluar con profundidad las características de los biosólidos y su interacción con la biota del suelo, en una visión de largo plazo.

En general, el tratamiento para generar un biosólido incluye procesos de espesamiento, centrifugación y filtración, a fin de recuperar agua y minimizar el flujo de residuos, al mismo tiempo que los sólidos resultantes puedan estar en un valor de alrededor del 30% de materia seca (MS).

Por mucho tiempo, la disposición final de biosólidos ha sido en relleno sanitario, sin embargo, esta práctica es cada vez más costosa e insostenible, por lo que han surgido nuevas alternativas que buscan su reutilización como un recurso benéfico. Entre los usos de estos biosólidos se destacan: material para recuperación de áreas degradadas (Dayton & Basta, 2001), fabricación de materiales cerámicos refractarios, con alto contenido de

aluminio (Benlalla, Elmoussaouiti, Cherkaoui, Aithsain & Assafi, 2015), material primario para fabricación de clinker (Ferreira & Olhero, 2002), material de relleno para la industria de la construcción (Ramadan, Fouad & Hassainain, 2008), sustitución de la arcilla en la fabricación de ladrillos (Teixeira, et al., 2011), reutilización y recuperación de coagulantes (Parsons y Daniels, 1999), uso como sustrato en humedales artificiales (Tomenko, V., Ahmed, S. & Popov, V., 2007) y aplicación en remoción de contaminantes y metales pesados de aguas residuales (Yang, Wei, Zhang, Wang & Wang, 2014).

El proceso de investigación, bien sea a nivel científico o tecnológico, se encuentra directa o indirectamente relacionado y enfocado hacia un desarrollo económico-ambiental, en el contexto regional, nacional o internacional, reflejando su impacto sobre toda la comunidad. Hoy en día, las investigaciones se encuentran asociadas a la llamada competitividad internacional, por lo cual se requieren estudios que conlleven innovación, aprovechamiento y beneficio para las comunidades, tanto académicas como científicas, y para la sociedad en general. Los resultados obtenidos en las investigaciones realizadas por cada uno de los autores nacionales e internacionales, pertenecientes a instituciones de educación superior, adquieren sentido y valor si se dan a conocer públicamente, es así, que este libro producto de investigaciones se enmarca dentro del llamado reporte técnico de investigación que, de forma general y concisa, se utiliza para informar procedimientos, resultados y alternativas de solución de las investigaciones dentro de una estructura lógica (Donald, Jacobs & Razavieh, 1982).

Este libro está dirigido a las personas interesadas en los temas de lodos y biosólidos generados en el tratamiento de aguas; asimismo, proporciona fundamentos básicos derivados de investigaciones científicas, nacionales e internacionales, con el fin de apropiar el proceso investigativo en esta área.

El material aquí presentado pretende, en primer lugar, dar una visión general sobre la normatividad colombiana existente frente a la generación de lodos y biosólidos en las plantas de tratamiento de agua residual; en segunda instancia, se aborda el contexto internacional, caso de Brasil, donde está la legislación sobre el uso de estos materiales y su destinación agrícola, con criterios como clase de lodos, valores admisibles, usos y aspectos relacionados con la calidad de los mismos, entre otros. Teniendo como base dicha normatividad, se presenta la caracterización general de lodos y biosólidos producidos en las Plantas de Tratamiento de

Agua Residual (PTAR); a partir de ahí, se hace un recorrido por el ámbito nacional e internacional, fundamentalmente, con base en criterios físico-químicos y microbiológicos; además, se tiene en cuenta la deshidratación y el tiempo de secado de este tipo de material, para luego continuar con el denominado saneamiento de lodos y biosólidos, apartado que incluye el tratamiento y estabilización de los mismos utilizando diferentes metodologías, tanto en Colombia como en Brasil. Por último, se encentra el aprovechamiento, uso y destino.

## Conclusiones

Durante la última década se presentó una tendencia mundial para la variación del enfoque convencional del tratamiento de agua hacia el concepto de gestión integral de recursos naturales. Con base en este concepto, el lodo generado en el tratamiento de aguas, una vez convertido en biosólido, deja de ser un residuo para ser considerado un recurso benéfico que se puede reutilizar con diferentes propósitos.

Con relación a los biosólidos producidos en el tratamiento de agua para abastecimiento, existe hasta el momento un consenso en el sentido de que, por sus características, no debe ser clasificado como un residuo con restricciones para su reutilización con diferentes propósitos; sin embargo, en el caso de aplicaciones directas en suelos, es necesario evaluar en cada situación las características de los biosólidos y las interacciones entre los biosólidos y la biota del suelo.

Cuando se trata del uso para el mejoramiento de suelos de los biosólidos generados en el tratamiento de aguas residuales, se deben incluir las características de los biosólidos en cuanto al contenido de los CE. Cabe señalar que aún se debe desarrollar el marco normativo a este respecto.

## Referencias

- Ahmad, T., Ahmad, K., & Alam, W. (2016). Sustainable management of water treatment sludge through 3 'R' concept. *Journal of Cleaner Production*, 124, 1-13.
- Andreoli, C. V., Von Sperling, M., Fernandes, F., & Ronteltap, M. (2007). *Sludge treatment and disposal*. London, UK: IWA publishing

- Babatunde, A.O., & Zhao, Y.Q. (2007). Constructive approaches towards water treatment works sludge management: an international review of beneficial re-uses. *Critical Review Environmental Science and Technology*, 37(2), 129-164.
- Benlalla, A., Elmoussaouiti, M., Cherkaoui, M., Aithsain, L., & Assafi, M. (2015). Characterization and valorization of drinking water sludges applied to agricultural spreading. *Journal of Materials and Environmental Science*, 6(1), 1692-1698.
- Bridle, T. (2001). Other thermal processes. *Sludge into Biosolids*. 130-146. London, UK: IWA Publishing.
- Chiang, K. Y., Chou, P. H., Hua, C. R., Chien, K. L., & Cheeseman, C. (2009). Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. *Journal of Hazardous Materials*, 171(1-3), 76-82.
- Childers, D. L., Corman, J., Edwards, M., & Elser, J. J. (2011). Sustainability Challenges of Phosphorus and Food: Solutions from Closing the Human Phosphorus Cycle. *BioScience*, 61(2), 117-124
- Clarke, R. M., & Cummins, E. (2015). Evaluation of "Classic" and Emerging Contaminants Resulting from the Application of Biosolids to Agricultural Lands: A Review. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 21(2), 492-513.
- Donald, A., Cheser, J., & Razavieh, A. (1982). *Introducción a la Investigación Pedagógica*, 2ª. ed., México: Ed. Interamericana.
- Dassanayake, K. B., Jayasinghe, G. Y., Surapaneni, A., & Hetherington, C. (2015). A review on alum sludge with special reference to agricultural applications and future challenges. *Waste Management*, 38, 321-335.
- Dayton, E. A., & Basta, N. T. (2001). Characterization of drinking water treatment residuals for 644 use as a soil substitute. *Water Environment Research*, 73(1), 52-57.
- Drechel, P., Qadir, M., & Wichelns, D. (Eds.) (2015). *Wastewater: An economic asset in an urbanizing world*. Springer.
- Egle, L., Rechberger, H., Krampe, J., & Zessner, M. (2016). Phosphorus recovery from municipal wastewater: an integrated comparative technological, environmental and economic assessment of P recovery technologies. *Science of the Total Environment*, 571, 522-542.
- Elliott, H., & Dempsey, V. (1991). Agronomic effects of and application of water treatment sludges. *J. Am. Water Works Assoc.* 83, 126-131.
- Ferreira, J.M.F., Olhero, S.M., 2002. Al-rich sludge treatments towards recycling. *J. Eur. Ceram. Soc.* 22, 2243-2249. [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(02\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(02)00023-7).

- Fijalkowski, K., Rorat, A., Grobelak, A., & Kacprzak, M, J. (2017). The presence of contaminations in sewage sludge - The current situation. *Journal of Environmental Management*, 203, 1126-1136.
- Guest, J. S., Skerlos, S. J., Barnard, J. L., Beck, M. B., Daigger, G. T., Hilger, H., Love, N. G. (2009). A new planning and design paradigm to achieve sustainable resource recovery from wastewater. *Environmental Science and Technology*, 43(16), 6126-6130. <https://doi.org/10.1021/es9010515>.
- Haynes, R. J., Murtaza, G., & Naidu, R. (2009). Inorganic and Organic Constituents and Contaminants of Biosolids: Implications for Land Application. *Advances in Agronomy*, 104, 165-267.
- Huang, C., Pan, J. R., & Liu, Y. (2005). Mixing water treatment residual with excavation waste soil in brick and artificial aggregate making. *Journal of Environmental Engineering*, 131(2), 272-277.
- Ippolito, J. A., Barbarick, K. A., & Elliott, H. A. (2011). Drinking water treatment residuals: a review of recent uses. *Journal of Environmental Quality*, 40(1), 1-12.
- Jelic, A., Gros, M., Ginebreda, A., Cespedes-Sánchez, R., Ventura, F., Petrovic, M., & Barcelo, D. (2011). Occurrence, partition and removal of pharmaceuticals in sewage water and sludge during wastewater treatment. *Water Research*, 45(3), 1165-1176.
- Kahiluoto, H., Kuisma, M., Ketoja, E., Salo, T., & Heikkinen, J. (2015). Phosphorus in manure and sewage sludge more recyclable than in soluble inorganic fertilizer. *Environmental Science and Technology*, 49(4), 2115-2122.
- Petrie, B., Barden, R., & Kasprzyk-Hordern, B. (2015). A review on emerging contaminants in wastewaters and the environment: Current knowledge, understudied areas and recommendations for future monitoring. *Water Research*, 72, 3-27.
- Pinheiro Pompeo, R., Andreoli, C, V., Alcantara de Castro, E., & Aisse, M, M. (2016). Influence of long-term storage operating conditions on the reduction of viable *Ascaris* eggs in sewage sludge for agricultural reuse. *Water Air & Soil Pollution*, 227(5), 144-158.
- Ramadan, M, O., Fouad, H. A., & Hassanain, A. M. (2008). Reuse of water treatment plant sludge in brick manufacturing. *Journal of Applied Sciences Research*, 4(10), 1223-1229.
- Rigby, H., Clarke, B. O., Pritchard, D. L., Meehan, B., Beshah, F., Smith, S. R., & Porter, N. A. (2016). A critical review of nitrogen mineralization in biosolids-amended soil, the associated fertilizer value for crop production and potential for emissions to the environment. *Science of the Total Environment*, 541, 1310-1338.

- Sales, A., Rodrigues de Souza, F., & Almeida, F.C.R. (2011). Mechanical properties of concrete produced with a composite of water treatment sludge and sawdust. *Construction and Building Materials*, 25(6), 2793-2798.
- Parsons S. A. & Daniels S. J. (1999). The Use of Recovered Coagulants in Wastewater Treatment. *Environmental Technology*, 20(9), 979-986. DOI: 10.1080/09593332008616893
- Seyhan, D., & Erdinçler, A. (2003). Effect of lime stabilisation of enhanced biological phosphorus removal sludges on the phosphorus availability to plants. *Water Science and Technology*, 48(1), 155-162.
- Silva-Leal, J., Bedoya-Ríos, D., & Torres-Lozada, P. (2013). Efecto del secado alcalino en las características microbiológicas y químicas de biosólidos de plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas. *Química Nova*, 36(2), 207-214.
- Sörme, L., Lindqvist, A., & Söderberg, H. (2003). Capacity to influence sources of heavy metals to wastewater treatment sludge. *Environmental Management*, 31(3), 0421-0428.
- Spinosa, L. (2004). From sludge to resources through biosolids. *Water Science and Technology*, 50(9), 1-9.
- Sternbeck, J. (2011). *Using sludge on arable land: Effect based levels and longterm accumulation for certain organic pollutants*. Copenhagen: Nordic Council of Ministers.
- Teixeira, S.R., Santos, G.T.A., Souza, A.E., Alessio, P., Souza, S.A., & Souza, N.R. (2011). The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludge on the properties of ceramic materials. *Applied Clay Science*, 53(4), 561-565.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., Stensel, H. D., & Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. Boston: McGraw-Hill.
- Tomenko, V., Ahmed, S. & Popov, V. 2007. "Modelling constructed wetland treatment system performance," *Ecological Modelling*. Elsevier, 205(3), 355-364.
- Torres, P., Hernández, D., & Paredes, D. (2012). Uso productivo de lodos de plantas de tratamiento de agua potable en la fabricación de ladrillos cerámicos. *Revista Ingeniería de Construcción*, 27(3), 145-154.
- Vieira da Rocha, M, C., Barés, M. E., & Braga, M. C. B. (2016). Quantification of viable helminth eggs in samples of sewage sludge. *Water Research*, 103, 245-255.
- Werle, S. (2013). Potential and properties of the granular sewage sludge as a renewable energy source. *Journal of Ecological Engineering*, 14(1), 17-21.

- Wilsenach, J. A., Maurer, M., Larsen, T. A. & van Loosdrecht, M. C. M. (2003). From waste treatment to integrated resource management. *Water Science and Technology*, 48(1), 1-9.
- Xia, K., Bhandari, A., Das, K., & Pillar, G. (2005). Occurrence and fate of pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in biosolids. *Journal of environmental quality*, 34(1).91-104
- Yang, L., Wei, J., Zhang, Y., Wang, J., Wang, D., 2014. Reuse of acid coagulant recovered drinking waterworks sludge residual to remove phosphorus from wastewater. *Appl. Surf. Sci.* 305, 337-346. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.03.081>.
- Zhang, Q., Hu, J., Lee, D. J., Chang, Y. & Lee, Y. J. (2017). Sludge treatment: current research trends. *Bioresource technology*, 243, 1159-1172.
- Zou, J. L., Xu, G. R., & Li, G.B. (2009). Ceramsite obtained from water and wastewater sludge and its characteristics affected by  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$ , and  $MgO$ . *Journal of Hazardous Materials*, 165(1-3), 995-1001.





## CAPÍTULO 2

# NORMATIVIDAD



DOI: <https://doi.org/10.24267/9789585120136.2>



#### JORGE ANTONIO SILVA LEAL

Doctor en Ingeniería con énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle. Docente Facultad de Ingeniería, Universidad Santiago de Cali. Grupo de Investigación en Ingeniería Electrónica Industrial y Ambiental (GIEIAM). E-mail: [jorge.silva04@usc.edu.co](mailto:jorge.silva04@usc.edu.co).

#### SIMONE BITTENCOURT

Ingeniera Agrónoma. Maestría en Agronomía y Doctora en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambientales de la Universidad Federal de Paraná. Profesora de la Facultad Fael. Profesional de la Compañía de Saneamiento del Paraná (Sanepar) en los temas de gestión de residuos de sistemas de residuos líquidos. Email: [sbittencourt@sanepar.com.br](mailto:sbittencourt@sanepar.com.br)



## 2.1 NORMATIVIDAD SOBRE LODOS Y BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

*Jorge Antonio Silva Leal*

Las características de los biosólidos varían mucho dependiendo de: su origen (biológico o químico), edad, nivel de tratamiento del cual provienen (primario, secundario o una mezcla de ambos) y su fuente original (Lescher & Spinosa, 1998); es por esto que, si se pretende obtener beneficios de ellos, se hace necesario conocer las características físicas, químicas y microbiológicas de este subproducto, a fin de estar en condiciones de establecer su potencialidad de aprovechamiento o sus restricciones para ser usados. Teniendo en cuenta lo anterior, en algunos países, la normatividad concerniente a este tipo de subproducto llega a ser muy exigente en términos de la calidad con que se debe entregar al usuario, ya que se han encontrado consecuencias graves y algunos efectos negativos al no prevenir las reacciones o interacciones ocasionadas por la utilización de este tipo de residuo.

### Normatividad internacional

En febrero de 1993, el Congreso de los Estados Unidos de América (EUA), bajo asesoría de la *Environmental Protection Agency* (USEPA), expidió la norma para el manejo y disposición de lodos y biosólidos generados en el tratamiento de las aguas residuales, la cual fue publicada en el Código del Registro Federal, título 40, parte 503 (USEPA, 1993). La publicación de la Norma 40CFR, parte 503, estableció un precedente importante en cuanto al manejo de lodos y biosólidos, fijando límites tanto de metales pesados en su contenido como en la calidad microbiológica y la atracción de vectores; además, recomendó tratamientos para su estabilización, de tal forma que se lograra cumplir con dichas exigencias.

Posteriormente, en países como México, Brasil, Chile y Argentina también se logró normar el uso y disposición de biosólidos a partir de los lineamientos definidos en la norma emitida por la USEPA. En la Tabla 2.1 se muestra la clasificación microbiológica y parasitológica de los lodos o biosólidos para cada norma en algunos de estos países.

**Tabla 2.1** Parámetros microbiológicos y parasitológicos para la caracterización de biosólidos

Parámetro	Unidad	USA <sup>(1)</sup>	México <sup>(2)</sup>	Brasil <sup>(3)</sup>
Coliformes Fecales	NMP/g	Clase A: <1X10 <sup>5</sup> Clase B: <2X10 <sup>6</sup>	Clase A: <1X10 <sup>5</sup> Clase B: < 1x10 <sup>5</sup> Clase C: < 2X10 <sup>6</sup>	Clase A: <1X10 <sup>5</sup> Clase B: <1X10 <sup>6</sup>
Salmonella sp	NMP/4g	Clase A: < 3	Clase A: < 3 Clase B: <3 Clase C: < 300	Ausencia en 10gr
Huevos de helminthos	HH/4g	Clase A: < 1	Clase A: < 1 Clase B: <10 Clase C: < 35	Clase A: < 1 Clase B: < 10
Virus	UFP/4g	Clase A: < 1	-	Clase A: <1

Norma 40CFR parte 503 (USEPA, 2003); <sup>(2)</sup> NOM-004–2002 (SERMANAT, 2003); <sup>(3)</sup> Resolución N° 375 (CONAMA, 2006).

En la mayoría de estas normas, los biosólidos se clasifican en clases A y B, con excepción de la norma mexicana que introduce una tercera categoría (clase C). La clase A corresponde a biosólidos que pueden ser utilizados sin restricción en agricultura, incluyendo todos los usos urbanos en los que se ocasione el contacto directo con la población; los de clase B pueden ser aplicados con restricciones observándose contacto indirecto, (e.g., revegetación, cultivo de alimentos que se procesen antes de ser consumidos o cobertura en rellenos sanitarios), y los de clase C, que aparecen solo en la norma mexicana, pueden ser empleados en usos forestales o en el mejoramiento de suelos. En las normas mostradas resalta que, mientras todas establecen límites para coliformes fecales (*i.e.*, *salmonella sp* y huevos de helmintos), los virus solo son reglamentados en la norma americana y en la brasileña. En la Tabla 2.2 se muestran los valores del contenido máximo de metales pesados establecidos por las normas de diferentes países.

**Tabla 2.2** Contenido máximo de metales pesados (en mg/kg) establecidos por diferentes países.

METAL	USA <sup>(1)</sup>	MÉXICO <sup>(2)</sup>	BRASIL <sup>(3)</sup>
As	75	41	41
Ba	-		1300
Cd	85	39	39
Cu	4300	1500	1500
Cr	3000	1200	1000
Hg	57	17	17
Mb	-	-	50
Ni	420	420	420
Pb	840	300	300
Se	100	-	100
Zn	7500	2800	2800

(1) Norma 40CFR parte 503 (USEPA, 2003)(2) NOM-004–2002 (SERMANAT, 2003); (3)Resolución N° 375 (CONAMA, 2006).

Asimismo, en la Tabla 2.2 se observa que los valores de metales pesados establecidos en la norma de la USEPA (2003) son mayores que en los otros dos países. Adicionalmente, la USEPA fija los tratamientos a los cuales deben ser sometidos los lodos o biosólidos, a fin de disminuir el contenido de patógenos en ellos y así poder ser clasificados como clase A, tal y como se muestra en las Tablas 2.3 y 2.4, donde aparecen los procesos a los cuales deben ser sometidos estos residuos, para garantizar la disminución de los patógenos en ellos y garantizar un biosólido de clase B.

**Tabla 2.3** Tratamientos para catalogar un biosólido como de clase A, y disminuir la cantidad de patógenos en un biosólido clase B.

Tratamientos	Descripción
<b>Temperatura</b>	<p>Cuando el porcentaje de sólidos en los lodos es <math>\geq 7\%</math>, la temperatura a la que se deben someter los lodos deben ser <math>\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}</math>, en un periodo <math>\geq 20</math> minutos; Sin embargo, para cumplir con estas condiciones, la norma recomienda la utilización de la ecuación 1, para determinar, con base en cualquiera de las dos condiciones, el tiempo o la temperatura adecuada Ec.1:</p> $t = \frac{131,700,000}{10^{0.14*T}} \quad \text{Ec. (1)}$
<b>Temperatura</b>	<p>Cuando el porcentaje de sólidos en los lodos es <math>&lt; 7\%</math>, el periodo para someter el lodo a una temperatura <math>\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}</math> debe estar entre 15 s y <math>\leq</math> a 30 min, las condiciones de tiempo o temperatura deben ser determinadas usando la Ec.2:</p> $t = \frac{50'070.000}{10^{0.14*T}} \quad \text{Ec. (2)}$ <p>Donde: t: tiempo en días T: temperatura en <math>^{\circ}\text{C}</math></p>
<b>Temperatura</b>	<p>Cuando el porcentaje de sólidos es <math>\geq 7\%</math>, y las partículas pequeñas de los lodos son calentadas por gases o líquidos inmiscibles, la temperatura a que se deben someter los lodos debe ser <math>\geq 50\text{ }^{\circ}\text{C}</math>, durante un periodo mínimo de 15 segundos. Las condiciones de tiempo y temperatura se determinan usando la ecuación 1.</p>
<b>Alcalino</b>	<p>Tratamiento alcalino y de temperatura: <math>\text{pH} &gt; 12</math>, al menos por 72 horas, y Temperatura <math>&gt; 52\text{ }^{\circ}\text{C}</math>, al menos por 12 horas.</p>
<b>Compostaje</b>	<p>Método de pila estática aireada durante un tiempo <math>&gt; 30</math> días; pila con volteo mecánico (windrow) con temperatura <math>&gt; 55\text{ }^{\circ}\text{C}</math>, durante un tiempo <math>&gt; 15</math> días, mínimo 5 volteos en el periodo estipulado.</p>
<b>Secado térmico</b>	<p>Los lodos son secados por contacto directo o indirecto con gases calientes para reducir su contenido de humedad hasta en un 10% o. Se debe verificar que la temperatura de las partículas del lodo excedan los <math>80\text{ }^{\circ}\text{C}</math> o que la temperatura del bulbo húmedo del gas en contacto con el lodo, una vez salga del secado, exceda los <math>80\text{ }^{\circ}\text{C}</math>.</p>

Fuente: adaptado de USEPA (1993).

**Tabla 2.4** Métodos de tratamiento recomendados para obtener biosólidos de clase B.

<b>Tratamientos</b>	<b>Descripción</b>
<b>Digestión aerobia</b>	Los lodos son agitados con aire u oxígeno para mantener las condiciones aerobias por un tiempo de residencia celular medio, entre 40 - 60 días, a una temperatura entre 15 - 20 °C.
<b>Digestión anaerobia</b>	Los lodos son tratados en ausencia de oxígeno por un tiempo de residencia celular específico a una temperatura específica. Los valores del tiempo de residencia celular medio deben estar entre 15 - 35 días a una temperatura de 55 °C.
<b>Compostaje</b>	Se pueden usar los siguientes métodos: pila estática, con aireamiento o hileras, donde la temperatura debe ser $\geq 40$ °C y permanecer durante un periodo de 5 días.
<b>Tratamientos</b>	<b>Descripción</b>
<b>Estabilización con cal</b>	Se debe adicionar suficiente cal a los lodos para elevar el pH a 12 durante 2 horas de contacto.
<b>Secado con aire</b>	Los lodos son secados sobre camas de arena, suelos pavimentados o sin pavimentar. Estos se secan por un periodo mínimo de 3 meses. Durante 2 de los 3 meses, la temperatura ambiente promedio diaria debe estar por encima de 0 °C.

Fuente: adaptado de USEPA (1993).

## Normatividad colombiana

En Colombia, el Decreto 1287 publicado en 2014, a través del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, estableció que los biosólidos que pudieran ser aprovechados en la agricultura deberán cumplir los criterios mostrados en la Tabla 2.5. Este decreto debe ser aplicado por todas las instituciones prestadoras del servicio público domiciliario de alcantarillado, en el componente de tratamiento de aguas residuales municipales como productores de biosólidos. Así como por los distribuidores y los usuarios de los mismos en el territorio nacional, y no aplica para lodos que tengan características de peligrosidad.

**Tabla 2.5** Valores máximos de contaminantes contenidos en biosólidos para que se permita su uso en la agricultura.

Variable	Unidad	Categoría de biosólido	
		A	B
Arsénico	mg/kg	20	40
Cadmio	mg/kg	8	40
Cobre	mg/kg	1.000	1.750
Cromo	mg/kg	1.000	1.500
Mercurio	mg/kg	10	20
Molibdeno	mg/kg	18	75
Níquel	mg/kg	80	420
Plomo	mg/kg	300	400
Selenio	mg/kg	36	100
Zinc	mg/kg	2.000	2.800
<b>Microbiológicas y parasitológicas</b>			
Coliformes Fecales	UFC/g	$< 1,0 \cdot 10^3$	$< 2,0 \cdot 10^6$
Huevos de helmintos	HH/4 g	$< 1$	$< 10$
Salmonella sp.	UFC/25 g	Ausencia	$< 1,0 \cdot 10^3$
Virus entéricos	UFP/4 g	$< 1,0$	-

Fuente: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia. (2014). Decreto 1287. Criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales. Diario Oficial.

Además, la norma colombiana recoge en su mayoría los criterios establecidos en la norma americana sobre biosólidos en cuanto a su calidad microbiológica; sin embargo, en los temas de contenido de metales pesados, la norma colombiana es un poco más estricta. Los biosólidos categoría A y B pueden ser empleados en diferentes usos como se muestra en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6** Usos para los biosólidos categoría A y B en Colombia.

<b>Categoría A</b>	<b>Categoría B</b>
Aplicación en zonas verdes.	En agricultura, se aplica directamente en el suelo.
Como producto para uso en áreas privadas (plantas ornamentales y arborización).	En el mejoramiento o recuperación de suelos degradados.
En agricultura.	En plantaciones forestales.
Los mismos usos de la categoría B.	Como insumo en procesos de elaboración de abonos o fertilizantes orgánicos o productos acondicionadores para suelos a través de tratamientos físicos, químicos y biológicos que modifiquen su calidad original.
<b>Categoría A</b>	<b>Categoría B</b>
	Remediación de suelos, lechos biológicos
	Como soporte físico y sustrato biológico en sistemas de filtración, absorción y adsorción.
<b>Categoría A</b>	<b>Categoría B</b>
	Como insumo en la fabricación de materiales para la construcción.
	Coadyuvante en la operación de rellenos sanitarios.
	En procesos de valorización energética.
	Revegetalización y paisajismo de escombreras.

Fuente: Decreto 1287 (2014). Criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales. Minvivienda, Bogotá, Colombia.

Los residuos o biosólidos que no cumplan con los valores establecidos para las categorías A y B podrán usarse en:

- Operación de rellenos sanitarios.

- Disposición conjunta con Residuos Sólidos Municipales (RSM) en rellenos sanitarios y de manera independiente en sitios autorizados.

- En procesos de valoración energética.

- Así mismo, se establecen las siguientes restricciones para el uso del suelo en el cual se apliquen biosólidos categoría B:

- No se podrán aplicar biosólidos durante un período de un (1) año antes de la cosecha y durante la cosecha misma de cultivos hortícolas o frutícolas que estén en contacto directo con el suelo y que se consuman en estado crudo.

- En cultivos de raíz, solo se permitirá cosechar después de veinte (20) meses, si los biosólidos permanecieron sobre el suelo por cuatro (4) meses o más, antes de su incorporación al terreno.

- En cultivos de raíz, solo se permitirá cosechar después de tres (3) años, si los biosólidos permanecieron sobre el suelo menos de cuatro (4) meses, antes de su incorporación al terreno.

- Forraje para ganado y cultivos agroindustriales no destinados a consumo humano directo, se deberá considerar que la última aplicación de biosólidos al suelo se haga por lo menos tres (3) meses antes de la cosecha.

- Solo se podrán poner a pastar animales domésticos después de tres (3) meses de la última aplicación de biosólidos al terreno.

- En suelos de uso forestal, restringiendo el acceso al área durante el mes siguiente a la última aplicación.

Y se define que en ningún caso los biosólidos podrán ser aplicados en:

- Playas, páramos y cuerpos de agua.

- En suelos saturados como vegas.

- En suelos cuyo nivel freático máximo se encuentre a menos de un (1) metro de profundidad con respecto a la superficie del terreno, y en aquellos suelos en los que se genere un efecto de nivel freático colgante.

- En zonas aledañas a fuentes de captación subterráneas de agua para consumo humano o animal, en un radio inferior a los cien (100) metros.
- En zonas aledañas a fuentes superficiales de captación de agua para consumo humano o animal, en una franja mínima de treinta (30) metros, medidos en forma paralela a las líneas de mareas máximas. En el caso de los nacimientos de fuentes de agua, en una extensión de por lo menos cien (100) metros a la redonda, medidos a partir de su periferia.
- Suelos con alto riesgo de inundación.
- Clase B, a menos de trescientos (300) metros de distancia de áreas residenciales urbanas, hospitales, locales de expendio de alimentos, escuelas, y parques.
- En suelo rural, a menos de 100 metros de viviendas aisladas.
- En terrenos agrícolas, en tasas mayores a la tasa agronómica, considerando la clase de cultivos en que serán empleados.
- En suelos donde se encuentren especies de fauna y flora amenazados para la aplicación de biosólidos de categoría B.

Aunque la normatividad colombiana retoma muchos valores de la norma americana publicada en 1993, y establece las tasas máximas a aplicar de biosólidos con base en el contenido de metales pesados, se observa que no contempla los criterios de aplicación de biosólidos considerando los contenidos de nutrientes del suelo y de los subproductos a aplicar. Estas dosis de aplicación si se establecen por la USEPA (2000), las cuales se determinan mediante las ecuaciones 3 y 4.

$$\text{Dosis Biosólido} = \left( \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right) = \frac{\text{Nitrógeno recomendado para el cultivo} \left( \frac{\text{kg}}{\text{ha}} \right)}{\text{Nitrógeno disponible en el biosólido} \left( \frac{\text{kg}}{\text{t}} \right)} \quad \text{Ec. (3)}$$

El nitrógeno disponible en el biosólido se calcula con base en la Ec. (4) (United States Environmental Protection Agency, 2000).

$$ND = \frac{K_{\min}}{100} x (NTK - NH_4^+) + 0.5(NH_4^+) + (NO_3^- + NO_2^-) \text{ Ec. (4)} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

ND: nitrógeno disponible (mg/kg)

$K_{\min}$ : constante de mineralización para cada biosólido

NKT: nitrógeno total Kjeldahl del biosólido (mg/kg)

$NH_4^+$ : nitrógeno amoniacal en el biosólido (mg/kg)

$NO_3^-$  y  $NO_2^-$ : nitratos y nitritos en el biosólido

Esto implica que cuando se efectúen las aplicaciones de biosólidos se pueda estar sobredosificando algún elemento presente, ya que las aplicaciones no se llevan a cabo considerando los requerimientos del cultivo sino las tasas máximas a usar, lo que podría ocasionar problemas más graves de contaminación en los suelos por un posible exceso del nitrógeno o el fósforo contenido en el suelo.

## Referencias

Decreto 1287 (2014) [Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio]. Por el cual se establecen criterios para el uso de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Julio 10 de 2014.

Leschber, R., & Spinosa, L. (1998). Developments in sludge characterization in Europe. *Water Science and Technology*, 38(2), 1-7.

Resolución 375 de 2006. [Resolução N° 375]. 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. 29 de agosto de 2006. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

SEMARNAT [Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México] (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de: <[http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=691939](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939)> el 15/08/200

USEPA (1993). *Land Application of Sewage Sludge a Guide for Land Appliers on the Requirements of the Federal Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge*, 40 CFR Part 503. EPA-831-B-93-002b. Washington DC: U. S. Environmental Protection Agency.

USEPA (2000). *Land Application of Biosolids. Biosolids Technology Fact Sheet EPA 832-F-00-064*. Washington DC: U. S. Environmental Protection Agency.

USEPA (2003). *Control of pathogens and vector attraction in sewage sludge. Environmental regulations and technology. EPA/625/R-92/013*. Cincinnati, OH: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Risk Management Research Laboratory, Center for Environmental Research Information.

## 2.2 LEGISLACIÓN BRASILEÑA SOBRE USO EN LA AGRICULTURA DEL LODO GENERADO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

*Simone Bittencourt*

El tratamiento de aguas residuales (AR) genera como subproductos el efluente tratado, el lodo y, en el caso de usar procesos anaeróbicos, biogás. El lodo es el resultado de la remoción y la subsecuente concentración de la materia orgánica contenida en el AR, por lo que sus características dependerán tanto de la composición como del caudal del afluente como del sistema de tratamiento utilizado. Además, existe una fuerte relación entre el grado de tratamiento del AR y la cantidad de lodo producido, por lo que generalmente, una mejora en la eficiencia de los tratamientos de AR también contribuye al aumento en la generación de lodo.

En Brasil, el lodo proviene de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y se enmarca en la clasificación de residuos sólidos, Clase II A-no inertes, en los términos de la NBR 10004, los cuales pueden tener propiedades tales como: combustibilidad, biodegradabilidad o solubilidad en agua (ABNT, 2004). El adecuado destino final que se preste a estos residuos es un factor fundamental para que una PTAR alcance íntegramente su objetivo de descontaminación ambiental, mismo que constituye una necesidad tanto de salud pública y responsabilidad social como de preservación ambiental.

A escala global, es creciente la preocupación por la gestión sostenible de los residuos generados durante el saneamiento de las aguas servidas, como se revela en el Programa 21 (o Agenda 21, denominación en inglés) de la Cumbre de la Tierra, celebrada en Río de Janeiro en 1992; en dicho programa, en el capítulo 21, se hace referencia específica a la Gestión ecológicamente racional de los desechos sólidos y cuestiones relacionadas con las aguas cloacales; asimismo, se establece que ese tipo de gestión debe ser una de las cuatro principales áreas de programas relacionados con el manejo de residuos (ONU, 1992).

Este aspecto también es ratificado en la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS) de Brasil, al establecerse que, en la gestión y gerenciamiento

de residuos sólidos, se debe considerar el siguiente orden de prioridades: no generación, reducción, reutilización, reciclaje, tratamiento de los residuos sólidos, y la disposición de los residuos en los rellenos sanitarios (Ley núm. 12.305, 2010).

El uso en la agricultura es una forma ambientalmente amigable del destino final del lodo proveniente de AR, ya que promueve el reciclaje de nutrientes y energía, además de beneficiar los suelos al aportarles materia orgánica (MO), lo que induce mejorías en sus características físicas, químicas y biológicas. Por lo que este destino final genera beneficios tanto a la sociedad como al medio ambiente, ya que contribuye a mejorar el cultivo de alimentos y la conservación del suelo y del agua.

En Brasil, la Resolución 375/06 del Consejo Nacional de Medio Ambiente (CONAMA), emitida el 29 de agosto de 2006 (por el MMA Brasil) reglamenta el uso con fines agrícolas del lodo generado en Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). Mientras que en el Estado de Paraná la Resolución 021/09 de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Hídricos (SEMA Paraná, 2009), siendo de menor jerarquía, contiene los procedimientos, normas y requisitos definidos en la Resolución 375/06 del CONAMA, pero en algunos aspectos es más restrictiva que lo establecido en la resolución federal.

Estas resoluciones enlistan los procedimientos para concesión de licencias, frecuencias de verificación o monitoreo de los lodos y elaboración de los proyectos agrícolas que involucren estos lodos, adicionalmente, para las condiciones de manejo, transporte y aplicación de este subproducto. Los documentos también proporcionan recomendaciones para los tipos de cultivos y áreas agrícolas que se consideren aptas para recibir adecuadamente los lodos, junto con las restricciones de ubicación, definición de las tasas de aplicación y el monitoreo de las áreas de aplicación de las zonas agrícolas; además, presentan procedimientos relacionados con la caracterización de los lodos provenientes de AR, mediante análisis de laboratorio y las frecuencias de esta caracterización, dependiendo de la cantidad de lodos utilizados con fines agrícolas. Entre los requisitos de la calidad de los lodos requerida para fines agrícolas se establecen los límites máximos de concentración para agentes patógenos y los indicadores bacterianos y contaminantes inorgánicos, igualmente, se requiere el monitoreo de sustancias orgánicas en los lodos provenientes de AR, sin determinar los límites máximos de concentración de estas.

En Paraná, los destinos de los lodos con fines agrícolas solo pueden formalizarse mediante la existencia de una Unidad de Gestión de Lodo (UGL), debidamente licenciada por el Instituto Ambiental del Paraná (IAP), que también debe estar autorizada por el Ministerio de Agricultura, Pecuaria y Abastecimiento (MAPA) (Decreto Federal núm. 4.954, 2004). La Resolución CONAMA 375/06 define como Unidad de Gerenciamiento de Lodo (UGL) a la que es responsable de recibir, procesar, caracterizar, transportar y destinar el lodo producido por una o más PTAR. La UGL, además, se encarga del seguimiento de los efectos ambientales, agronómicos y sanitarios de su aplicación para uso en la agricultura (Resolución CONAMA 375/06, 2006).

### **Resolución CONAMA 375/06**

En Brasil, el término “biosólido” no fue adoptado en la Resolución CONAMA 375/06 (2006) que regula el uso agrícola del lodo proveniente de AR; en dicha resolución se utiliza el término “Lodo proveniente de AR” para todo tipo de lodo, incluso cuando se trata de garantizar el uso seguro de este. En el presente estudio, para facilitar el entendimiento de la información, se utilizará el término biosólido para designar al lodo generado en una PTAR que ha recibido el tratamiento apropiado a fin de ser utilizado en la agricultura, conforme al análisis de criterios de legislaciones internacionales.

En los países de Europa y en los EUA, donde el uso en la agricultura de lodos provenientes de AR es más antiguo, la legislación para la aplicación de biosólidos se encuentra en una etapa bastante consolidada. En esos países, las grandes cantidades de lodos que se generan cada año en las PTAR son añadidas en miles de hectáreas de terrenos agrícolas, lo que lleva a tener reglamentos bastante completos para regular dicha aplicación, por lo que los criterios de control están en constante evaluación (Beecher, 2008). Anteriormente, la principal preocupación de los legisladores en el contexto mundial era el riesgo de la diseminación de patógenos por el suplemento de esos lodos; sin embargo, en la actualidad, debido a que los procesos de control de estos contaminantes ya se encuentran bastante consolidados, la preocupación de los parlamentarios en los países desarrollados es el control de sustancias químicas. La Academia Nacional de Ciencias de los EUA constató que no hay evidencia científica documentada de que los reglamentos estadounidenses vigentes sobre tratamiento y gestión de aguas residuales hayan cumplido con proteger eficientemente la salud pública.

Estos reglamentos se basan en la evaluación de los riesgos potenciales de organismos patógenos, contaminantes inorgánicos y algunos productos químicos encontrados en los biosólidos (Beecher, 2008).

La mayor parte de los criterios y procedimientos de la Resolución CONAMA 375/06, emitida el 29 de agosto de 2006, se basó en el reglamento estadounidense concerniente al tema. En los EUA, la cantidad permitida de contaminantes en el lodo proveniente de AR está regulada por la Agencia de Protección Ambiental (USEPA por sus siglas en inglés), en virtud de la autoridad que le fue concedida por la Ley de Agua Limpia (en inglés, *Clean Water Act-CWA- 1972 Amendments*) y, especialmente, por la Parte 503 del Código Federal de Regulaciones 40 (en inglés, 40 CFR Part 503) que entró en vigor en 1993, donde se establecen directrices para la reducción de patógenos y se imponen límites a la concentración de nueve contaminantes inorgánicos, no obstante, no incluye reglamentación sobre los contaminantes orgánicos en biosólidos (USEPA, 2009). La Sección 405 (d) de la CWA exige que la EPA identifique y reglamente los niveles de contaminantes tóxicos que pueden estar presentes en los biosólidos y que puedan tener efectos en la salud pública y el medio ambiente. De esta forma, periódicamente se efectúa la Encuesta Nacional sobre Lodos provenientes de AR (en inglés, *Targeted National Sewage Sludge Survey - TNSSS*), con el objetivo de asistir a la EPA en la evaluación de los niveles de sustancias potencialmente contaminantes contenidas en lodos generados en el tratamiento de AR (USEPA, 2009).

## Aspectos relacionados con la calidad del biosólido

### Sanidad

Los principales aspectos que abordan las legislaciones en relación con requisitos sanitarios se refieren a patrones y prácticas de gestión y tratamiento del lodo, proveniente de aguas residuales domésticas; lo anterior, con el objetivo de reducir tanto los contenidos de patógenos a niveles aceptables como la posibilidad de atracción de los vectores.

En Brasil, el lodo destinado a usos agrícolas se divide en clases A y B, ambas sujetas a restricciones para su uso; asimismo, se requiere que el contenido de patógenos sea reducido a niveles con una mínima probabilidad de causar enfermedades en las condiciones específicas de uso (Resolución CONAMA 375/06, 2006). Sin embargo, la Resolución CONAMA 375/06 establece que después de cinco años de la fecha de su publicación, es

decir, a partir de agosto de 2011, solo se permitirá el uso de lodos producidos en el tratamiento de AR de clase A, excepto en el caso de la propuesta de nuevos criterios o límites, basados en estudios de evaluación de riesgos y datos epidemiológicos nacionales que demuestren la seguridad del uso en la agricultura de lodos de clase B (Resolución CONAMA 375/06, 2006).

En el estado de Paraná, de acuerdo con la Resolución SEMA 021/09, para efectuar la aplicación del lodo proveniente de AR con fines agrícolas se deben cumplir los límites para la clase A (ver Tabla 2.7); además, dicho lodo debe ser sometido a los adecuados procesos de higienización (e.g., procesos de reducción adicional de patógenos [PRAP] y procesos de reducción de atracción de vectores [PRAV]).

**Tabla 2.7** Límites de concentración de organismos patógenos e indicadores bacterianos en lodo proveniente de aguas residuales destinado a usos agrícolas.

Indicador bacteriano/ Agentes patógenos	Unidad	Límite en resoluciones		
		CONAMA 375/06		SEMA 021/09
		Lodo A	Lodo B	
Coliformes	NMP g <sup>-1</sup> de sólidos totales (ST)	<10 <sup>3</sup>	<10 <sup>6</sup>	<10 <sup>3</sup>
Huevos de helmintos viables	Huevos viables g <sup>-1</sup> de ST	<0,25	<10	<0,25
Salmonella	en 10g <sup>-1</sup> de ST	Ausencia	-	Ausencia
Virus	UFP o UFFg <sup>-1</sup> de ST	<0,25	-	<0,25

NOTA: ST-Sólidos Totales, NMP-Número más probable, UFF-Unidad formadora de foco, UFP-Unidad formadora de placa.

Fuente: Resolución CONAMA 375/06 (2006), Resolución SEMA 021/09 (2009).

Las dos resoluciones (CONAMA 375/06 (2006), SEMA 021/09) permiten que se adopten procesos PRAP y PRAV no mencionados en ellas, siempre que sean aceptados por el órgano ambiental tras la debida comprobación de su eficiencia.

## Contaminantes inorgánicos

La Tabla 2.8 permite comparar los límites de sustancias inorgánicas presentes en los lodos provenientes de AR, destinados a usos agrícolas, tanto de Brasil como del estado de Paraná, la Unión Europea (EU), Holanda (considerado uno de los países con límites más estrictos de la EU), los EUA y México. También, en la Tabla 2.8, se puede verificar que la Resolución SEMA 021/09 (2009), establece límites más restrictivos para algunas sustancias inorgánicas que las consideradas en la Resolución CONAMA 375/06 (2006). La Resolución CONAMA 375/06 establece, en el art. 8°, que la entidad ambiental competente podrá solicitar otros ensayos y análisis no citados en la resolución, en función de las características específicas del área de captación del alcantarillado sanitario y de los efluentes recibidos; por otra parte, las UGL podrán requerir, ante la entidad ambiental competente, dispensa o alteración de la lista de sustancias a ser analizadas en los lodos o productos derivados (Resolución CONAMA 375/06, 2006).

De acuerdo a Sampaio (2013), la Resolución CONAMA 375/06 plantea diferentes metodologías para definir los límites de los parámetros inorgánicos para As, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb, Se y Zn; también, propone la metodología de análisis de riesgo propuesta por la CFR 40 Parte 503, y, para el Cr, Ba y Mo, establece la metodología de la Compañía Ambiental del Estado de São Paulo (CETESB). El autor considera inadecuado el uso de metodologías diferenciadas para la determinación de límites de concentración de sustancias inorgánicas contenidas en el lodo, así como el establecimiento de límites para todo el territorio brasileño (Cr, Ba y Mo) con base en valores de referencias establecidos a través de estudios de caracterización de suelos efectuados en el estado de São Paulo.

Según la Directiva 86/278 /EEC de la UE, la concentración de sustancias inorgánicas en los biosólidos no debe superar el límite superior presentado en la Tabla 2.8, considerando que los Estados miembros deben evaluar el aumento de la dispersión de las sustancias, su absorción por plantas y, de ser necesario, la reducción de valores límite fijados (DOCE, 1986). El documento de trabajo de revisión de la Directiva 86/278/EEC propone que las concentraciones límites (expuestos en Tabla 2.7) disminuyan a largo plazo (Iranpour, et al., 2004).

**Tabla 2.8** Límites de sustancias inorgánicas contenidas en lodos con fines de uso agrícola en Brasil, el estado del Paraná, la unión europea, Holanda, EUA y México.

País	Límite	Parámetros (mg kg-1 ST)										
		As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Brasil <sup>(1)</sup>		41	1300	39	1000	1500	17	50	420	300	100	280
												0
Paraná <sup>(2)</sup>	Actual superior	41	1300	20	1000	1000	16	50	300	300	100	250
												0
	Actual superior	-	-	40	-	1750	25	-	400	120	-	400
										0		0
UE <sup>(3)</sup>	Actual inferior	-	-	20	-	1000	16	-	300	750	-	250
												0
	Corto plazo	-	-	10	1000	1000	10	-	300	750	-	250
												0
Mediano plazo		-	-	5	800	800	5	-	200	500	-	200
												0
	Largo plazo	-	-	2	600	600	2	-	100	200	-	150
											0	
Holanda <sup>(3)</sup>		15	-	1,25	75	75	0,75	-	30	100	-	300
EUA <sup>(4)</sup>	EQ	41	-	39	-	1500	17	-	420	300	100	280
												0
	Máximo	75	-	85	-	4300	57	75	420	840	100	750
											0	
México <sup>(5)</sup>	Exce-lente	41	-	39	1200	1500	17	-	420	300	-	280
												0
	Bueno	75	-	85	30000	4300	57	-	420	840	-	750
											0	

Fuente: (1) Resolución CONAMA 375/06 (2006); (2) Resolución SEMA 021/09 (2009); (3) Iranpour et al. (2004); (4) USEPA (2007); (5) SEMARNAT, México (2003).

NOTA: EQ (exceptional quality)-biosólido de calidad excepcional

Las resoluciones CONAMA 375/2006 y SEMA 021/09 determinan que se deben observar los límites de carga total acumulada teórica en el suelo, en cuanto a la aplicación de sustancias inorgánicas, no estableciendo el periodo de tiempo o cantidad de aplicaciones subsiguientes en la misma área para cumplir con esos límites. Las resoluciones también establecen que cuando la carga acumulada teórica agregada para cualquiera de las sustancias inorgánicas alcance el 80% de la carga acumulada teórica permitida establecida (ver Tabla 2.9), se deberá realizar el monitoreo de sustancias inorgánicas en el suelo después de la aplicación del lodo.

**Tabla 2.9** Límites de carga acumulada de sustancias inorgánicas después de la aplicación de lodo en suelo para Brasil, el estado de Paraná, la Unión Europea y EUA

País	Unidades del límite	Parámetros										
		As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Brasil <sup>(1)</sup>	(kg ha <sup>-1</sup> )	30	$\frac{26}{5}$	4	154	137	1,2	13	74	41	13	445
Paraná <sup>(2)</sup>	(kg ha <sup>-1</sup> )	30	$\frac{26}{5}$	4	154	137	1,2	13	74	41	13	445
UE <sup>(3)</sup>	(kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	-	-	0,15	-	12	0,1	-	3	15	-	30
EUA <sup>(4)</sup>	APLR (kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	2	-	1,9	-	75	0,85	-	21	15	5	140
	CPLR (kg ha <sup>-1</sup> )	41	-	39	-	$\frac{150}{0}$	17	-	420	300	100	$\frac{280}{0}$

Fuente: (1) Resolución CONAMA 375/06 (2006); (2) Resolución SEMA 021/09 (2009), (3) DOCE (1986), (4) USEPA (1994).

NOTA: Límite basado en la carga acumulada de contaminantes (en inglés, Cumulative Pollutant Loading Rate, CPLR) y límite basado en la carga acumulada anual de contaminantes (en inglés, Annual Pollutant Loading Rate APLR).

En la CFR 40, Parte 503, se establecen los límites de contaminantes inorgánicos de acuerdo con el tipo de biosólido, es decir: biosólido de calidad excepcional (EQ) presentado en la Tabla 2.7, biosólido CPLR (por sus siglas en inglés, Cumulative Pollutant Loading Rate, CPLR) obtenido sobre la base de la carga acumulada de contaminantes y biosólido APLR (por sus siglas en inglés, Annual Pollutant Loading Rate) obtenido sobre la base de la carga acumulada anual de contaminantes, estos dos últimos

presentados en la Tabla 2.8 (USEPA, 1994). Si la concentración de la sustancia inorgánica en el biosólido se encuentra entre el límite EQ y el límite máximo, se debe satisfacer el límite de la carga acumulada presentada en la Tabla 2.8 (Iranpour, et al., 2004).

Además de establecer límites para las cantidades anuales de sustancias inorgánicas que pueden ser incorporadas en los suelos, sobre la base de una media de 10 años (ver Tabla 2.8), la UE también establece límites de concentración de sustancias inorgánicas en los suelos, con base en una muestra representativa con pH entre 6 y 7 (ver Tabla 2.10), resaltando que el suelo no podrá recibir biosólido si contiene ya en sí una concentración por encima de esos límites (DOCE, 1986).

**Tabla 2.10** Límites de sustancias inorgánicas en el suelo (pH 6 a 7) definidos en la Directiva 86/278/EEC de la UE.

Parámetros	Cadmio	Cobre	Níquel	Plomo	Zinc	Mercurio
Límites (mg kg <sup>-1</sup> )	1 a 3	50 a 140	30 a 75	50 a 300	150 a 300	1 a 1,5

Fuente: DOCE (1986).

Según Hespanhol (2014), prevenir la acumulación de contaminantes en el suelo es uno de los dos criterios más importantes para implantar normas que regulen la disposición de biosólidos en el suelo; este criterio se cumple mediante el establecimiento de límites numéricos para variables significativas, a partir de las cuales se asume que la introducción de contaminantes en el suelo es compensada por la remoción correspondiente, como puede ser: el escurrimiento superficial, lixiviación, evaporación y absorción por las plantas. Su principal ventaja es que no hay necesidad de datos sobre el transporte y la degradación de contaminantes, escenarios de exposición y relaciones dosis-respuestas. Sin embargo, a pesar de poder ser utilizado globalmente, este criterio conduce a valores extremadamente restrictivos que exigen sistemas avanzados de tratamiento o de tasas de aplicación muy restrictivas. El segundo criterio es aquel que tiene por objetivo maximizar la capacidad del suelo para asimilar y atenuar el efecto de los contaminantes; en este criterio son determinadas las concentraciones máximas permitidas en el suelo con base en escenarios de exposición, tasas de transferencia de contaminantes y cantidades de contaminantes transferidos en cada fase de la cadena de transmisión.

Según el autor, ese criterio es el que lleva a límites aceptables, permitiendo su aplicación en países que no disponen de recursos financieros para adoptar sistemas avanzados de tratamiento.

## Contaminantes orgánicos

La mayoría de los enfoques sobre la presencia de contaminantes orgánicos en lodos se basan en la elección de compuestos de mayor incidencia en los usos industriales o domésticos de las aguas (Rogers, et al., 1989). La Resolución CONAMA 375/06 (2006), en Brasil, y la Resolución SEMA 021/09 (2009), en el estado de Paraná, establecen una lista de 34 contaminantes orgánicos que deben ser evaluados, incluso cuantitativamente, en lodos provenientes de AR destinados a usos agrícolas (ver tabla 2.11).

**Tabla 2.11** Lista de sustancias orgánicas a ser cuantificadas en lodos provenientes de PTAR según las resoluciones CONAMA 375/06 y SEMA 021/09, a fin de dar uso agrícola a los lodos

Grupo de sustancias	Sustancia		
Bencenos clorados	1,2-Diclorobenceno	1,2,3-Triclorobenceno	1,2,3,4- Tetraclorobenceno
	1,3-Diclorobenceno	1,2,4-Triclorobenceno	1,2,4,5- Tetraclorobenceno
	1,4-Diclorobenceno	1,3,5-Triclorobenceno	1,2,3,5- Tetraclorobenceno
Ftalatos o ésteres de ácido ftálico	Di-n-butilftalato	Di(2-etilhexil)ftalato	Dimetil ftalato
		(DEHP)	
Fenoles no clorados	Cresoles		
Fenoles clorados	2,4-Diclorofenol	2,4,6-Triclorofenol	Pentaclorofenol
Hidrocarburos aromáticos Policíclicos (HPAs)	Benzo(a)antraceno		
	Benzo(a)pireno	Indeno(1,2,3-c.d)pireno	Fenantreno
	Benzo(k)fluoranteno	Naftaleno	Lindano
Contaminantes orgánicos persistentes (COPs)	Aldrin	Clordano	Mirex
	Dieldrin	Heptacloro	Hexaclorobenceno
	Endrin	DDT Toxafeno	PCBs Dioxinas y Furanos

Fuente: Resolución CONAMA 375/06 (2006) y Resolución SEMA (2009).

En la Tabla 2.11, se muestran los compuestos orgánicos industriales y agro-tóxicos, incluyendo los 12 Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs) contenidos en la Convención de Estocolmo (UNEP, 2001), cuya producción y uso están prohibidos en Brasil desde 2004. La inclusión de las sustancias orgánicas en las resoluciones fue fundamentada en resultados preliminares de investigaciones a nivel nacional y en la legislación internacional, ya que en Brasil son escasos los estudios sobre el tema.

En la Tabla 2.12 se presentan algunos de los pocos países que establecen límites para contaminantes orgánicos en sus normativas referentes a la calidad de biosólidos. Para la UE, los compuestos orgánicos, presentados en esta Tabla, no figuran en la Directiva 86/278/EEC, sino que forman parte de una propuesta para establecer límites para las concentraciones de determinados grupos de contaminantes orgánicos (Iranpour, et al., 2004).

**Tabla 2.12** Límites de concentraciones de contaminantes orgánicos contenidos en biosólidos destinados a usos agrícolas establecidos en la normatividad de diferentes países

Contaminantes orgánicos	Concentración límite (mg kg <sup>-1</sup> ST)					
	UE <sup>(1)</sup>	República Checa <sup>(2)</sup>	Alemania (Propuesta) 2007)	Eslovenia <sup>(2)</sup>	China <sup>(2)</sup>	Nueva Escocia Canadá <sup>(3)</sup>
Orgánicos halogenados absorbibles (AOX)	500	500	400	-	500	-
Sulfonatos de alquilbenzeno lineares	2.60 0	-	-	-	-	-
Di (2-etilhexil) ftalato (DEHP)	100	-	-	-	-	-
Nonilfenol y Nonifenoles etoxilados	50	-	-	-	-	-
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA)	6	-	1*	0,04	3*	-
Bifenilas policloradas (PCBs)	0,8	0,6**	0,1**	< 0,05	0,2	1,7x10 <sup>-5</sup> ***
Dioxinas y furanos	10 <sup>-4</sup>		3x10 <sup>-5</sup>		10 <sup>-4</sup>	5x10 <sup>-5</sup> ****

Fuente: (1) Iranpour et al. (2004), (2) Beecher (2008), (3) CCME (2010)

NOTA: \* Benzo (a) pireno, \*\* suma de 6 congéneres, \*\*\* Clase A, \*\*\*\* Clase B

En la UE, algunos Estados miembros han introducido límites para parámetros adicionales como contaminantes orgánicos, patógenos y otros elementos. En el caso de los Países Bajos, la región flamenca en Bélgica, Baviera y Alemania, los rigurosos patrones resultaron en la prohibición efectiva de la utilización de biosólidos (EC, 2009).

Las resoluciones CONAMA 375/06 y SEMA 021/09 no establecen límites máximos de concentración para sustancias orgánicas contenidas en el lodo; sin embargo, establecen que siempre que estas sean detectadas en la caracterización del lodo proveniente de AR, deberá ser realizado el monitoreo de esas sustancias orgánicas contenidas en el suelo, también, determinan que deben ser observadas constantemente las concentraciones en el suelo descritas en la Tabla 2.13, agregando que, la frecuencia del monitoreo será establecida por el órgano ambiental competente.

**Tabla 2.13** Concentraciones de sustancias orgánicas permitidas en suelos agrícolas según las resoluciones CONAMA 375/06, SEMA 021/09, y valores de prevención de la CETESB (2014).

Compuestos	Concentración permitida en el suelo CONAMA 375/06	Valor de prevención CETESB 2014
	(mg kg <sup>-1</sup> )	
BENZENOS CLORADOS		
1,2-Diclorobenzeno	0,73	0,7
1,3-Diclorobenzeno	0,39	0,4
1,4-Diclorobenzeno	0,39	0,1
1,2,3-Triclorobenzeno	0,01	0,01
1,2,4-Triclorobenzeno	0,011	0,01
1,3,5-Triclorobenzeno	0,5	0,5
1,2,3,4-Tetraclorobenzeno	0,16	0,003
1,2,4,5-Tetraclorobenzeno	0,01	0,01
1,2,3,5-Tetraclorobenzeno	0,0065	0,006
FTALATOS O ÉSTERES DE ÁCIDO FTÁLICO		
Di-n-butilftalato	0,7	0,1
Di(2-etilhexil)ftalato (DEHP)	1	1
Dimetil ftalato	0,25	0,25
FENOLES NO CLORADOS		
Cresóis	0,16	0,2

Compuestos	Concentración permitida en el suelo CONAMA 375/06	Valor de prevención CETESB 2014
	(mg kg <sup>-1</sup> )	
FENOLES CLORADOS		
2,4-Diclorofenol	0,031	0,03
2,4,6-Triclorofenol	2,4	0,1
Pentaclorofenol	0,16	0,01
HIDROCARBONOS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAPs)		
Benzo(a)antraceno	0,025	0,2
Benzo(a)pireno	0,052	0,1
Benzo(k)fluoranteno	0,38	0,8
Indeno(1,2,3-c.d)pireno	0,031	0,4
Naftaleno	0,12	0,7
Fenantreno	3,3	3,6
Lindano	0,001	0,001
CONTAMINANTES ORGÁNICOS PERSISTENTES (COPs)		
Aldrin	-	0,02
Dieldrin	-	0,01
Endrin	-	0,001
Clordano	-	-
Heptacloro	-	-
DDT	-	0,01
Toxafeno	-	-
Mirex	-	-
Hexaclorobenzeno	-	-
PCBs	-	0,0003
Dioxinas y Furanos	-	-

Fuente: Resolución CONAMA 375/06 (2006); Resolución SEMA 021/09 (2009); CETESB (2014).

Los valores de concentraciones de compuestos orgánicos permitidos en suelos agrícolas, según las resoluciones CONAMA 375/06 y SEMA 021/09, son iguales a los valores de prevención para suelos establecidos por la CETESB (2005). De acuerdo con esta última publicación, los valores de prevención (VP) representan la concentración máxima de determinada sustancia, encima de la cual pueden ocurrir alteraciones perjudiciales en la calidad tanto del suelo como del agua subterránea. Los VP se determinaron para el suelo con base en ensayos con receptores ecológicos y

deben ser utilizados para estandarizar la introducción de sustancias ajenas al suelo. Cuando esta cantidad se sobrepasa, la continuidad de la actividad de incorporación de lodo en los suelos será sometida a una nueva evaluación y los responsables legales por la agregación de las cargas contaminantes deben proceder al monitoreo de los impactos resultantes.

Se observa en la Tabla 2.13 que la Resolución CONAMA 375/06 no establece concentraciones en el suelo para los COPs, sin embargo, en 2014 la *Companhia Ambiental do Estado de São Paulo* efectuó la sustitución de los valores orientadores para suelos y aguas subterráneas en el estado de São Paulo, incluyendo VP para algunos COPs (CETESB, 2014).

En los EUA se llevó a cabo la Encuesta Nacional sobre Lodos provenientes de Aguas Residuales (*Targeted National Sewage Sludge Survey–TNSSS*), con el fin de evaluar la presencia de 145 sustancias, entre estas: 4 aniones (nitrito, nitrato, fluoruro y fósforo soluble), 28 contaminantes inorgánicos, 4 HAPs, 2 sustancias semivolátiles, 11 retardadores de llama, 72 fármacos y 25 esteroides y hormonas, en 74 PTARs. El objetivo de la encuesta fue identificar contaminantes tóxicos adicionales que pueden estar presentes en lodos producidos en el saneamiento y, cuando fuera apropiado, promulgar regulaciones para esos contaminantes, consistentes con lo establecido en Ley de Agua Limpia (en inglés, CWA) (USEPA, 2009).

De los compuestos analizados en la encuesta (TNSSS), solo dos constan en la Resolución CONAMA 375/06 (2006): el compuesto orgánico semivolátil Di (2-etilhexil) ftalato (DEHP), el cual se utiliza como plastificante, y el hidrocarburo aromático policíclico (HAP) benzo (a) pireno, oriundo de la pirolisis o combustión incompleta de la materia orgánica.

## **Frecuencia de monitoreo de los biosólidos**

En Brasil, la frecuencia de monitoreo para lodos generados en el saneamiento que pueden ser utilizados en la agricultura se define con base en la cantidad del biosólido destinado a ello, por toneladas de sólidos totales (ST), de forma similar a lo establecido en los EUA (ver Tabla 2.14). En México (SEMARNAT, 2003) y en una propuesta de la UE, aún sin entrar en vigor [Informe Final, Parte I visión general, Impactos sociales, económicos y ambientales del uso del lodo proveniente del saneamiento de AR en suelos] (EC, 2009), el monitoreo se define con base en la cantidad de biosólido producido.

**Tabla 2.14** Frecuencia de monitoreo para biosólido que pueden ser utilizados en agricultura según reglamentación de los EUA, Unión Europea, México y Brasil

Reglamento		Frecuencia de monitoreo (veces por año)					
		Una	Dos	Cuatro	Seis	Ocho	Doce
		<b>ST (t año<sup>-1</sup>)</b>					
CONAMA 375/06 <sup>(1)</sup>		< 60	60 - 240 1500	240 - 15000	1500 -	-	> 15000
CFR 40 Parte 503 <sup>(2)</sup>		< 290	-	290- 1500	1500- 15000	-	> 15000
Informe final Impactos EC <sup>(3)</sup>	Parámetros agronómicos	< 50	50- 250	250- 2500	-	2500- 5000	> 5000
	Sustancias inorgánicas	< 50	50- 250	250- 2500	-	2500- 5000	> 5000
	Orgánicos (sin Dioxinas)	250-1000	1000- 2500	2500- 5000	> 5000	-	-
	Dioxinas	1000-5000	> 5000	-	-	-	-
Microorganismos		< 50	50- 250 2500	250- 5000	-	2500- 5000	> 5000
México <sup>(4)</sup>		< 1500 15000	1500- 2500	>15000	-	-	-

Fuente: (1) Resolución CONAMA 375/06 (2006), (2) USEPA (2007), (3) EC (2009), (4) SEMARNAT, México (2003).

De acuerdo con la reglamentación actual de la UE, los Estados miembros deciden sobre la frecuencia de monitoreo para el muestreo de biosólidos y suelos, así como sobre los análisis requeridos. Según la norma, el lodo debe analizarse al menos cada seis meses y si se constatan variaciones en la calidad de las AR se debe aumentar la frecuencia de los análisis. Si los resultados de los análisis no varían de manera significativa durante el período de un año, el lodo debe analizarse de doce en doce meses. Los parámetros a ser analizados son: materia seca, MO, pH, N, P, Cd, Cu, Ni, Pb, Zn, Hg y Cr, siendo que, cuando sea comprobado que no se encuentran presentes el Cu, Zn y Cr o se encuentran presentes en cantidades despreciables en el agua residual, es posible solicitar una modificación en la frecuencia de los análisis (DOCE, 1986).

En los EUA, en la CFR 40, Parte 503, se estipulan las frecuencias de monitoreo en los biosólidos referidas a parámetros de sanidad y sustancias inorgánicas, y en Brasil, en la Resolución CONAMA 375/06 se refieren a parámetros agronómicos de sustancias inorgánicas, sanidad y sustancias orgánicas; sin embargo, según la propuesta plasmada en el informe final presentado a la Comisión Europea (EC, 2009), la frecuencia de seguimiento puede ser distinta para cada uno de los siguientes parámetros: parámetros agronómicos, sustancias inorgánicas, sustancias orgánicas (excepto las dioxinas), dioxinas y microorganismos. En la norma mexicana la frecuencia de monitoreo se refiere a sustancias inorgánicas, indicadores bacterianos de contaminación, patógenos y parásitos. Además, en la CFR 40 Parte 503 se establece que se permite la reducción de la frecuencia de monitoreo después de dos años que el biosólido ha sido monitoreado conforme a la frecuencia establecida en la Tabla 2.14.

Según la norma mexicana, el generador puede estar exento de realizar el muestreo y análisis de uno o más de los parámetros definidos, siempre que la detección de estos sea en cantidades menores que los límites fijados o cuando, debido al origen del lodo y biosólido, estos no contengan los contaminantes establecidos en la norma; en ambos casos, deberá demostrarse por escrito y bajo juramento, quedando la información sujeta a verificación por las autoridades competentes (SEMARNAT, México, 2003).

La Resolución CONAMA 375/06 establece que la caracterización del lodo de saneamiento de AR, representada por el muestreo, es válida exclusivamente para el lote generado durante el período comprendido entre este muestreo y el subsiguiente; determina además, que si los valores para sustancias potencialmente tóxicas alcanzan el 80% de los límites establecidos, la frecuencia de monitoreo deberá ser aumentada según los parámetros definidos por el órgano ambiental competente, además, la UGL deberá implementar las medidas adecuadas para reducir estos valores. También, estipula que a criterio del órgano ambiental encargado de las licencias, en conjunto con los órganos de salud y de agricultura competentes, las frecuencias de monitoreo pueden ser aumentadas, si esto es debidamente justificado (Resolución CONAMA 375/06, 2006).

## Cultivos aptos para recibir biosólidos

En Brasil (una vez que, a partir de agosto de 2011, solo se permite el uso del lodo Clase "A" para fines agrícolas) y en el estado de Paraná está prohibida la utilización de lodos generados por el saneamiento en suelos que sustenten pastos y cultivos de plantas olerícolas (hortalizas), tubérculos y raíces, así como en cultivos inundados y en los demás cultivos cuya parte comestible entre en contacto con el suelo, como son: el maní, la yuca y la papa. En los suelos donde se aplica ese tipo de lodo, los pastos podrán ser sembrados hasta después de un período mínimo de 24 meses, posterior a la última aplicación, y solo después de pasado un período mínimo de 48 meses, subsiguiente a la última aplicación, podrán cultivarse olerícolas, tubérculos, raíces y demás cultivos cuya parte comestible entre en contacto con el suelo, adicionalmente, aquellos cultivos que requieren condiciones de inundación. De igual forma, esta clase de lodo puede ser utilizado en cultivos cuyos productos son consumidos después de la industrialización o en aquellos que no sean consumidos "in natura", tales como: frijol, soja, sorgo, canola, trigo, cebada, cultivos forrajeros para fertilización verde y en la reforestación (Resolución CONAMA 375/06, 2006; Resolución SEMA 021/09, 2009).

En cuanto al lodo generado del saneamiento de AR de clase "B", la Resolución CONAMA 375/06 permite su utilización solo para cultivo de café, silvicultura, cultivos para producción de fibras y aceites, con la aplicación mecanizada en surcos o pozos, efectuada durante la incorporación del lodo. Esta misma resolución no es aplicable para uso de lodos provenientes de AR de cualquier clase en áreas degradadas, el cual no es incluido como uso agrícola del lodo. Así, para este tipo de disposición final se hace necesaria la elaboración de un proyecto específico y de autorización ambiental del órgano ambiental estatal (Bittencourt, 2014).

En los EUA, el término "Calidad Excepcional" (en inglés, Exceptional Quality, EQ) fue introducido para describir a los biosólidos que cumplen simultáneamente con los tres siguientes criterios: las exigencias de límites de concentración de contaminantes (ver Tabla 2.1.5), los requerimientos de cantidad de patógenos de los lodos clase A, y la reducción de atracción de vectores en su procesamiento. Este término no fue definido en la CFR Parte 503, pero es aceptado nacionalmente, y determina que los biosólidos con esta calidad pueden ser libremente aplicados en suelos sin ninguna restricción. Sin embargo, la tasa de aplicación debe estar de acuerdo con las necesidades de nutrientes para el crecimiento de las plantas, además

de cumplir con la normatividad relativa al monitoreo de la calidad del suelo. De la misma forma, no se establecen restricciones de uso para el biosólido de patrón avanzado en el informe final de la propuesta presentada a la UE (2009) de su futura reglamentación. Para el biosólido Clase "B" en los EUA y para el estándar convencional en la UE, se establecen restricciones de uso, la cuales se resumen en la Tabla 2.15 (Iranpour, et al., 2004).

**Tabla 2.15** Restricciones de uso para el biosólido clase "B" y de estándar convencional, según la reglamentación de los EUA y de la Unión Europea respectivamente.

Aplicación	Clase B (EUA)	Estándar convencional (UE)
Alimentos u otros cultivos cuyo producto de la cosecha no tiene contacto con la superficie del suelo.	No coleccionar antes de 30 días.	-
Alimentos cuyas partes cosechadas están totalmente por encima del suelo, pero tocan la superficie del suelo.	No coleccionar antes de 14 meses.	No coleccionar antes de 12 meses.
Frutas y vegetales en contacto con el suelo y otros alimentos que son consumidos crudos.	-	No coleccionar antes de 30 meses.
Alimentos cuyas partes cosechadas están por debajo de la superficie de la tierra: <ul style="list-style-type: none"> <li>- los biosólidos permanecen en el área por más de 4 meses, antes de la incorporación al suelo,</li> <li>- los biosólidos permanecen en el área por menos de 4 meses, antes de la incorporación al suelo.</li> </ul>	No coleccionar antes de: <ul style="list-style-type: none"> <li>20 meses</li> <li>b) 38 meses</li> </ul>	-
Producción de césped, ubicada en un área con un alto potencial de exposición pública.	Impedir el contacto o exposición con el público antes de 12 meses.	
Pastos.	Sin pastoreo antes de 30 días.	Por seis semanas. Forrajeras sin cosecha en seis semanas, después de la aplicación.
Terreno con alto potencial de contacto o exposición con el público (e.g., parque o campo de fútbol).	Acceso restringido por 12 meses.	Prohibida la aplicación.

Aplicación	Clase B (EUA)	Estándar convencional (UE)
Terreno con bajo potencial de contacto o exposición pública (e.g., tierras agrícolas privadas).	Acceso restringido por 30 días	Aplicación a profundidad o con arado inmediato a la aplicación (tierras arables).
Árboles frutales, viñedos, plantaciones de árboles y reforestación y recuperación de áreas degradadas.		Aplicación en profundidad y sin acceso al público durante 10 meses después de la aplicación.

Fuente: Iranpour, et al. (2004).

## Tasa de aplicación de biosólidos

La Resolución CONAMA 375/06 (2006) establece que la tasa de aplicación máxima en base seca ( $t \text{ ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ) debe ser el menor valor calculado de acuerdo con los siguientes criterios:

- La aplicación máxima anual no debe exceder el cociente entre la cantidad de N recomendada para el cultivo (en  $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), según la recomendación agronómica oficial del Estado, y el contenido de N disponible en el lodo proveniente del saneamiento de AR ( $N_{\text{disp}}$  en  $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ ), calculado de la siguiente manera:

$$N_{\text{disp}} = (FM/100) \times (NKj-NH_3) + 0,5 \times (NH_3) + (NO_3 + NO_2) \text{ Ec. (5)}$$

Donde:

FM: fracción de mineralización del nitrógeno (%);

NKj: Nitrógeno Kjeldahl ( $\text{mg kg}^{-1}$ );

NH<sub>3</sub>: Nitrógeno amoniacal ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) y NO<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub>: Nitrato y Nitrito ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

- El cálculo de la tasa de aplicación máxima anual deberá considerar los resultados de los ensayos de elevación de pH, provocados por el lodo en el suelo predominante en la región, a fin de garantizar que el pH final de la mezcla suelo-lodo no supere el límite de 7,0.

- Se deben observar los límites de carga total acumulada teórica en el suelo conforme la aplicación de sustancias inorgánicas (ver Tabla 2.3).

Es importante destacar que, en el caso de la aplicación de lodo higienizado por estabilización alcalina, la elevación del pH del suelo a valores superiores a siete, podrá producir más fácilmente efectos negativos en los cultivos agrícolas, conforme a lo observado por Chueiri, et al. (2007) y por Tamanini, et al. (2008).

La Directiva 86/278/EEC establece que para la aplicación del lodo se deben considerar las necesidades nutricionales de las plantas sin poner en riesgo la calidad, tanto del suelo como de las aguas superficiales y subterráneas. En el caso de la aplicación en suelos con pH inferior a 6, los Estados miembros deberán considerar el aumento de la movilidad de las sustancias inorgánicas y su absorción por las plantas y, si fuera necesario, reducir los valores límite de concentración de las sustancias inorgánicas en los suelos (DOCE, 1986).

Según Harrison, et al. (2006), existen diferencias importantes entre los enfoques de Europa y los de EUA, en la determinación de la tasa de aplicación de lodo en suelos agrícolas. En algunos países europeos la tasa de aplicación de lodo está limitada directamente por la cantidad de materia seca de lodo en una hectárea al año (que varía de 1 a 4 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), en otros, la limitación se basa en la tasa de aplicación de P en el suelo, que es mucho más restrictiva que la tasa basada en la limitación de N, utilizada en los EUA. En Dinamarca, por ejemplo, la tasa de aplicación no puede exceder los 30 kg de P ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, lo que corresponde a, aproximadamente, 1 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de sólidos totales (ST) de lodo, mientras que en los EUA la tasa límite es de 10 t·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup> de ST de lodo.

La norma mexicana no presenta criterios para calcular la tasa de aplicación (SEMARNAT, México, 2003) y en Canadá la tasa de aplicación de biosólidos es definida por las provincias, siendo que, de las once provincias, en siete se establece la tasa de aplicación basada solamente en la tasa agronómica. Algunas provincias establecen restricciones para la frecuencia de aplicación; por ejemplo, en Quebec la tasa de aplicación se calcula sobre la base de la tasa agronómica, considerando el suministro de N y P, sin embargo, para el uso forestal el límite es de 200 kg de N disponible ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y para biosólido C2 (clase con mayor contenido de sustancias inorgánicas) una tasa máxima de 22 t ha<sup>-1</sup> de ST durante 5 años (CCME, 2010).

## Consideraciones finales

En el estado de Paraná la Resolución SEMA 021/09 (2009) contiene los procedimientos, estándares y requisitos para la utilización de los lodos en la agricultura, definidos en la Resolución CONAMA 375/06; dicha resolución es, en algunos aspectos, más restrictiva que la resolución federal. Tanto las regulaciones anteriores (Instrucción Técnica IAPCEP/DTA n. 001/2002, la Resolución SEMA 001/07) como la norma actual (Resolución SEMA 021/09), no permiten la existencia de lodos equivalentes a la clase B (Resolución CONAMA 375/06, 2006), ya que tienen límites menores a la concentración máxima permitida en lodos provenientes del saneamiento para Cd, Cu, Hg, Ni y Zn, en comparación con la Resolución CONAMA 375/06 (2006).

La Resolución SEMA 021/09 (2009) define UGL como una unidad vinculada, o no, a una PTAR que realiza la gestión de los lodos generados por una o más PTARs, con fines de reutilización agrícola. El documento considera que el lodo solo se puede aplicar en la agricultura, si cumple con los requisitos previos que tornen su uso seguro, siendo los principales tópicos reglamentados los que siguen:

- Licenciamiento ambiental: define el sistema de licenciamiento en el reciclaje agrícola.
- Caracterización y calidad del lodo: establece que el lodo debe ser caracterizado en relación con el potencial agronómico, estabilidad, sustancias inorgánicas y orgánicas potencialmente tóxicas e indicadores bacterianos y agentes patógenos. Además, define los límites máximos para sustancias inorgánicas, agentes patógenos y estabilidad.
- Capacidad de las áreas para la aplicación: establece un sistema de clasificación de la capacidad del suelo para la aplicación de lodo (Souza, et al., 2008), considerando características del suelo, localización y entorno de las áreas.
- Cultivos en los que se permite el uso de lodo: define los cultivos donde el uso está vetado.
- Formas de aplicación: define la forma de aplicación en función del relieve de las áreas.

- Tasas de aplicación: establece criterios para definir la tasa de aplicación en función de las características del lodo, del suelo donde se utilizará y del cultivo a ser plantado.
- Transporte del lodo: establece requisitos para el transporte de la UGL hasta las áreas de uso.
- Frecuencia de muestreo: define la frecuencia en función del tamaño de la UGL.
- Control de la aplicación: define la necesidad de elaboración de un proyecto agronómico.
- Monitoreo ambiental: establece los criterios de monitoreo de las áreas que recibieron aplicación de lodo proveniente del saneamiento de AR.

De acuerdo con lo establecido en la Resolución CONAMA 375/06 (2006), los criterios en ella contenidos pueden ser reformulados en cualquier momento, con base en investigaciones científicas y desarrollo tecnológico; el Ministerio de Medio Ambiente coordinaría un grupo de monitoreo permanente que se reunirá al menos anualmente, y su revisión sería obligatoria en el séptimo año de su publicación; sin embargo, hasta el segundo semestre del año 2015, nada ha cambiado en el documento.

Además, se hace necesaria la revisión de la Resolución CONAMA 375/06 (2006), la cual, en algunos criterios y procedimientos, no es aplicable a las condiciones paranaenses, dificultando la gestión del proceso de uso agrícola del lodo. En este proceso de revisión, se debe verificar si es posible hacer menos burocrático y oneroso el destino agrícola de lodo, sin comprometer la seguridad sanitaria y ambiental de ese uso agrícola. De modo que la norma sea una herramienta que promueva la adopción de criterios y procedimientos concordantes con la realidad paranaense y brasileña, contribuyendo a la difusión de esa alternativa de destino sostenible del lodo.

## Referencias

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2004. NBR 10004: Resíduos Sólidos - Clasificación. Río de Janeiro.
- Beecher, N. (2008). Moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource. In: Leblanc, R. J., Matthews, P., Richard, R. P. (Ed.). *Global Atlas of Excreta, Wastewater Sludge and Biosolids Management*. Malta: Progress Press, 2008.

- Bittencourt, S. (2014). *Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: Aplicabilidade da Resolução CONAMA 375/06* [Gestión del proceso de uso agrícola del lodo de saneamiento de AR en el estado de Paraná: Aplicabilidad de la Resolución CONAM 375/06]. (220 p. Tesis Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- CCME (2010). *A Review of the Current Canadian Legislative Framework for Wastewater Biosolids*. Canadian Council of Ministers of the Environment.
- CETESB (2005). *Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo* [Valores Orientadores para Suelos y Aguas Subterráneas en el Estado de São Paulo]. São Paulo: CETESB, Decisão de Diretoria N° 195-2005-E. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.
- CETESB (2005). *Relatório de qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2004*. São Paulo, (Série Relatórios). Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/35-publicacoes/-relatorios>>. Acesso em: abr. 2014
- Chueiri, W. A., Serrat, B. M., Biele, J. y Favaretto, N. (2007). *Lodo de esgoto e fertilizante mineral sobre parâmetros do solo e de plantas de trigo* [Lodo de saneamiento de AR y fertilizante mineral sobre parámetros del suelo y de plantas de trigo]. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande*, 11(5), 502-508.
- Decreto n° 4.954 de 14/01/2004. Norma Federal Brasileira publicada en el Diario Oficial.
- DOCE (1986). Directiva del Consejo 86/278/EEC del 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, N° L 181/6. Recuperado de: <http://eur-lex.europa.eu/mwg-internal/de5fs23hu73ds/progress?id=OwFVVACVJfydl>.
- EC (2009). *Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Final Report. Part I: Overview. Report by RPA, Milieu Ltd and WRc for the European Commission, DG*. Environment, European Commission. Belgium.
- Harrison, E. Z., Oakes, S. R., Hysell, M., & Hay, A. (2006). Organic chemicals in sewage sludges. *Science of the Total Environment*, 367, 481-497.
- Hespanhol, I. (2014). Normas anormais [Normas anormales]. *Revista Dae*, Jan - Abr, 194, 6-23.
- Instrução Técnica IAPCEP/DTA n. 001/2002 [Instrução Técnica IAPCEP/DTA n. 001/2002]. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e

Recursos Hídricos. Instituto Ambiental do Paraná. Dispõe sobre a utilização agrícola de lodo de estação de tratamento de esgoto sanitário. Curitiba, 07 de maio 2002.

Instrucción normativa MAPA núm. 10 (2004). Secretaría de Apoyo Rural y Cooperativismo de Brasil. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Abastecimiento. Aprueba las definiciones y normas sobre las especificaciones y las garantías, las tolerancias, el registro, el embalaje y el etiquetado de los fertilizantes minerales destinados a la agricultura. De acuerdo con lo establecido en la Ley Orgánica 15/1999. De 06/05/2004. Recovered from: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/sanidadvegetal/legislacao>>. Curitiba.

Iranpour, R., Cox, H. H. J., Kearney, R. J. Clark, J. H., Pincince, A. B., & Daigger, G. T. (2004). Regulations for Biosolids Land Application in U.S. and European Union. *Journal of Residuals Science and Technology*, 1(4), 209-222.

Ley núm. 12.305 [Lei nº 12.305]. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Presidência da República Casa Civil Brasil. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília* (2010). Recuperado de: <<http://portal.saude.gov.br>> el 29/03/2014.

ONU (1992). Agenda 21. Capítulo 21. Manejo ambientalmente saudável dos resíduos sólidos e questões relacionadas com os esgotos. In *Conferência das Nações Unidas Sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (CNUMAD)*. Rio de Janeiro. Organización de las Naciones Unidas. Recuperado de: <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global/item/681>>

Resolución CONAMA 375/06 [Resolução CONAMA 375/06], Conselho Nacional do Meio Ambiente, MMA. 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* (2006). Recovered from: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>.

Resolución SEMA 001/07 [Resolução SEMA 001/07] Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná. Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento. *Diário Oficial do Estado do Paraná*, 7395. Curitiba (2007).

Resolución SEMA 021/09, [Resolução SEMA 021/09] Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná. Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento. *Diário Oficial [do] Estado do Paraná*. Curitiba (2009). Recuperado de: <<http://www.documentos.dioe.pr.gov.br/dioe>>.

- Rogers, H. R., Campbell, J. A., Crathorne, B. y Dobbsthe, A. J. (1989). Occurrence of chlorobenzenes and permethrins in twelve U.K. sewage sludges. *Water Research*, 23(7), 913-921.
- Sampaio, A. (2013). Afinal, queremos ou não viabilizar o uso agrícola do lodo produzido em estações de esgoto sanitário? Uma avaliação crítica da Resolução CONAMA 375. [Al final queremos no hacer viable el uso agrícola del lodo producido en estaciones de saneamiento de AR? Un análisis crítico de la Resolución CONAMA 375]. *Revista DAE*, 193, 16-27. Recovered from <<http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.109>>.
- SEMARNAT [Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México] (2003). Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. *Diario Oficial de la Federación*. Recuperado de <[http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=691939](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939)> el 15/08/200
- Souza, M. L. P., Ribeiro, A. N., Andreoli, C. V., Souza, L. C. P., & Bittencourt, S. (2008). Aptidão das terras do Estado do Paraná para disposição final de lodo de esgoto [Aptitud de las tierras del Estado de Paraná para la disposición final del lodo generado en saneamiento de AR]. *Revista DAE*, 177, 20-29.
- Tamanini, C. R., Motta, A. C. V., Andreoli, C. V., & Doetzer, B. H. (2008). Land reclamation recovery with the sewage sludge use. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, (51)4, 643-655.
- UNEP [United Nation Environmental Program] (2001). *Stockholm convention on persistent organic pollutants*. Recuperado de: <http://chm.pops.int/default.aspx>, el 25/02/2013.
- USEPA [United States Environmental Protection Agency] (1994). *A plain English guide to the EPA 503 part biosolids rule*. Washington: USEPA. Recuperado de: <[http://water.epa.gov/scitech/wastetech/biosolids/503pe\\_index.cfm](http://water.epa.gov/scitech/wastetech/biosolids/503pe_index.cfm)>.
- USEPA [United States Environmental Protection Agency] (2007). *Part 503—standards for the use or disposal of sewage sludge. Electronic Code of Federal Regulations (e-CFR) - Title 40: Protection of Environment*. Recuperado de: <[http://yosemite.epa.gov/r10/water.nsf/npdes+permits/sewage+s825/\\$file/503-032007.pdf](http://yosemite.epa.gov/r10/water.nsf/npdes+permits/sewage+s825/$file/503-032007.pdf)>.
- USEPA [United States Environmental Protection Agency] (2009). *Targeted National Sewage Sludge Survey: Overview Report*. Washington: Office of Water (4301T). EPA-822-R-08-014. Recuperado de: <<http://water.epa.gov/scitech/wastetech/biosolids/tnsss-fs.cfm>>.



# CAPÍTULO 3

## CARACTERIZACIÓN



GENERAL DE

LODOS Y BIOSÓLIDOS



DOI: <https://doi.org/10.24267/9789585120136.3>



#### 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.

#### FERNANDO FERNANDES

Ingeniero Civil de la UNICAMP (Universidad Estatal de Campinas), Doctor en Ingeniería por el Instituto Nacional Politécnico de Toulouse (INPT), Francia. Profesor del Centro de Tecnología y Urbanismo de la Universidad Estatal de Londrina (UEL) en el programa de ingeniería civil y en el programa de posgrado en ingeniería civil a nivel de maestría y doctorado en el Estado de Paraná, Brasil. E-mail: fernando@uel.br

#### CRISTIANE SILVEIRA

Graduada en Tecnología en Gerenciamiento Ambiental por la UTFPR campus Medianeira. Ingeniera Ambiental de la Faculdade Pitágoras Londrina. Maestra en Ingeniería de Edificios y Saneamiento de Universidade Estatal de Londrina y Especialización en Docencia de la Educación Superior. E-mail: cristina.silveira@pitagoras.com.br.

#### EMILIA KIYOMI KURODA

Ingeniera Civil de la Escuela de Ingeniería de San Carlos Universidad de San Pablo - EESC-USP (1999), Maestría (2002) y Doctorado (2006) en Hidráulica y Saneamiento de las mismas instituciones y pos-doctorado en University de Meijo, Japón (2007 - 2008) y la Universidad Estatal de Londrina UEL (2008-2009). Profesora en el Centro de Tecnología y Urbanismo de la Universidad Estatal de Londrina. E-mail: ekkuroda@uel.br



## 3.1 PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN FÍSICO, QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LOS LODOS Y BIOSÓLIDOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

*Miguel Mansur Aisse*

Históricamente, los proyectos de Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) fueron elaborados y puestos en marcha sin que hubiese preocupación por el manejo adecuado del lodo generado en el proceso. El crecimiento de las áreas urbanas, la expansión de las redes de alcantarillado, la implementación de sistemas de tratamiento más eficientes y el aumento de la presión por parte de los órganos ambientales, exigieron que las empresas de saneamiento adoptaran medidas sanitarias y ambientales de tratamiento y disposición final de los lodos generados en el saneamiento de las aguas residuales.

Para definir la alternativa más adecuada para la disposición final es necesario considerar las características del lodo generado en las PTAR, debido a que la cantidad y calidad de ese lodo dependen, principalmente, tanto del sistema de tratamiento como de la composición y el caudal del efluente. Dichos lodos poseen una cantidad considerable de materia orgánica y de nutrientes esenciales para el desarrollo vegetal, por lo que pueden ser utilizados en la recuperación de suelos erosionados, de áreas con tierras degradadas y como fuente de nutrientes para cultivos agrosilvopastoriles; sin embargo, esos residuos también pueden contener contaminantes orgánicos e inorgánicos, con potencial para causar impactos negativos al ambiente, así como, agentes patógenos que deben ser reducidos a niveles que no representen riesgos a la salud humana.

En el presente capítulo se abordarán aspectos concernientes al origen del lodo y a su composición físico-química; con ese propósito, se incluyen ejemplos de constitución de lodos provenientes del saneamiento de AR en Brasil y Colombia, con un enfoque en los parámetros que tienen influencia en el potencial del material para el destino agrícola.

## Características de los lodos y los biosólidos

El lodo es el material sólido que queda después de que el agua a tratar pasa por tratamiento primario, secundario y terciario de una PTAR. En la Tabla 3.1 se presentan los tipos de lodos que se producen en las PTAR, con su respectiva descripción.

**Tabla 3.1** Tipos de lodos generados durante el saneamiento de aguas residuales.

<b>Lodo crudo</b>	No ha sido tratado ni estabilizado. Tiende a producir la acidificación de la digestión y produce olor.
<b>Lodo primario</b>	Producido durante los procesos de tratamiento primario de las aguas residuales. Contiene generalmente una gran cantidad de material orgánico.
<b>Lodo activo</b>	Se genera a partir del tratamiento biológico. Normalmente, este lodo se encuentra en forma de flóculos que contienen biomasa viva y muerta, además de partes minerales y orgánicas adsorbidas y almacenadas en ellos.
<b>Lodo activo de recirculación</b>	Proviene del proceso de aireación biológica en tanques, dirigida al proceso de clarificación final. La mayor parte del lodo que se reinserta nuevamente al tanque de aireación se llama lodo activo de recirculación.
<b>Lodo secundario</b>	Contiene partículas no hidrolizables y biomasa, resultantes del metabolismo celular.
<b>Lodo terciario</b>	Se produce a través de procesos de tratamiento ulterior (e.g., adición de agentes floculantes).
<b>Lodo digerido</b>	Su generación tiene lugar en los procesos de digestión aeróbica. Generalmente, presentan color negro y olor a tierra. Contienen una proporción de materia orgánica del orden del 45 al 60 %.

Fuente: Hurtado (2015).

En el tratamiento de aguas residuales se pueden usar varios procesos, o combinaciones de ellos, que dependen de las características de las aguas a sanear. Estos pueden ser procesos: anaerobios (*i.e.*, filtros y lagunas anaerobios, reactores anaerobios de flujo ascendente, mantos de lodos anaerobios, reactores aerobios con biofilmes de baja y alta carga), aerobios

(i.e., lodos activados de aeración convencional y de aeración prolongada, lagunas aireadas y facultativas) o combinaciones de ambos. En cuanto a las aguas con alto contenido de materia orgánica, el sistema más utilizado es el proceso anaerobio, ya que el subproducto de este sistema es un compuesto final más estable, además de eliminar la mayor parte de microorganismos patógenos. Este tipo de digestión se usa para tratar lodos primarios y secundarios. Por su parte, la digestión aerobia es usada cuando la PTAR procesa caudales menores a  $19.000 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  ( $220 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ), a fin de estabilizar su componente orgánico. Así, dependiendo del tipo de sistema de tratamiento, la carga microbiana en los lodos será consecuencia del sistema de tratamiento usado (Galvis & Rivera, 2013).

Por su parte, los biosólidos son residuos líquidos, semisólidos o sólidos que resultan del tratamiento de las aguas residuales procesadas, compuestos principalmente de materiales orgánicos y, en algunos casos, pueden contener metales pesados, compuestos orgánicos y trazas poco biodegradables, así como organismos patógenos (virus, bacterias, entre otros). Gracias a su alto valor nutricional pueden ser usados en agricultura y jardinería; además, su contenido de macro y micronutrientes promueven el crecimiento de las plantas y cultivos. Los biosólidos poseen además un alto valor calorífico, con lo cual se convierten en una excelente fuente para el desarrollo de alternativas de cogeneración de energía eléctrica (Hurtado, 2015).

Comúnmente, se suelen confundir los términos lodos y biosólidos; sin embargo, la principal diferencia es que los biosólidos son lodos que ya han sido estabilizados, es decir, que han tenido un proceso de tratamiento mediante el cual se logra reducir el nivel de peligrosidad de estos residuos. En la Tabla 3.2, se pueden observar las diferencias de las características químicas entre lodos y biosólidos.

**Tabla 3.2** Comparación de parámetros físico-químicos entre lodos y biosólidos.

Parámetros	Unidades	Lodos	Biosólidos
pH	Unidad	5-8	6.5-7.5
Alcalinidad	Mg de CaCO <sub>3</sub>	500-1500	2500-3500
Nitrógeno	% de ST	1,5-4	1,6-6
Fósforo	P <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % de ST	0,8-2,8	1,5-4
Aceites y grasas	% de ST	6-30	5-20
Proteínas	% de ST	20-30	15-20
Ácidos orgánicos	Mg L <sup>-1</sup> Hac	6800-10000	2700-6800
Sólidos totales	%	2-8	6-12
Sólidos volátiles	% de ST	60-80	30-60

Fuente: Hurtado (2015).

## Producción de lodo en las instalaciones de saneamiento de aguas residuales

En Brasil, las aguas residuales provienen de vertimientos domésticos, de aguas pluviales y aguas de infiltración, con posibles contribuciones industriales; además, están constituidas generalmente por: 99,99% de agua y 0,01% de sólidos, esta última fracción posee aproximadamente un 70% de sustancias orgánicas, proteínas, carbohidratos y grasas, y el 30% restante de sustancias inorgánicas, sales y arena. En este país, los sistemas de tratamiento de aguas residuales aplicados son bastante diversificados, entre los cuales se encuentran diferentes combinaciones como son: los reactores anaerobios de flujo ascendente y mantos de lodos, sistema convencional de aireación y de aireación prolongada (lodos activados), reactores aerobios con biopelículas de baja y alta carga, filtros anaerobios, lagunas aerobias, anaerobias y facultativas.

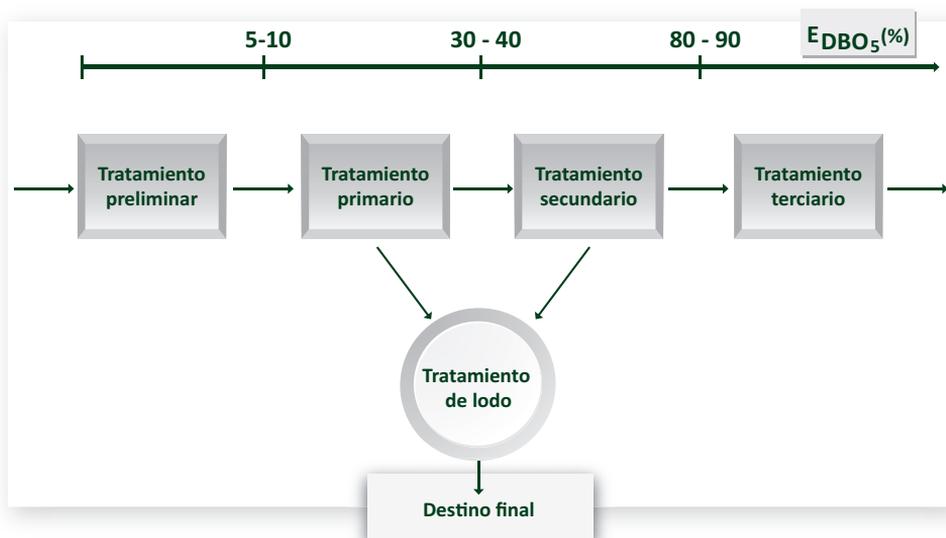
Los lodos son uno de los residuos generados en el proceso de tratamiento de aguas residuales, sus características se derivan de la composición del afluente a la PTAR, del sistema de tratamiento implementado y del método de operación adoptado en esa PTAR. Según Metcalf y Eddy (1991), un lodo proveniente del saneamiento de las AR puede ser clasificado, de acuerdo con el sistema y la etapa de tratamiento de las AR, como lodo:

a) primario: generado en los procesos donde predominan las operaciones de remoción de materia orgánica en suspensión en el medio líquido. Las fases sólido-líquidas son separadas por gravedad o por decantación. Para este tipo de lodos es necesaria una etapa posterior de digestión;

b) secundario: se origina durante los procesos biológicos de degradación de la materia orgánica del medio líquido, está compuesto, principalmente, de la biomasa contenida en los microorganismos. En sistemas en los cuales los tiempos de detención de lodos son amplios, por lo que no es necesaria una etapa posterior de digestión (ver Figura 3.1);

c) terciario: se genera en los procesos físico-químicos utilizados para la remoción de contaminantes que no fueron removidos en los tratamientos primarios y secundarios de saneamiento de las AR. Actualmente, el tratamiento terciario es poco utilizado en Brasil. Normalmente se emplea para la remoción de organismos patógenos y de nutrientes inorgánicos del AR, como nitrógeno y fósforo, por medio de la precipitación química con sales metálicas o con cal.

**Figura 3.1** Flujograma típico de una PTAR completa.



Nota: No fue considerada la producción de lodo durante el tratamiento terciario.

En la Tabla 3.3 se presenta una breve descripción de los principales tipos de subproductos sólidos, así como el componente del tratamiento de las AR que los generan. Los sólidos gruesos son removidos por el desarenador, y serán abordados al final de este capítulo.

**Tabla 3.3** Componentes en los que se generan los principales subproductos sólidos en las PTAR.

Subproductos	Componentes o procesos de PTAR
Sólidos gruesos	Rejilla Desarenador
Arena	Desarenador
Material flotante	Desarenador Decantador primario Decantador secundario Laguna de estabilización Reactor anaerobio de mantos de lodos
Lodo primario	Tanque séptico Decantador primario
Lodo biológico aerobio	Lodos activados con aereación convencional Reactores aerobios con biopelículas-alta carga (e.g., filtro biológico de alta carga, biofiltros aireados sumergidos y biodiscos)
Lodo biológico aerobio (estabilizado)	Lodos activados aereación prolongada Reactores aerobios con biopelículas-baja carga (e.g., filtro biológico de baja carga, biofiltros aireados y biodiscos)
Lodo biológico anaerobio (estabilizado)	Lagunas de estabilización (e.g., lagunas facultativas, lagunas anaerobias-facultativas, lagunas aireadas facultativas, lagunas aireadas de mezcla completa-lagunas de decantación) Reactores anaerobios (e.g., reactores UASB, filtros anaerobios)
Lodo químico	Decantador primario con precipitación química Lodos activados con precipitación química de fósforo Tanque de flotación por aire disuelto, precedido de coagulación-floculación, para remoción de fósforo

## Cantidades producidas de lodo

Los sistemas que, respectivamente generan las menores y mayores cantidades de lodo son las lagunas de estabilización y los lodos activados de aireación convencional. Este hecho ocurre porque, en las lagunas, el lodo queda retenido por varios años, durante los cuales sufre digestión y espesamiento; en consecuencia, se reducen los volúmenes de lodo, contrario a lo que ocurre en el sistema de lodos activados con aireación convencional, donde es corto el tiempo de permanencia del lodo en el sistema (ver Tabla 3.4).

**Tabla 3.4** Características y cantidades de lodo producido en diferentes tipos de sistemas de saneamiento de AR.

Tipo de sistema	Características del lodo producido y separado de la fase líquida (dirigido al proceso de tratamiento de lodos)			
	kgSS/ kgDQO aplicada	Contenido de sólidos secos (%)	Masa de lodo (gSS/hab·d) <sup>(a)</sup>	Volumen de lodo (L/ hab·d) <sup>(b)</sup>
Tratamiento primario convencional	0,35-0,45	2-6	35-45	0,6-2,2
Tratamiento primario (tanques sépticos)	0,20-0,30	3-6	20-30	0,3-1,0
Laguna facultativa	0,12-0,32	5-15	12-32	0,1-0,25
<b>Laguna Anaerobia + Laguna Facultativa</b>				
Laguna Anaerobia	0,20-0,45	15-20	20-45	0,1-0,3
Laguna Facultativa	0,06-0,10	7-12	6-10	0,05-0,15
Total	0,26-0,55	-	26-55	0,15-0,45
Laguna Aireada + Facultativa	0,08-0,13	6-10	8-13	0,08-0,22
Laguna Aireada mezcla com- pleta (Laguna de sedimentación)	0,11-0,13	5-8	11-13	0,15-0,25
<b>Tanque séptico + filtro anaerobio</b>				
Tanque séptico	0,20-0,30	3-6	20-30	0,3-1,0
Filtro anaerobio	0,07-0,09	0,5-4,0	7-9	0,2-1,8
Total	0,27-0,39	1,4-5,4	27-39	0,5-2,8

Tipo de sistema	Características del lodo producido y separado de la fase líquida (dirigido al proceso de tratamiento de lodos)			
	kgSS/ kgDQO aplicada	Contenido de sólidos secos (%)	Masa de lodo (gSS/hab·d) <sup>(a)</sup>	Volumen de lodo (L/ hab·d) <sup>(b)</sup>
<b>Lodos activados convencionales</b>				
Lodo primario	0,35-0,45	2-6	35-45	0,6-2,2
Lodo secundario	0,25-0,35	0,6-1	25-35	2,5-6,0
Total	0,60-0,80	1-2	60-80	3,1-8,2
Lodos activados- aireación prolongada	0,50-0,55	0,8-1,2	40-45	3,3-5,6
<b>Filtro Biológico de alta carga</b>				
Lodo primario	0,35-0,45	2-6	35-45	0,6-2,2
Lodo secundario	0,20-0,30	1-2,5	20-30	0,8-3,0
Total	0,55-0,75	1,5-4,0	55-75	1,4-5,2
<b>Biofiltro aireado sumergido</b>				
Lodo primario	0,35-0,45	2-6	35-45	0,6-2,2
Lodo secundario	0,25-0,35	0,6-1	35-35	2,5-6,0
Total	0,60-0,80	1-2	60-80	3,1-8,2
Reactor UASB	0,12-0,18	3-6	12-18	0,2-0,6
<b>UASB + pos-tratamiento aerobio <sup>(c)</sup></b>				
Lodo anaerobio (UASB)	0,12-0,18	3-4	12-18	0,3-0,6
Lodo aerobio (lodos activados) <sup>(d)</sup>	0,08-0,14	3-4	8-14	0,2-0,5
Total	0,20-0,32	3-4	30-32	0,5-1,1

Nota: en las unidades con largo tiempo de retención de lodos (e.g. lagunas, tanque séptico, reactor UASB, filtro anaeróbico), los valores presentados incluyen la digestión y el espesamiento que ocurren en la propia unidad (los cuales reducen la masa y el volumen del lodo).

a) Asumiendo 0.1 kgDQO/hab·d y 0.06 kgSST/hab·día.

b) Litros de lodo/hab·d = [(gSST/hab·d) / (sólidos secos (%))] x (100/1000) (asumiendo densidad de 1000 kg/m<sup>3</sup>)

c) Pos-tratamiento aerobio: lodos activados, biofiltro aireado sumergido, filtro biológico.

d) Lodo aerobio retirado del reactor UASB, después de la reducción de masa y de volumen en la digestión y espesamiento que ocurren en el propio reactor (el lodo aerobio excedente al afluente del reactor UASB también es menor, pues en este caso la influencia de la pérdida de sólidos en el efluente del decantador secundario pasa a desempeñar una mayor influencia)

Fuente: Von Sperling y Gonçalves (2014).

Además, en la literatura se pueden encontrar trabajos sobre la reducción al mínimo del volumen de lodos producidos en las PTAR, especialmente en el tratamiento aerobio por lodos activados. Este aspecto se trata en otro capítulo.

## **Remoción de los lodos en las unidades de tratamiento**

En el saneamiento con base en procesos biológicos, parte de la materia orgánica es absorbida y mineralizada, la cual pasa a formar parte de la biomasa microbiana, también denominada lodo biológico o secundario, compuesto principalmente de sólidos de origen biológico. El metabolismo bacteriano es determinante en la producción de lodos. En los sistemas aerobios la producción de lodo es mayor, comparada con los sistemas anaerobios, esto debido a que la mayor parte del sustrato orgánico es incorporada a la masa celular de las bacterias, mientras que en el sistema anaerobio, el metabolismo metanogénico transforma casi toda la materia orgánica en subproductos estables, generándose menor cantidad de lodo. En los tratamientos secundarios se suscita el incremento de la actividad microbiana aerobia y/o anaerobia; de esta forma se convierten los sólidos disueltos en sólidos suspendidos (biomasa microbiana) y, en consecuencia, se reduce el contenido de materia orgánica. Posteriormente, la biomasa microbiana es precipitada junto con otras partículas para generar así el lodo clasificado como secundario.

Las características del lodo originado en la unidad de tratamiento biológico de AR se alteran según varíe el periodo de permanencia del mismo en dicha unidad, especialmente la estabilidad del lodo (Von Sperling & Gonçalves, 2014). Según estos autores, la relación entre sólidos volátiles (SVT) y sólidos totales (ST) representa la fracción orgánica de los ST presentes en el lodo y, por consecuencia, el nivel de digestión de ese lodo (nivel de estabilidad). En los lodos digeridos, esa relación se sitúa alrededor de 0.6 a 0.65, por otro lado, en los lodos no digeridos se encuentra entre 0.75 y 0.80, debido a que los lodos permanecen dentro de las unidades biológicas por meses o años, esos se tornan más digeridos y espesados. En la Tabla 3.5 se presentan los intervalos típicos de remoción de lodo en los sistemas de saneamiento de AR:

**Tabla 3.5** Intervalos típicos de remoción de lodos, a partir de la fase líquida, que se presentan en las unidades o sistemas de las PTAR.

Sistema	Intervalo de remoción de lodo a partir de la fase líquida		
	Lodo primario	Lodo secundario	Lodo químico
Tratamiento primario (convencional)	Horas		
Tratamiento primario (tanques sépticos)	Meses		
Tratamiento primario con coagulación			Horas
Laguna facultativa		Años	
Laguna anaerobia + laguna facultativa		Años	
Laguna aireada facultativa		Años	
Laguna aireada con mezcla completa + laguna sedimentación		Años	
Laguna facultativa + laguna de maduración		Años	
Laguna facultativa + laguna de alta tasa		Años	
Laguna facultativa + remoción físico-química de algas		Años <sup>(a)</sup>	Horas
Infiltración lenta		(b)	
Infiltración rápida		(b)	
Escorrentía superficial		(b)	
Humedales construidos		(b)	
Tanque séptico + filtro anaerobio	Meses	Meses	
Tanque séptico + infiltración	Meses	(b)	
Reactor UASB		Semanas	
UASB + lodos activados		Semanas <sup>(c)</sup>	
UASB + biofiltro aireado sumergido		Semanas <sup>(c)</sup>	
UASB + filtro anaerobio		Semanas	
UASB + filtro biológico de alta carga		Semanas <sup>(c)</sup>	
UASB + flotación		Semanas	Horas
UASB + lagunas de estabilización		Semanas	

Sistema	Intervalo de remoción de lodo a partir de la fase líquida		
	Lodo primario	Lodo secundario	Lodo químico
UASB + escorrentía superficial		Semanas <sup>(b)</sup>	
Lodos activados (convencional)	Horas	~ Continuo	
Aireación prolongada		~ Continuo	
Reactor por lotes o tandas (aireación prolongada)		Horas	
Lodos activados convencional con remoción biológica de N/P	Horas	~ Continuo	
Lodos activados con remoción biológica y química de N/P		~ Continuo	Horas
Filtro biológico de baja carga	Horas	Horas	
Filtro biológico de alta carga	Horas	Horas	
Biofiltro aireado sumergido	Horas	Horas	
Biodiscos	Horas	Horas	

a) El lodo químico recirculado para la laguna anaeróbica o para la laguna facultativa puede permanecer almacenado por años.

B) En sistemas de aplicación controlada en el suelo, se presenta la necesidad de remover periódicamente la biomasa vegetal formada como resultado de la irrigación.

C) Suponiendo retorno del lodo excedente con el lodo anaeróbico.

Fuente: Von Sperling y Gonçalves (2014).

## Composición del lodo de agua residual

En la Tabla 3.6 se encuentran algunos parámetros típicos, encontrados en lodos brutos y digeridos.

**Tabla 3.6** Composición química típica de los lodos crudos y digeridos generados durante el saneamiento de AR.

Constituyente Variación	Lodos primarios no tratados o crudos		Lodos primarios digeridos		Lodos activados	
	Típico	Variación	Típico	Variación	Variación	
<b>Sólidos Totales (% ST)</b>	2,0-8,0	5,0	6,0-12,0	10,0	0,8-1,2	
<b>Sólidos Volátiles (% ST)</b>	60-80	65	30-60	40	59-88	
<b>Cebos y grasas (% ST)</b>	Éteres solubles	6-30	-	5-20	18,0	-
	Éteres extraíbles	7-35	-	-	-	5-12
<b>Proteínas (% ST)</b>	20-30	25	15-20	18,0	32-41	
<b>Nitrógeno (N) (% ST)</b>	1,5-4,0	2,5	1,6-6,0	3,0	2,4-5,0	
<b>Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) (% ST)</b>	0,8-2,8	1,6	1,5-4,0	2,5	2,8-11,0	
<b>Potasio (K<sub>2</sub>O) (% ST)</b>	0-1,0	0,4	0,0-3,0	1,0	0,5-0,7	
<b>Celulosa (% ST)</b>	8,0-15,0	10,0	8,0-15,0	10,0	-	

Fuente: Metcalf y Eddy (1991)

El conocimiento de la composición físico-química de los lodos, provenientes del saneamiento de AR, es fundamental en la selección de las alternativas de destino final de los mismos. Estos lodos presentan cantidades significativas de nutrientes, como son: Nitrógeno (N), Fósforo (P), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg), mismos que son necesarios en los cultivos agrícolas (ver Tabla 3.6). La presencia de estos nutrientes en los lodos está directamente relacionada con las características del AR tratada, el tipo de tratamiento al que se sometieron dichas AR (que originó el lodo), y el proceso de saneamiento del lodo mismo. Los nutrientes encontrados en mayor cantidad en los lodos son N y P. Los cationes de Ca y Mg se encuentran en pequeñas cantidades, con excepción de los lodos higienizados con cal. El Potasio (K) está presente en pequeñas cantidades, por lo tanto, en suelos abonados con dichos lodos se hace necesaria la aplicación de este nutriente por medio de la fertilización mineral (Andreoli, et al., 2001).

**Tabla 3.7** Contenidos de nutrientes y de sustancias inorgánicas en los lodos generados en diferentes sistemas de tratamiento de AR en Brasil.

Constituyente	Unidad	Ubicación de la PTAR						
		Franca, SP <sup>(1)</sup>	Barueri, SP <sup>(2)</sup>	Mangueira, PE <sup>(3)</sup>	Belém, PR <sup>(4)</sup>	Brasília Norte, DF <sup>(5)</sup>	Jundiaí, SP <sup>(6)</sup>	Pacotuba, ES <sup>(7)</sup>
Humedad	%	38,5	72,3	-	22,7	86-88	68	-
pH	% ST	6,1	8,7	5,7	11,6	-	5,9	5,2
C <sub>org</sub>	% ST	34,1	37,4	28,6	20,3	31-33	28,9	16
NKT <sub>1</sub>	% ST	4,5	4,1	2,5	3,1	0,5-0,6	3,2	5646
Fósforo	% ST	0,8	2,5	0,5	2,0	0,3-0,6	1,8	4128
Potasio	% ST	0,2	0,1	0,2	0,2	0,02-0,06	0,2	1623
Calcio	% ST	1,9	2,5	2,2	12,6	-	1,3	-
Magnesio	% ST	0,3	0,4	0,2	7,3	-	0,3	-
Manganeso	% ST	0,02	0,03	0,02	-	-	0,07	-
Hierro	% ST	1,9	3,2	1,6	-	-	2,9	-
Aluminio	% ST	-	1,8	-	-	0,2-0,4	-	-
Arsenio	mg·kg <sup>-1</sup> ST	-	-	-	-	<0,6	0,59	<0,5
Bario	mg·kg <sup>-1</sup> ST	-	-	-	-	-	-	156
Boro	mg·kg <sup>-1</sup> ST	-	9,5	-	-	-	-	-
Cadmio	mg·kg <sup>-1</sup> ST	2	10,9	3,1	8,5	4-6	7,21	<0,05
Plomo	mg·kg <sup>-1</sup> ST	100	206,1	350,1	43	10-11	184,4	29
Cobre	mg·kg <sup>-1</sup> ST	204	879,5	59,5	120	87-104	722	98
Cromo	mg·kg <sup>-1</sup> ST	102	791,1	-	40	18-21	152,7	26
Mercurio	mg·kg <sup>-1</sup> ST	-	-	-	2,1	<4	<0,1	-
Molibdeno	mg·kg <sup>-1</sup> ST	-	-	-	-	<7	-	3,5
Níquel	mg·kg <sup>-1</sup> ST	69	395,1	-	50	5-6	34,5	11
Selenio	mg·kg <sup>-1</sup> ST	-	-	-	-	<1,3	-	< 0,5
Zinc	mg·kg <sup>-1</sup> ST	1279	2.827,3	937,1	549	159-169	500	409

Nota: <sup>(1)</sup> Sistema de lodos activados convencional. <sup>(2)</sup> Lodo proveniente del digester anaeróbico, generado en el proceso de lodos activados. <sup>(3)</sup> Lodo del lecho de secado generado en reactor anaerobio. Nitrógeno del Nitrógeno total <sup>(4)</sup> Lodo higienizado con cal, proveniente de centrifuga generado en proceso lodos activados con aireación prolongada, Fósforo en P205 y Potasio en K20. <sup>(5)</sup> Lodo primario y secundario desaguado en prensa generado en proceso de lodos activados, Nitrógeno del Nitrógeno total. <sup>(6)</sup> Lodo generado en un sistema compuesto por lagunas aireadas aeróbicas, seguidas de lagunas de decantación. <sup>(7)</sup> Sistema de tanque séptico seguido de filtro anaerobio de flujo ascendente, todos los valores en mg·dm<sup>-3</sup>.

En la Tabla 3.7 se muestra que, usualmente, el lodo contiene cantidades significativas de micronutrientes como cobre (Cu) y zinc (Zn). Sin embargo, es importante destacar que esos micro-elementos son requeridos por los cultivos vegetales en cantidades pequeñas, y el uso de lodos a niveles importantes puede resultar en efectos tóxicos, reduciendo la productividad de los cultivos (Andreoli et al., 2001).

El tipo de tratamiento e higienización afecta las características finales del lodo proveniente del saneamiento de AR. Los lodos cuya estabilización o higienización sea efectuada con base en cal tendrán un pH más elevado y menos nitrógeno, debido a las pérdidas por volatilización del amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) que produce esa adición. Los lodos compostados contendrán menos nitrógeno y una relación  $C_{\text{org}}/\text{N}$  más elevada, debido a la adición de material rico en  $C_{\text{org}}$ , para contribuir al compostaje de la mezcla. En cuanto a los demás macro-nutrientes, se observa una mayor presencia de Ca, P y S en los lodos deshidratados que terminan en forma de torta, con respecto al Mg y K. Los lodos húmedos o con contenidos grandes de agua poseerán más K, debido a que no son sometidos al proceso de desaguado en su generación. Estos subproductos también contienen micronutrientes, principalmente Zn y Cu, en concentraciones que varían dependiendo de las características de la cuenca de captación de las aguas y del sistema de tratamiento adoptado para su saneamiento.

El lodo higienizado mediante la estabilización alcalina prolongada (EAP) presenta características que pueden corregir la acidez de los suelos donde se apliquen. Los óxidos e hidróxidos de Ca y Mg que forman parte del lodo proveniente de una planta de tratamiento para potabilizar agua (PTAP), poseen mayor velocidad de reacción cuando se comparan con los carbonatos de Ca y Mg, constituyentes de cal, material normalmente utilizado como correctivo de acidez de suelos agrícolas.

### **Contaminantes contenidos en los lodos generados en el saneamiento de AR**

Dependiendo del destino final que se seleccione para los lodos generados en el saneamiento de aguas, las sustancias tóxicas presentes en ellos pueden ser una fuente potencial de contaminación. El uso excesivo de estos lodos en la agricultura puede resultar en una fuerte contaminación ambiental. La adición en exceso de nitrógeno en forma de nitrato (contenida en los lodos), por encima del consumo del cultivo agrícola, es una preocupación ambiental de importancia, pues puede representar un fuerte riesgo de contaminación de las aguas freáticas. La acumulación de P resultante

en el suelo después de una aplicación excesiva de estos lodos, mineral que por lo general ha sido absorbido por los cultivos durante largos períodos de cosechas continuas, contribuye a aumentar el potencial de transmisión de P al ambiente. Las sustancias inorgánicas (metales pesados), los contaminantes orgánicos y los microorganismos patógenos presentes en el lodo generado en el saneamiento de AR, también pueden suponer riesgos para el medio ambiente y la salud cuando se aplican en la agricultura sin observar medidas de control.

**Tabla 3.8** Contenidos de sustancias inorgánicas (metales pesados) en los lodos generados en diferentes sistemas de tratamiento de AR en Brasil.

Ubicación de la PTAR	Parámetros (mg kg <sup>-1</sup> )										
	As	Ba	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
São Paulo, SP <sup>(1)</sup>	-	-	7,0	2981	808	29,0	-	219,0	276,0	-	2086
Jerônimo Monteiro, ES <sup>(2)</sup>	-	-	0,40	14,8	129	4,10	-	9,4	39,7	-	320
Suzano, SP <sup>(3)</sup>	-	-	8,0	579	625	-	-	346	217	-	1,12
RMC, PR <sup>(4)</sup>	0,2	138,1	0,3	47,7	100,9	0,1	0,4	30,1	31,7	8,0	343
Barueri, SP <sup>(5)</sup>	12,0	-	18,0	-	850,0	2,0	13,0	34,0	189,0	1,0	1870
Franca, SP <sup>(6)</sup>	-	306,6	3,27	284,5	572,6	-	2,8	56,6	77,3	-	1028

Fuente: Bittencourt (2014)

La presencia y los niveles de concentración de contaminantes químicos orgánicos e inorgánicos en los lodos provenientes del saneamiento de AR se derivan, principalmente, de la contribución de efluentes no domésticos a la red colectora de estas. La NBR 9.800-Criterios para el vertimiento de efluentes líquidos industriales en el sistema colector público de alcantarillado sanitario (ABNT, 1987)- tiene como objetivo garantizar la seguridad y el buen funcionamiento de la red de alcantarillado y del sistema de tratamiento de aguas residuales, sin considerar aún la calidad del lodo generado en el proceso.

En el Estado de Paraná, una concesionaria del saneamiento, la Compañía de Saneamiento de Paraná (SANEPAR), solo acepta el vertimiento de las aguas residuales industriales dentro de la red de aguas residuales domésticas,

previo cumplimiento por parte de las industrias de los criterios de calidad de sus efluentes. Así, los lodos generados en las PTAR, operadas por esta empresa, presentan bajos contenidos de sustancias orgánicas e inorgánicas (metales pesados). De esta forma, el lodo generado en el saneamiento de AR se enmarca en la clasificación de residuos Clase II -no inertes en los términos de la NBR 10004-, los cuales pueden tener propiedades tales como: combustibilidad, biodegradabilidad o solubilidad en agua (ABNT, 2004). La contaminación en forma de organismos patógenos contenida en los lodos provenientes del saneamiento de AR es consecuencia de las condiciones de salud de la población, cuyas descargas de aguas usadas contribuyen a la red de alcantarillado. Este aspecto será también presentado en otro capítulo de este libro. Así, y con el objetivo de reducir la concentración de los organismos patógenos en estos lodos, se lleva a cabo la higienización de los mismos, de modo que no representen riesgos para la salud de la población ni para la de los trabajadores que se encargan del manejo y disposición final de los mismos.

### **Lodos generados en tanques sépticos**

En la NBR 7229/1993 se estima una tasa de producción de lodos durante el uso de tanques sépticos que depende de las características del afluente y de la fuente generadora de AR. La tasa de acumulación del lodo es función del volumen de lodo digerido y de los intervalos entre las limpiezas del tanque. En la Tabla 3.9 se presenta información sobre esta norma, proporcionando valores que se deben utilizar en el dimensionamiento de este tipo de tanques.

**Tabla 3.9** Tanque séptico: contribución diaria de desechos y carga orgánica.

Predio	Unidad	Contribución		
		Per-cápita L/d	Lodo fresco L/d	Carga orgánica g DBO/d
<b>Ocupantes permanentes</b>				
Residencia	Persona	160	1,00	50
Patrón alto	Persona	130	1,00	45
Patrón medio	Persona	100	1,00	40
Patrón bajo	Persona	100	1,00	30
Hoteles (sin cocina y lavandería)	Persona	80	1,00	30
Alojamientos provisionales	Persona			
<b>Ocupantes temporales</b>				
Fábricas en general	Persona	70	0,30	25
Oficinas	Persona	50	0,20	25
Edificios públicos o comerciales	Persona	50	0,20	25
Predio	Unidad	Contribución		
		Per-cápita L/d	Lodo fresco L/d	Carga orgánica g DBO/d
Escuelas y locales de larga permanencia	Almuerzo	50	0,20	20
Restaurantes y similares	Persona	25	0,10	25
Cines, teatros, y lugares de corta permanencia	Sanitario	2	0,02	1
Sanitarios públicos		480	4,00	120
Nota: *Solo de acceso abierto al público (terminales de autobuses y ferroviarias, espacios públicos, estadios de deportes, locales para eventos, entre otros).				

Fuente: ABNT (1993).

Los lodos generados en tanques sépticos están compuestos, en gran parte, por agua y AR, material inorgánico (e.g., arenas, suelos finos) y material orgánico (Leite, et al., 2006). La heterogeneidad de sus compuestos es una propiedad relevante que es función de algunos factores como: la frecuencia de limpieza, las características del efluente que ingresa al tanque

y las mezclas que suceden durante su trayecto de recolección. Los estudios demuestran que los lodos de este tipo, recolectados por las empresas de saneamiento, presentan variaciones que van desde la composición semejante a las AR que circulan por el alcantarillado sanitario hasta aquella típica del lodo seco.

Las concentraciones de amoníaco y huevos de helmintos pueden ser diez veces mayor que la se encuentra en las AR (Montangero, et al., 2000, citado en Leite, et al., 2006). El lodo puede ser clasificado en función de su estabilidad (alta o baja), la cual depende del grado de digestión a la que fue sometido; así, se puede decir que el tiempo de permanencia del lodo en el tanque séptico es el gran responsable de su estabilización. En la Tabla 3.10 se muestra la composición (media y típica) de estos lodos.

**Tabla 3.10** Características físico-químicas de los lodos generados en tanques sépticos.

Variable	Jordão y Pessoa (2005)		USEPA (2002)	
	Media (mg·L <sup>-1</sup> )	Típica (mg·L <sup>-1</sup> )	Media (mg·L <sup>-1</sup> )	Típica (mg·L <sup>-1</sup> )
Sólidos totales	-	-	34.100	1.100 a 130.400
Sólidos totales volátiles	-	-	23.100	353 a 71.400
Sólidos suspendidos volátiles	15.000	2.000 a 100.000	12.800	310 a 93.300
DBO	6.000	2.000 a 30.000	6.400	440 a 78.600
DQO	-	-	31.900	1.500 a 703.000
NTK	700	100 a 1.600	580	66 a 1.000
N-Amoniacal	400	100 a 800	87	3 a 116
Fósforo	250	50 a 800	210	20 a 760
Grasas y aceites	8.000	5.000 a 10.000	5.600	200 a 23.300

Fuente: Montangero, et al. (2002), citado en Leite, et al. (2006).

Además de su gran variabilidad, el lodo proveniente de tanques sépticos presenta algunas otras características como la mala sedimentación, por tanto, para sistemas de tratamiento que dependen de la capacidad de sedimentación del lodo, por ejemplo, los tanques de sedimentación, es de extrema importancia que se realicen ensayos para verificar la capacidad de

sedimentación del lodo o de la mezcla de lodo y aguas residuales domésticas. También, es un factor importante la concentración elevada de aceites y grasas (por encima de  $300 \text{ mg L}^{-1}$ ), la cual puede afectar negativamente la capacidad de sedimentación de estos lodos.

En general, los lodos producidos en tanques sépticos contienen baja cantidad de metales y otros contaminantes, además, presentan coloración oscura y olor característico resultante de la presencia de gas sulfhídrico y otros gases (Jordão & Pessoa, 2014; Leite, et al., 2006). A pesar del potencial contaminante, no es inusual encontrar evidencias que muestran que el destino final de estos lodos fue inadecuado, es decir, depositados en terrenos baldíos, pozos de inspección de la red de alcantarillado o, incluso, vaciados en cursos de agua y redes de drenaje urbano.

Ingunza et al. (2009) llevaron a cabo la caracterización de residuos de fosas y tanques sépticos, a partir de los resultados obtenidos en investigaciones hechas en Brasil, en el marco del Programa de Investigaciones en Saneamiento Básico (*Pesquisas em Saneamento Básico-Prosab 5*). En dicho estudio se obtuvieron los valores mínimos, máximos y medios, resultantes de la caracterización físico-química de lodos generados en tanques sépticos, muestreados aleatoriamente, utilizando el procedimiento de recolección de alícuotas de sendos volúmenes descargados por los camiones limpiadores en la entrada de la PTAR (ver Tabla 3.11).



**Tabla 3.11** Características fisicoquímicas de lodos generados en tanques sépticos en algunas locaciones de Brasil.

Parámetro	FAE/SANEPAR/UFPR				UFRN				UnB				USP			
	N	Mín	Máx	Media	N	Mín	Máx	Media	N	Mín	Máx	Media	N	Mín	Máx	Media
<b>pH</b>	22	5,1	8,4	7,2	125	4,2	8,3	6,6	15	5,9	7,9	7,1	31	6	7,5	6,9
<b>Alcalinidad (mgCaCO<sub>3</sub>/L)</b>	21	132	1618	773	123	0	2051	471	15	79	1450	390	18	219	878	477
<b>Conductividad (µS/cm)</b>	22	805	2800	1636	122	231	11270	1193	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>DBO (mg/L)</b>	21	137	6280	2734	62	89	14242	2176	-	-	-	-	30	76	7413	1524
<b>DQO (mg/L)</b>	21	700	24600	11219	116	212	23492	4205	13	108	6932	1281	32	162	22445	4491
<b>N amoniacal (mgNH<sub>3</sub>-N/L)</b>	22	33	264	124	118	3	277	75	13	11	98	51	20	76	396	167
<b>NTK (mgN/L)</b>	22	50	1211	444	121	23	511	129	11	53	473	160	8	16	168	90
<b>Fósforo total (mgPO<sub>4</sub>-P/L)</b>	22	4	459	132	-	-	-	-	14	0	52	14	18	17	73	39
<b>Grasas y aceites (mg/L)</b>	21	130	7037	1908	118	2	6419	613	-	-	-	-	23	7	2803	345
<b>ST (mg/L)</b>	22	1051	38000	12116	122	399	28590	6508	8	715	45555	10214	30	695	27932	5216
<b>STV (mg/L)</b>	22	687	33628	7891	122	233	22146	4368	7	133	31097	7368	29	214	21152	3053
<b>SST (mg/L)</b>	12	566	19750	6656	114	134	22276	3891	8	574	35853	6395	29	200	19280	3257
<b>SSV (mg/L)</b>	12	500	15266	4361	113	120	16050	2776	7	257	24047	4996	28	48	11032	1749
<b>S Sed (mL/L)</b>	21	2	600	145	121	0	825	136	15	0	450	70	28	1	250	50

**Nota:** N: Número de parámetros; FAE/SANEPAR/UFPR: lodos recolectados en la Región Metropolitana de Curitiba (PR); USP: lodo colectado en la Región de São Carlos (SP).

Fuente: Ingunza, et al. (2009)



La gran heterogeneidad en la composición de los lodos generados en tanques sépticos y el intervalo de variación de las concentraciones de los parámetros evaluados son consecuencia de los distintos orígenes de los lodos y de los diversos tipos de unidades (*e.g.*, tanques sépticos, fosos, sumideros). A pesar de que todos son genéricamente fosos sépticos, técnicamente hubo variaciones en su construcción, operación y en los tiempos de retención de los lodos, además, las AR vinieron de diferentes clases de contribuyentes. Los autores resaltan que, al proyectar sistemas para el saneamiento de esos subproductos, es necesario tener en cuenta no solo la elevada concentración de materia orgánica, sino también las altas concentraciones de las dos formas de nitrógeno (*i.e.*, nitratos y nitritos), así como de las concentraciones de sólidos que les son características y que no son típicas del lodo de las PTAR, ni de los alcantarillados sanitarios. Es importante resaltar que el drenado de los tanques sépticos debe hacerse dentro del período considerado en sus respectivos proyectos.

Los procedimientos realizados durante la evacuación de los sistemas, por las empresas encargadas del mantenimiento (*i.e.*, limpiadoras de fosos), contribuyen a la gran variabilidad de las características del lodo séptico, ya que el mantenimiento es realizado en tanques y sumideros, entre otros. Los residuos se diluyen y, usualmente, se utilizan cantidades significativas de agua para “lavar el sistema”.

Según los resultados obtenidos por Ingunza, et al. (2009), presentados en la Tabla 3.10, los residuos drenados por los camiones limpiadores de fosos son mucho más concentrados que las aguas residuales domésticas, pero no llegan a tener características similares a los lodos provenientes de las PTARs.

### **Material grueso (desechos) residuos de las rejillas**

El material retenido en las rejillas procede, generalmente, del uso inadecuado de instalaciones prediales, colectores públicos y demás componentes de un sistema de alcantarillado sanitario. La operación de remoción de estos sólidos gruesos se realiza a la entrada de los procesos de saneamiento de las PTARs por medio de unidades de cribado (*i.e.*, rejillas o enrejados). Cabe mencionar que, a menudo, el destino final del material extraído son los rellenos sanitarios. La cantidad de material removido es muy variada, tal y como se representa en la Tabla 3.12.

**Tabla 3.12** Cantidad de sólidos gruesos removidos en función del espaciamiento entre barras.

Espacio entre barras (mm)	Cantidad típica de sólidos gruesos retenidos (L/1000 m <sup>3</sup> )
12,5	50
20	38
25	23
35	12
40	9
50	6

Fuente: Jordão y Pessoa (2014) citando en WEF, Metcalf y Eddy (1991).

## Residuos de los desarenadores

La arena contenida en las aguas residuales está, en gran parte, constituida por materiales minerales como: arenas, piedras, escorias, y gravas; además, contiene poca cantidad de materia orgánica putrescible, es decir: vegetales, grasas, cáscaras de huevos, trozos de huesos, entre otros. El dimensionamiento y remoción se da por la propiedad de rápida sedimentación, debido al peso de las partículas, y ponderando el diámetro mínimo de la arena en 0,2 mm. Este sistema está localizado en las PTAR a continuación de las rejillas. La cantidad de material removido es muy variado; en la Tabla 3.13 se resume el relato técnico de autores de diversas nacionalidades.

**Tabla 3.13** Eliminación de arenas y otras partículas, según varias referencias académicas.

Autor o referencia	Origen	Intervalo mín a máx (10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		Media (10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
Mara, D.	Escocés	-	17	5 a 10
Metcalf y Eddy	Estadounidense	0,03	18	-
Imhoff, K. <sup>(1)</sup>	Alemán	6,8	16	-
Autor o referencia	Origen	Intervalo mín a máx (10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )		Media (10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )

Degrémont <sup>(1)</sup>	Francés	-	16	-
Azevedo Netto e Hess, M. L.	Brasileño	1,3	4	1,5 a 2,9
PTAR Pinheiros <sup>(2)</sup>	Brasileño	1,3	7,3	4,1
PTAR Vila Leopoldina <sup>(2)</sup>	Brasileño	0,3	2,2	1,2

<sup>(1)</sup>Valores transformados con base en 200 L/hab·d; <sup>(2)</sup>Valores medidos entre enero/1976 a marzo/1977.

Fuente: Jordão y Pessoa (2014).

El destino final del material removido son los rellenos sanitarios específicos para este tipo de material.

## Material Flotante

El material flotante es un subproducto sólido, constituido generalmente de materiales flotables, no degradados durante el tratamiento de efluentes de AR. En general, puede ser definido como una capa de materiales flotantes que se desarrolla en la superficie de reactores UASB. La cantidad y las características del material sobrenadante dependen del sistema preliminar de tratamiento; la composición del sustrato, especialmente de las concentraciones de sólidos suspendidos, y grasas y/o aceites en el AR.

La formación del material flotante puede intensificarse cuando los reactores UASB están operando con bajos tiempos de detención; asimismo, la alta velocidad ascensional aumenta la cantidad de sólidos arrastrados hacia la superficie del reactor contribuyendo a una mayor formación de dicha capa. Otro parámetro de operación de los reactores UASB que puede influir en la formación del material flotante es la remoción de lodo. La no retirada del lodo excedente, con la frecuencia adecuada, seguramente provocará una mayor pérdida de sólidos para el compartimiento de decantación, ocasionando la elevación de la tasa de producción del material flotante y el posible deterioro de la calidad del efluente final (Ross, et al., 2014).

## Referencias

- ABNT (1987). NBR 9.800: *Critérios para o lançamento de efluentes industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário* [Criterios para la introducción de efluentes industriales en el sistema colector público de alcantarillado sanitario]. São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (1993). NBR 7229 - *Projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos* [Proyecto, construcción y operación de sistemas de tanques sépticos]. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2004). NBR 10.004: *Resíduos Sólidos - Classificação* [Resíduos sólidos-clasificación]. Río de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Andreoli, C. V., Pegorini, E. S., & Fernandes, F. (2014). Disposição do lodo no solo. [Disposición del lodo en el suelo]. En *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final* [Lodo de aguas residuales: tratamiento y disposición final] Andreoli, C. V.; Von Sperling, M.; Fernandes, F. (Editores). Belo Horizonte, Brasil: Editora UFMG. pp. 317- 95.
- Aisse, M. M. (1999). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. En: Campos, J. R. (Coord.). *Tratamento e destino final do lodo gerado em reatores anaeróbios*. Rio de Janeiro: ABES. pp. 271 - 99.
- Bittencourt, S. (2014). *Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: Aplicabilidade da Resolução Conama 375/06*. (Tese Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná. Curitiba.
- Galvis, J., & Rivera, X. (2013). *Caracterización fisicoquímica y microbiológica de los lodos presentes en la planta de tratamiento de aguas residuales industriales (PTARI) de la Empresa Jugos Hit de la ciudad de Pereira* (Tesis Tecnólogo en Química). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira- Colombia.
- Hurtado, A. (2015). *Proceso de transformación de biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) con vermicompostaje y su aplicación en germinación, caso países europeos: España, Reino Unido, Francia, Portugal, Italia* (Tesis Ingeniería Civil). Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá-Colombia.
- Ingunza, M. 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 microbiologia do lodo de fossa/tanque séptico [Caracterización física, química y microbiología del lodo de fosa / tanque séptico] (pp.375-383). En Andreoli, C.V. (coord.). *Lodo de*

*fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final* [Lodo de fosa y tanque séptico: caracterización, tecnologías de tratamiento, gestión y destino final]. Río de Janeiro, Brasil: ABES.

Jordão, E. P., & Pessoa, C. A. (2014). Remoção de Sólidos Grosseiros. Em *Tratamento de Esgotos Domésticos* [Eliminación de sólidos gruesos. En: Tratamiento de las aguas residuales domésticas]. (7a ed.). Río de Janeiro, Brasil: ABES.

Leite, B. Z., Pegorini, E. S., Andreoli, C. V., & Andrade, F. L. (2006). Caracterização e Alternativas de Disposição Final de Resíduos Sépticos [Caracterización y Alternativas de Disposición Final de Resíduos Sépticos]. En *8º Simpósio Ítalo-brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Fortaleza. Anais*. Rio de Janeiro, Brasil: ABES.

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

Ross, B. Z. L., Marques, C. J., Carneiro, C., Costa, J. O. G., Froehner, S., & Aisse, M. M. (2014). Avaliação do impacto da incorporação de espuma em lodo de esgoto destinado a uso agrícola [Evaluación del impacto de la incorporación de espuma en lodo de desagüe destinado a uso agrícola]. En *XXXIV Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Monterrey. Anais*. México: AIDIS.

Von Sperling, M., & Gonçalves, R. F. (2014). Lodo de Esgotos: características e produção [Disposición del lodo en el suelo]. En *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final* [Lodo de aguas residuales: tratamiento, gestión y disposición final]. Andreoli, C. V., Von Sperling, M. y Fernandes, F. (Editores). Belo Horizonte, Brasil. Editora UFMG. pp. 15-65.

## 3.2 DESHIDRATACIÓN DE LODOS GENERADOS EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP)

*Fernando Fernandes, Cristiane Silveira, y Emilia Kiyomi Kuroda.*

En el caso de las Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP), la producción de lodos en el proceso de purificación de las aguas es, por lo general, menor en cantidad y volumen, además, presenta menores contenidos de agentes contaminantes; sin embargo, cada etapa del procesamiento para sanear estos lodos, a fin de ser aprovechados con beneficios, tiene un objetivo específico que puede ser provocar una alteración o una mejora en sus características físicas, químicas o biológicas, según sea necesario.

Las etapas o procesos se aplican dependiendo de las características finales esperadas en los lodos, las cuales estarán en función de los parámetros legales a cumplir: el espacio físico disponible, las condiciones climáticas locales, el volumen del material a ser procesado, la tecnología que esté al alcance, la elección de la disposición final de los lodos y las condiciones financieras de quienes lleven a cabo el procesamiento. Por lo tanto, el empleo de las etapas de homogeneización, espesamiento, deshidratación y cualquier forma de estabilización, dependerá directamente de la selección de la disposición final de los lodos, la cual debe estar sujeta a los siguientes aspectos: análisis de sustentabilidad técnica y económica, requerimientos legales, de salud pública y ambientales. Aquí es importante destacar que para cada alternativa de destino final puede haber un contenido de humedad más favorable, de forma que los estudios de alternativas de técnicas de deshidratación deben ser efectuados al unísono con la selección del destino final.

### **Reducción de la humedad en los lodos generados en PTAPs**

El desaguado de los lodos es una operación unitaria (llamada así por que se lleva a cabo en formas separadas unas de otras) que reduce el volumen de los lodos a través de la disminución de su contenido de agua y humedad; dicho procedimiento tiene como consecuencia el aumento del contenido de sólidos por unidad de volumen. Por otra parte, la dificultad para deshidratar lodos varía con el tipo de lodo y su contenido de agua; dicha variación en la problemática para ejecutar la deshidratación está directamente relacionada con el tipo de sólidos contenidos en los lodos y con la

forma en que el agua está ligada a esas partículas sólidas. Las principales razones para llevar a cabo la deshidratación del lodo son:

- Reducción de los costos de transportación de los lodos al lugar de disposición final.
- Reducción del volumen y diversificación de alternativas técnicas para disposición final.
- Mejora en las condiciones de manejo del lodo, permitiendo la atención a las disposiciones ambientales legales para ambas matrices (líquida y sólida).

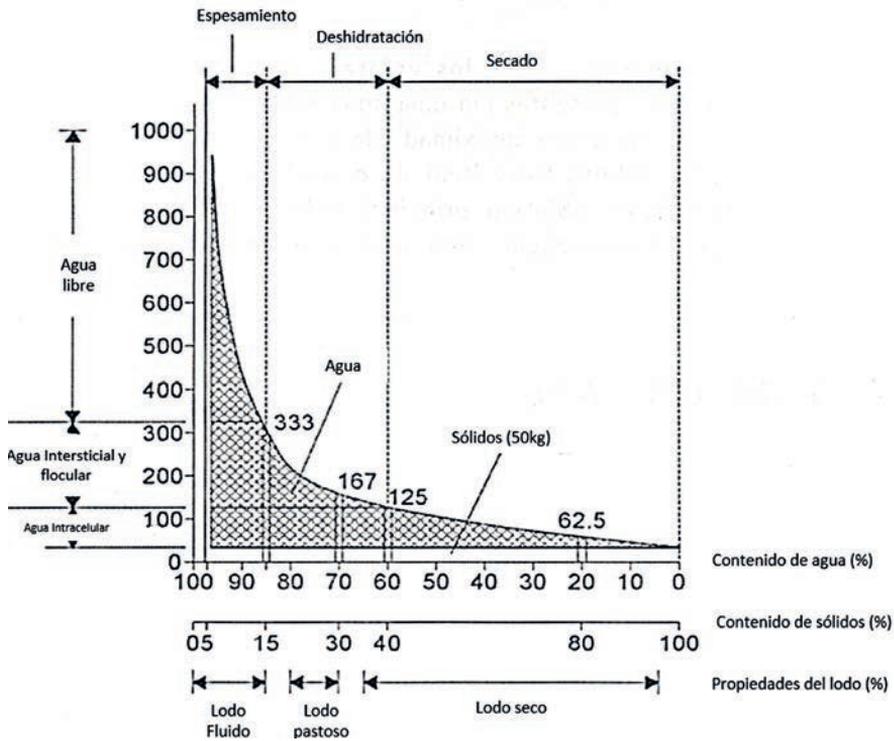
En la Figura 3.2 se muestra cómo varían los volúmenes de los lodos durante los procesos de deshidratación, según el contenido de sólidos dentro de ellos. La curva en forma exponencial manifiesta que en las fases de espesamiento y de deshidratación, con remoción del agua libre e intersticial, es donde se alcanza la mayor reducción de volumen en los lodos, mismas que conllevan la disminución de costos de transporte y de tratamiento posterior de esos lodos.

La deshidratación puede ser ejecutada mediante sistemas: mecanizados (*e.g.*, centrifugadora, filtro prensa, filtro banda), naturales (*e.g.* lagunas de decantación) y de filtración/evaporación (*e.g.*, lechos de secado o drenaje y bloques drenantes). Cabe señalar que recientemente ha sido difundida la aparición del uso de bolsas en sistemas de torre de deshidratación.

En Brasil, los principales procesos utilizados para la deshidratación natural o mecánica son:

- Medios mecánicos (centrífugas, filtros de prensa, prensas de deshidratación).
- Lechos de secado convencional o con bloques drenantes.
- Lechos de drenaje con manta geotextil.
- Torres de deshidratación.

**Figura 3.2** Variación de volumen del lodo en función del contenido de sólidos.



Fuente: SANEPAR (1999).

En la deshidratación natural se utilizan solo agentes naturales (e.g., gravedad, evaporación); estos métodos presentan como desventaja la necesidad de grandes áreas para el proceso y dependen, en gran medida, de las condiciones climáticas prevalecientes en el lugar de secado. Debido a esta necesidad de grandes espacios, este tipo de instalaciones son sugeridas para las PTAPs de pequeño aporte o caudal, en las cuales, la generación de residuos o subproductos se da por consecuencia menor. Por otro lado, para las PTAPs de mayores dimensiones (mayor caudal procesado) o en situaciones donde no hay mayor disponibilidad de espacio o, incluso, donde las condiciones climáticas no son favorables (como regiones subtropicales y templadas), se puede recurrir a técnicas de deshidratación mecanizadas.

Como ya se mencionó, los lodos generados en las PTAPs presentan, en general, bajo contenido de materia orgánica, por lo que no hay necesidad de una estabilización biológica antes de la deshidratación, como es el caso de los lodos producidos en el tratamiento de aguas residuales;

sin embargo, se destaca que, para aumentar la tasa de deshidratación y captura de sólidos, los lodos deben estar sometidos a una etapa de acondicionamiento, previa a la etapa de deshidratación propiamente dicha. El acondicionamiento puede ser efectuado por intermedio de operaciones físicas como sedimentación por gravedad o flotación, además del empleo de productos químicos.

Adicionalmente, es recomendable que, antes de la etapa de deshidratación por centrifugación, la concentración de SST en los lodos sea de por lo menos 2% (masa/masa). A fin de garantizar la eficiencia de deshidratación mediante centrifugación, es necesario llevar a cabo ensayos de laboratorio para determinar el tipo de polímero y la dosificación que corresponda, ya que esta varía generalmente entre 1 y 5 g/kg de SST (Di Bernardo, Dantas & Voltan, 2011). Para las unidades de deshidratación se recomienda, además, que la obtención de parámetros de diseño sea hecha de acuerdo con una planificación previa y que esos sean adecuados a las condiciones reales de aplicación (utilizando el lodo de la propia PTAP) y locales, ya que las diferencias en el clima de los diferentes sitios, así como del suelo, y la forma de operación de las diferentes PTAPs no permiten el uso de parámetros genéricos.

## **Centrifugación y otros medios mecánicos**

La deshidratación de lodos por medio de centrifugadoras ocurre a través de un proceso en el que se aplican fuerzas centrífugas a los lodos, para acelerar la separación de la fase líquida de la sólida. Esta separación se realiza a través de dos operaciones distintas, la clarificación y la compactación. Durante la etapa de clarificación, la fase líquida de los sólidos es removida y en la de compactación, se retiran tanto el agua capilar como la intersticial de la masa del lodo.

Para el tratamiento de lodos generados en las PTAPs, las centrifugadoras más utilizadas son las decantadoras de eje horizontal. Estas centrifugadoras están compuestas por un tambor cilíndrico, movido por un eje horizontal, con una sección cónica convergente en un extremo que gira alrededor de ese eje. Parte de este arreglo también incluye, un transportador de tornillo en el interior del tambor, que al girar a una velocidad diferente a la del tambor raspa el lodo centrifugado (adherido a las paredes) hacia afuera de la centrifugadora. Para contenidos de sólidos en el lodo en torno al 20%, se recomienda, además, el uso de polímeros durante el proceso, a fin de mejorar esta operación.

Durante la operación de las centrifugadoras ocurre, básicamente, la aplicación de una fuerza centrífuga, que aplica una celeridad de entre 500 a 4.000 veces la aceleración de la gravedad. El proceso de centrifugación produce lodos con una concentración media del 20% de sólidos, asociados a un elevado costo en su implementación y operación, debido al alto consumo energético, y principalmente al consumo de polielectrolitos. La centrifugación puede considerarse una etapa intermedia entre el secado y el espesamiento. Las centrifugadoras operan, regularmente, entre 12 y 20 horas al día y las tortas de lodos producidas presentan, en general, una masa específica que varía entre 1,15 y 1,30  $\text{kg}\cdot\text{L}^{-1}$ , y contenido de SST de entre 15 a 35% (Di Bernardo, Dantas & Voltan, 2011; Richter, 2001).

Además de las centrifugadoras se emplean otros equipos, como son: filtros-prensa, prensas desaguadoras (*belt press*), prensas desaguadoras en rosca sin fin. Sin embargo, debido a su facilidad y sencillez de operación, las centrifugadoras han sido la alternativa más utilizada. En algunos casos, equipos con mayor eficiencia son necesarios, tal es el caso de los filtros-prensa que llegan a producir tortas con más del 30% de contenido de sólidos y que, además, requieren menores espacios para su operación. Como fase complementaria también pueden ser citados los secadores térmicos, los cuales representan una forma de secado más avanzada y de mayor costo, pero con la ventaja de suprimir organismos patógenos.

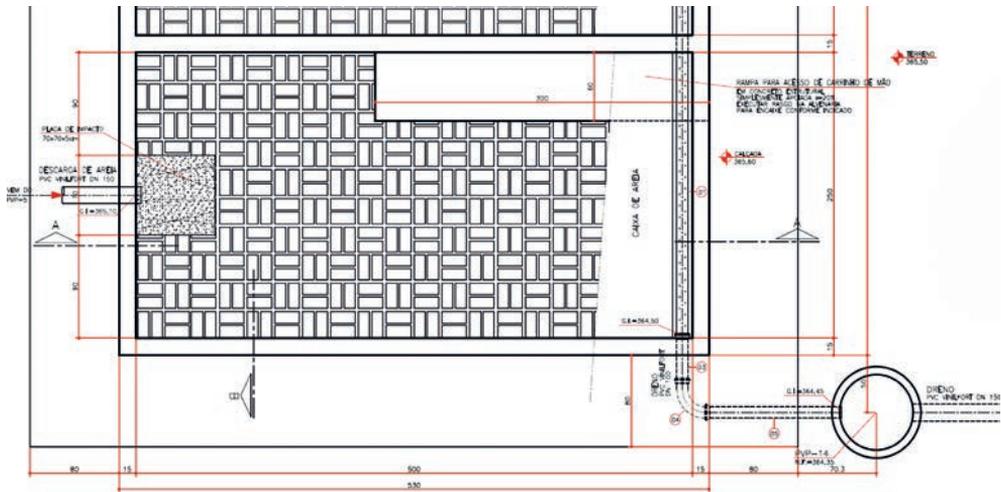
### Lechos de secado convencionales

En los lechos de secado, la remoción de humedad se da por la decantación, drenaje y evaporación, a fin de obtener la concentración de sólidos deseada en el producto final. Este proceso involucra básicamente dos operaciones: aplicación de presión sobre la masa de lodo y filtración del agua contenida en ella. Sin embargo, este sistema tiene la desventaja de ser afectado por la temperatura, humedad del aire, ventilación y viscosidad del lodo, y, en casos de lugares con clima frío de alta humedad, es necesario conceder un largo período para que ocurra la deshidratación del lodo.

El ciclo de secado dura tres semanas o más, dependiendo de las condiciones climáticas y de la concentración de sólidos que se quiera alcanzar. No se utiliza energía durante el proceso, ni la adición de productos químicos. Las variables climáticas pueden influir en el secado del lodo, el cual es recomendado para regiones más calurosas. El contenido final de sólidos puede variar entre el 17 y el 19% en los lechos con cubierta superior o techumbre y del 22

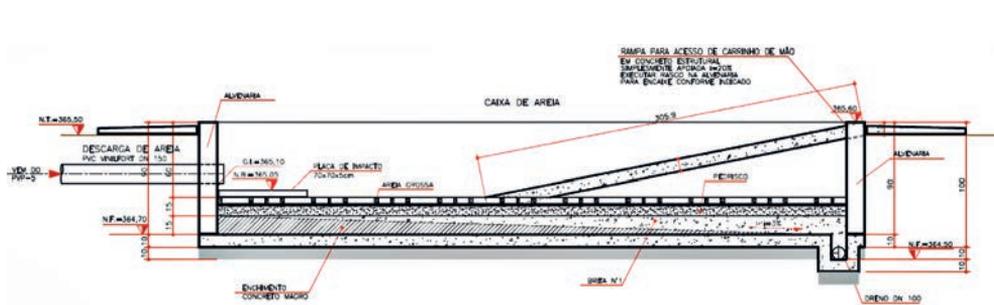
al 28% en los lechos de secado sin cubierta. Las Figuras 3.3 y 3.4 muestran las vistas en planta y en corte, respectivamente, del esquema básico de un proyecto de lechos de secado convencional.

**Figura 3.3** Esquema básico en planta de un proyecto de lechos de secado convencional



Fuente: Autor.

**Figura 3.4** Esquema básico en corte de un proyecto de lechos de secado convencional.



Fuente: Autor

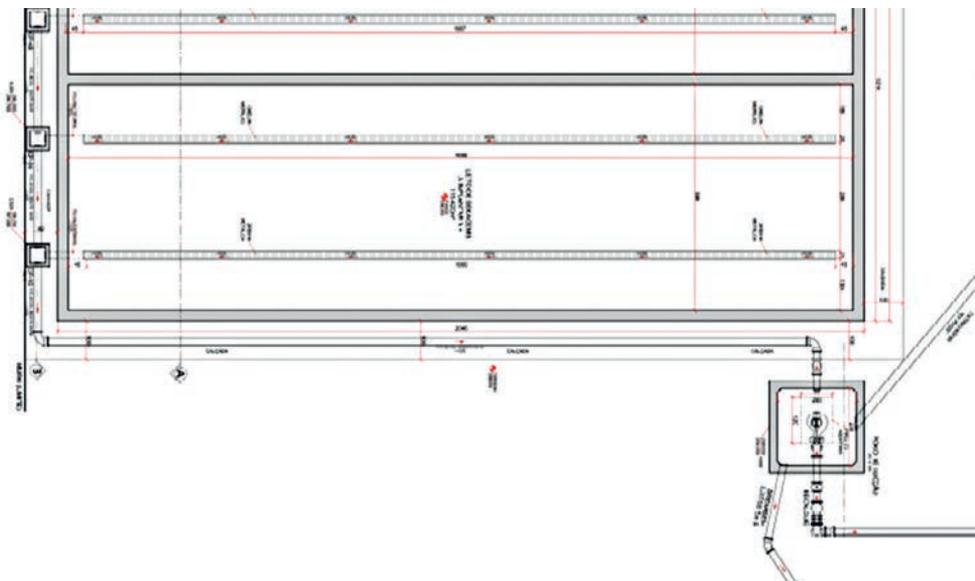
## Lechos de secado con bloques drenantes

En los lechos de secado y drenaje, los mecanismos de deshidratación consisten esencialmente en decantación, percolación (drenaje) y evaporación, siendo estos influenciados principalmente por la temperatura y humedad del aire, viscosidad del lodo espesado y acción de los vientos (Di Bernardo, Dantas & Voltan, 2011; Richter, 2001).

El sistema de bloques filtrantes comprende un tanque raso, de fondo impermeable, donde se montarán bloques con capacidad de drenaje. Cada bloque tiene una sección en planta de 30 x 30 cm y 5 cm de altura. Los bloques filtrantes se ponen en el tanque sobre el piso de hormigón pulido; asimismo, los módulos tienen ranuras tipo macho/hembra (dos lados de cada una) que permiten la sujeción entre bloques; esta fijación por machimbre (macho/hembra) ayuda a que cualquier módulo sea removido y sustituido sin perjuicio de los módulos contiguos. Los bloques están protegidos contra el deterioro ocasionado por rayos UV.

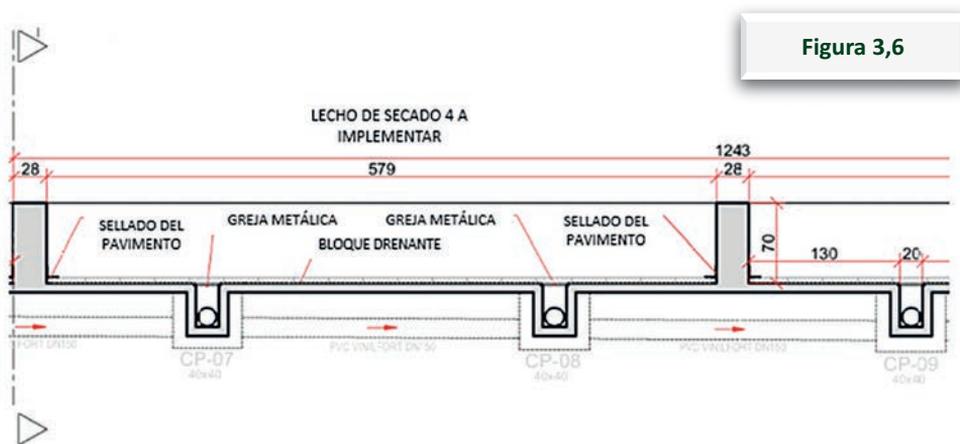
Las Figuras 3.5 y 3.6 muestran, respectivamente, esquemas básicos de diseño de lechos con bloques drenantes en planta y en corte.

**Figura 3.5** Esquema básico en planta de proyecto de lecho de drenaje con bloques drenantes.



Fuente: Autor

**Figura 3.6** Esquema básico en corte de proyecto de lecho de drenaje con bloques drenantes.



**Figura 3,6**

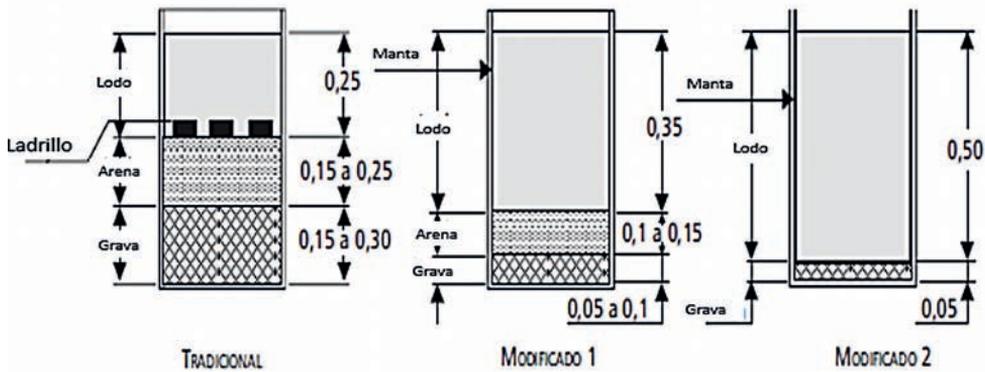
Fuente: Autor

El líquido drenado de los lodos desaguados en los lechos de secado con bloques drenantes, así como el de los lavados respectivos de esos lechos, deben ser recogido en cajas de paso y conducido a un pozo de succión para ser retroalimentado al inicio del proceso de tratamiento.

### Lechos de drenaje con material geotextil

Cordeiro (1993, 2001) estudió la posibilidad de modificar la estructura de los lechos de drenaje/secado convencionales (grava y arena) y observó una mejora progresiva en relación al volumen de drenaje en función del tiempo, con la disposición de una manta de geotextil sobre la capa filtrante de arena (Lecho modificado 1 en la Figura 3.7) y, posteriormente, sobre la capa de grava 0.1 con 5 cm (Lecho modificado 2 en la Figura 3.7).

**Figura 3.7** Etapas de desarrollo de los sistemas de lechos de drenaje/secado



Fuente: Cordeiro (2001).

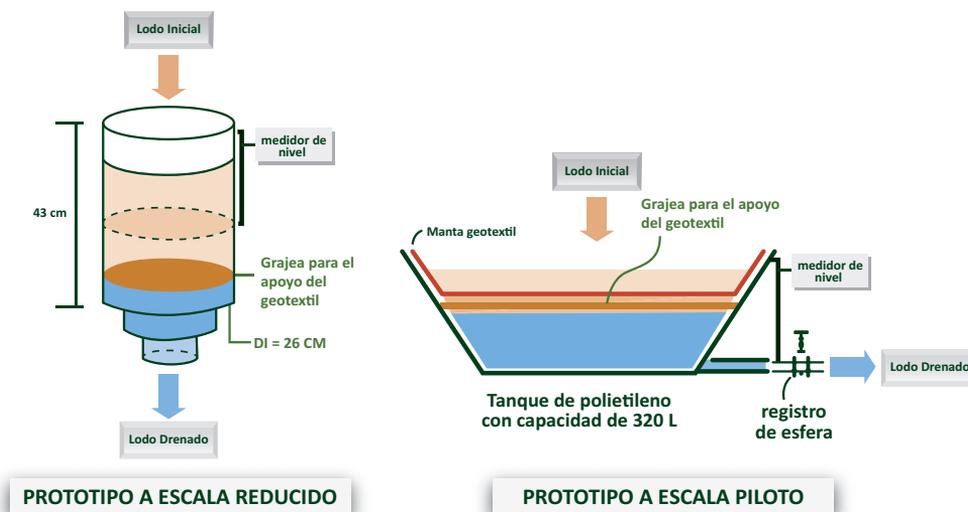
De esta forma, el empleo de lechos de drenaje con uso de manta geotextil pasó a ser una alternativa técnica interesante para su aplicación, especialmente en las PTAP de pequeño porte.

Se realizaron varias investigaciones para evaluar el sistema de deshidratación de lodos de decantadores de las PTAP en lechos de drenaje con uso de manta geotextil en ensayos de laboratorio por medio de prototipos de escalas reducida, piloto y real; esos estudios fueron realizados por Achon (2003), Fontana (2004), Silva (2006), Barroso (2007), Lima (2010); Macedo (2010); Silveira (2012); Kuroda, et al. (2013) y Silveira, et al. (2015).

Después de ejecutar la variación de los parámetros de proyecto en prototipos a escala reducida y piloto (ver Figura 3.8), Silveira (2012) seleccionó densidad de la manta geotextil de  $600 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ , tasa de aplicación de sólidos - TAS de  $7,5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$ , tasa de aplicación de sólidos, -tasa de aplicación volumétrica-TAV de  $15 \text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ , duración máxima de las fases de drenaje del lodo y de secado de la torta de lodo de 15 días. El rendimiento del sistema de deshidratación fue evaluado por medio de la caracterización cualitativa y cuantitativa de los lodos afluentes al sistema, del agua drenada y de las tortas de lodo retenidas bajo diferentes condiciones climáticas de exposición (controlada y natural de verano e invierno), considerando las características del producto, (coagulantes a base de Fe para el lodo tipo

A (cloruro férrico-CF) y de Al (hidroxi-cloruro de polialuminio-PAC) para el lodo tipo B).

**Figura 3.8** Esquema de los prototipos a escalas reducidas y piloto de un sistema de deshidratación de lodos por decantación para las PTAP.



Fuente: Autor

En la escala piloto, los porcentajes de volumen de drenado que obtuvieron las condiciones de supervisión I y II (Resolución 357/05 del CONAMA) y de reaprovechamiento III en relación con la turbidez fueron del 66%, 69% y 62% para el lodo tipo A y del 84%, 89% y 71% para el lodo tipo B, como se presenta en la Tabla 3.14.

**Tabla 3.14** Porcentajes de volumen de drenado logrados en cada condición, a escala piloto

Tipo de lodo	Condición I (Turbiedad <40 uT)	Condición II (Turbiedad <100 uT)	Condición III (Turbiedad <10 uT)
Lodo tipo A (CF)	66%	69%	62%
Lodo tipo B (PAC)	84%	89%	71%

El desaguado a escala piloto proporcionó para el lodo tipo A, una reducción en la concentración de hierro total de entre 90,8% y 99,93%, y para el lodo tipo B, la reducción de la concentración de aluminio total de entre 99,83% y 99,97%, lo que demuestra la elevada eficiencia de este sistema de deshidratación.

En cuanto al secado del lodo tipo A (ver Figuras 3.9 a 3.11), se observó que después de 7 días de exposición, con una temperatura media de  $18,3^{\circ}\text{C} \pm 1,6$ , humedad relativa media de  $76,7\% \pm 13,4$  y una ocurrencia de precipitación del 6° al 7° día, el contenido de sólidos totales -ST final fue del 16,6%.

**Figura 3.9** Torta del lodo tipo A luego de la fase de drenaje (ST 12,9%)



Fuente: Autores

**Figura 3.10** Torta del lodo tipo A en el 4° día de secado (ST 15%)



Fuente: Autores

**Figura 3.11** Torta del lodo tipo A después de 7 días de secado (ST 16,6%)



Fuente: Autores

Se pudo observar que después de 7 días de secado, con temperatura media de  $23,2\text{ °C} \pm 3,6$  y humedad relativa media de  $69,4\% \pm 8,1$ , el contenido final de sólidos totales, después del secado del lodo tipo B, fue de: 30,2% (ver Figuras 3.12 y 3.13).

**Figura 3.12** Torta del lodo tipo B después de la fase de drenaje (ST 11,2%)



Fuente: Autores

**Figura 3.13** Torta de lodo tipo B después de 7 días de secado (ST 30,2%).



Fuente: Autores.

El secado de los lodos tipos A y B en condiciones naturales críticas de exposición en invierno, desprotegidos de precipitación permitió la obtención de contenidos de sólidos del orden del 16 y 30%, después de 7 días de secado, valores del mismo orden de magnitud de los producidos por técnicas mecánicas de deshidratación.

### Torre de deshidratación

La torre de deshidratación de lodos es una unidad compacta y vertical, de estructura metálica, que utiliza la tecnología de deshidratación por medio de geosintéticos. Se ejercen simultáneamente las funciones de contención de la masa de sólidos, pues almacena grandes volúmenes y drenaje de líquidos, garantizando la calidad del efluente drenado con la eliminación o minimización de tratamientos adicionales. La Figura 3.13 muestra una torre de deshidratación lista para la operación.

Según el fabricante, esta tecnología tiene un consumo más bajo de energía al operar en la deshidratación de lodos, además de ser de fácil instalación y bajo consumo de polímeros. Cada torre tiene capacidad para recibir un caudal máximo de lodo de 23 m<sup>3</sup>/h y un volumen de 11,5 m<sup>3</sup>.

**Figura 3.14** Torre de deshidratación lista para funcionar.



Fuente: Autores

## Consideraciones finales

Se debe considerar que, independientemente del tipo de deshidratación, la recirculación del sobrenadante hacia el inicio del tratamiento de la PTAP puede comprometer el funcionamiento de esta en relación con la calidad final del agua procesada, por la presencia de microorganismos patógenos tales como quistes de *Giardia* y *Cryptosporidium*, o de metales pesados, dependiendo de la calidad del coagulante utilizado o, aún más, de precursores de la formación de subproductos de la oxidación como los THM y AHAs, entre otros. Estos organismos compuestos pueden ser resistentes al tratamiento por ciclo completo y cloración, y se concentran gradualmente a lo largo del tiempo.

De esta forma, se recomienda que se lleven a cabo estudios previos con el agua de recirculación, a fin de evaluar la necesidad de adopción de acondicionamiento/pretratamiento en función de sus características y garantizar la calidad del agua tratada a lo largo del tiempo. Además, se recomienda que el caudal de recirculación no exceda el 10% del caudal de la planta, para no causar grandes cambios en las dosis de productos químicos.

## Referencias

- ACHON, C. L., & CORDEIRO, J. S. (2003). ANÁLISE CRÍTICA DE IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS NATURAIS DE REMOÇÃO DE ÁGUA LIVRE DE LODO DE ETA. 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. JOINVILLE, SANTA CATARINA.
- BARROSO, M. M. (2007). *INFLUÊNCIA DAS MICRO E MACROPROPIEDADES DOS LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS NOS DESAGUAMENTO POR LEITO DE DRENAGEM* (TESE DE DOUTORADO). UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, SAO PAULO.
- CORDEIRO, J. S. (2001). PROCESSAMENTO DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs). (CAPÍTULO V). EN ANDREOLI, C.V. (COORD). *RESÍDUOS SÓLIDOS DO SANEAMENTO: PROCESSAMENTO, RECICLAGEM E DISPOSIÇÃO FINAL*. RIO DE JANEIRO: ABES. PROJETO PROSAB 2.
- CORDEIRO, J. S. (1993). *O PROBLEMA DOS LODOS GERADOS EM DECANTADORES DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA* (TESE DE DOUTORADO EM HIDRÁULICA E SANEAMENTO). UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, SÃO CARLOS,
- DI BERNARDO, L., DANTAS, A. D., VOLTAN, P. E. N. (2011). *TRATABILIDADE DE ÁGUA E DOS RESÍDUOS GERADOS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA*. SÃO CARLOS - SP: LDiBE.

- FONTANA, A. O. (2004). *SISTEMA DE LEITO DE DRENAGEM E SEDIMENTADOR COMO SOLUÇÃO PARA REDUÇÃO DE VOLUME DE DECANTADORES E REUSO DE ÁGUA DE LAVAGEM DE FILTROS – ESTUDO DE CASO – ETA CARDOSO* (DISSERTAÇÃO DE MESTRADO). UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, SAO CARLOS.
- KURODA, E. K., SILVA, S. M. C. P., FERNANDES, F., OLIVEIRA, N. S. Y AISEE, M. M. (2013). DESAGUAMENTO DE LODO DE ETA EM LEITOS DE SECAGEM COBERTOS, CONVENCIONAIS E MODIFICADOS. IN *LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA - GESTÃO E PERSPECTIVAS TECNOLÓGICAS*. (v. 1, pp. 342-388). CURITIBA: THINKS CREATIVE.
- KURODA, E. K., SILVEIRA, C., MACEDO, J. G., LIMA, M. S. P., KAWAHIGASHI, F., BATISTA, A. D., FERNANDES, F. (2014). DRENAGEM/SECAGEM DE LODO DE DECANTADORES DE ETAs EM MANTA GEOTEXTIL. *REVISTA DAE*, (1), 24 - 34.
- LIMA, M. S. P. (2010). *DESAGUAMENTO DE LODO DE ETAs POR LEITO DE DRENAGEM COM MANTAS GEOTÊXTEIS EM ESCALA REDUZIDA* (MONOGRAFIA DE ENGENHARIA CIVIL). UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA, LONDRINA.
- MACEDO, J. G. (2010). *DESAGUAMENTO DE LODO DE ETAs POR LEITO DE DRENAGEM COM MANTAS GEOTÊXTEIS – ESCALAS PILOTO E REDUZIDA* (MONOGRAFIA DE ENGENHARIA CIVIL). UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA, LONDRINA.
- RICHTER, C. A. (2001). *TRATAMENTO DE LODOS DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA*. SÃO PAULO: EDGARD BLUCHER.
- SANEPAR (1999). *RECICLAGEM AGRÍCOLA DE LODO DE ESGOTO - ESTUDO PRELIMINAR PARA DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS PARA USO AGRONÔMICO E DE PARÂMETROS PARA NORMATIZAÇÃO AMBIENTAL E SANITÁRIA*. CURITIBA: ED. SANEPAR.
- SILVA, R. C. (2006). *AValiação TÉCNICA E ECONÔMICA DE SISTEMA ALTERNATIVO PARA REDUÇÃO DE VOLUME DE LODO GERADO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA (ETAs) DE PEQUENO PORTE* (MONOGRAFIA DE ENGENHARIA CIVIL). UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA, LONDRINA.
- SILVEIRA, C. (2012). *DESAGUAMENTO DE LODO DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS POR LEITO DE DRENAGEM / SECAGEM COM MANTA GEOTÊXTIL. DISSERTAÇÃO* (MESTRADO EM ENGENHARIA DE EDIFICAÇÕES E SANEAMENTO). UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA, LONDRINA.
- SILVEIRA, C., KURODA, E. K., ABE, C. H., ABE, L. Y., & HIROOKA, E. Y. (2015). DESAGUAMENTO DE LODO DE ETAs POR LEITO DE DRENAGEM / SECAGEM. *ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 20, 250 - 260.



# 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

<b>Procesos de tratamiento y definición</b>	<b>Efecto en los biosólidos</b>	<b>Efecto en las prácticas de aplicación al suelo</b>
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).

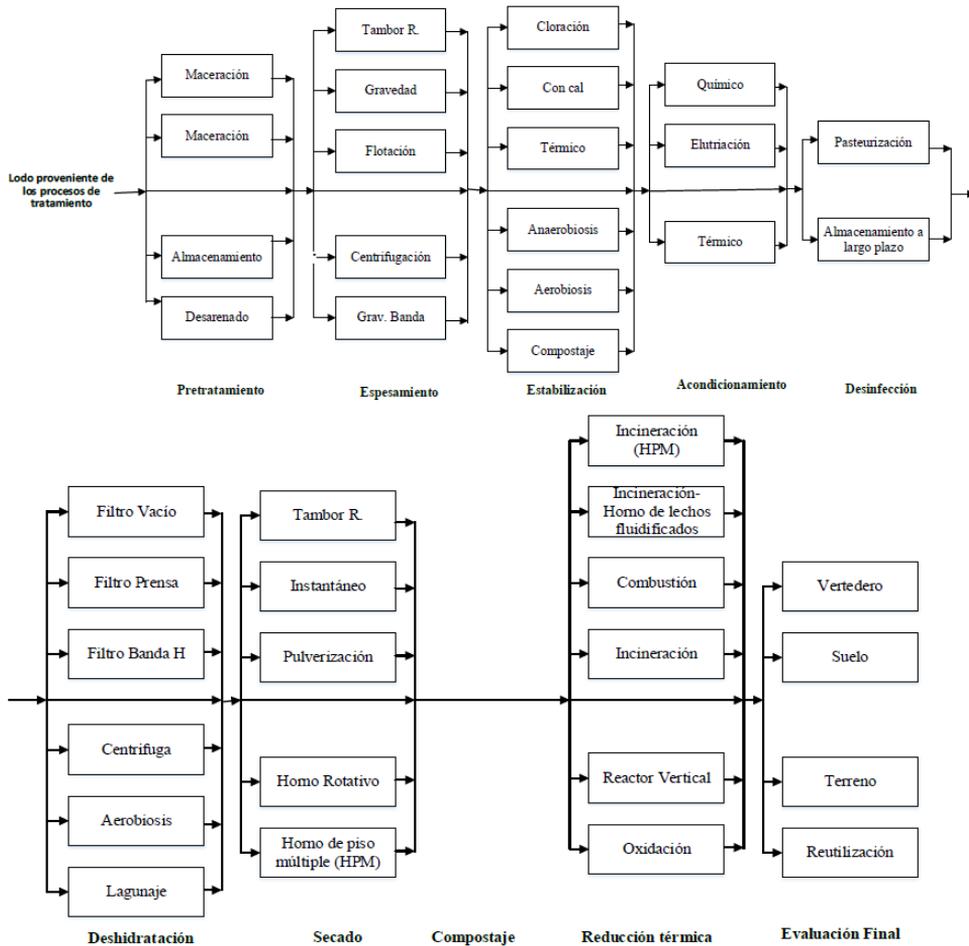
Entre las bacterias patógenas más importantes que pueden estar presentes en los biosólidos se encuentran, *Salmonella typhi* (que produce fiebre tifoidea), *Escherichia coli* (que produce gastroenteritis), *Shigella* sp., (que produce disentería) y *Vibrio Cholerae* (que producen diarreas extremadamente

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** Flujoograma 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**

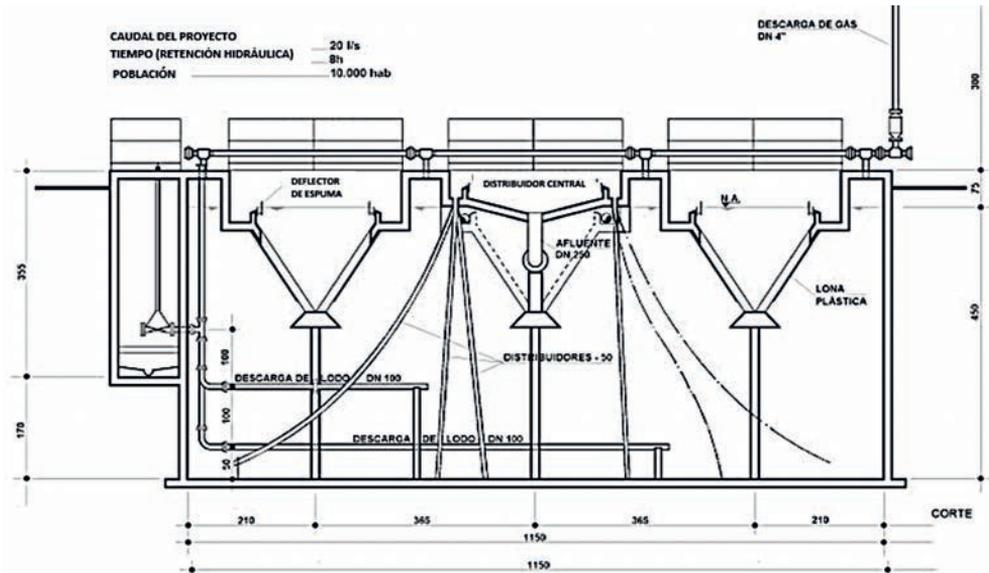
Los reactores anaeróbicos tipo UASB, también denominados reactores aeróbicos de manta de lodo, emplean tecnología desarrollada en Holanda, en la década de 1970, por Lettinga y colaboradores. El tratamiento consiste en un reactor de flujo ascendente, dotado de separación trifásica

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

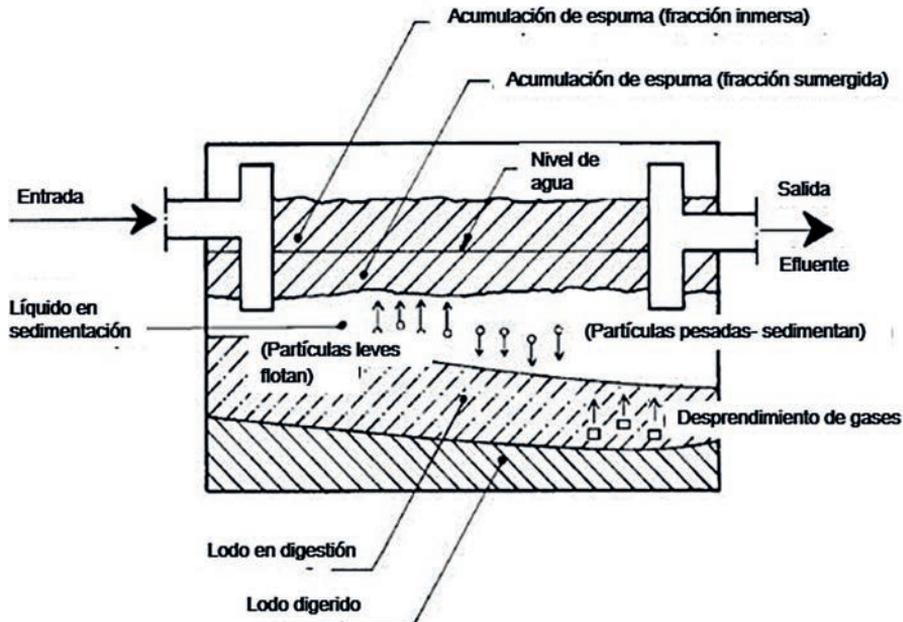


Fuente: Aisse (2000) citando SANEPAR.

## 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<sup>-1</sup>. Se aplicaron tasas crecientes de lodo séptico en los reactores UASB en los caudales:

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

El lodo séptico se ha condicionado a una concentración de 4.000 mg ST·L<sup>-1</sup>. 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

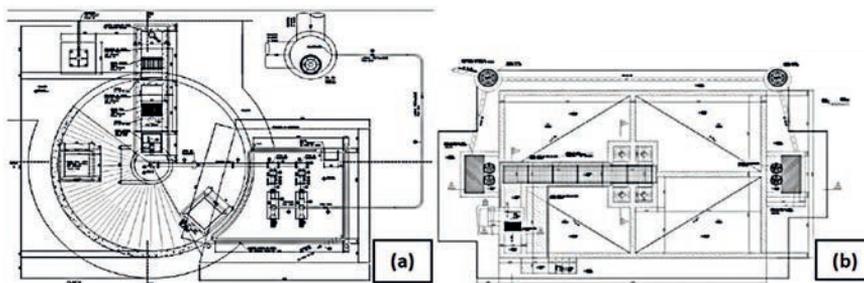
<b>Propuesta</b>	<b>Autor(es)</b>	<b>Lugar</b>	<b>Proponente</b>	<b>Escala</b>
(1)	ECOSOL (2006)	Campo Largo / PR	SANEPAR	Plena
(2)	DALCON (2006)	Contenda / PR	SANEPAR	Plena
(3)	PROENSI (2007)	Londrina / PR	SANEPAR	Plena
(4)	GONÇALVES (2008)	São Carlos / SP	EESC-USP	Piloto
(5)	CRIPPEN et al.(2009)	Líbano	-	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 <sup>3</sup> ·d)	Tiempo de detención (días)	Comentario
Convencional homogeneizado	≤ 0,5	≥ 45	-----
Convencional homogeneizado	entre 0,5 y 1,2	≥ 30	Homogeneizado 1 W/m <sup>3</sup> (*)
Tipo de digestor	Tasa de aplicación (kg SSV/m <sup>3</sup> ·d)	Tiempo de detención (días)	Comentario
Alta tasa	entre 1,2 y 4,8	≥ 22	Homogeneizado ≥ 5 W/m <sup>3</sup> (*)
		≥ 18	Homogeneizado ≥ 5 W/m <sup>3</sup> (*); 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 O<sub>2</sub> 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/m<sup>2</sup>, 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 (*)
<b>Filtros de cintas</b>	15 a 20	Lodo primario digerido por vía anaerobia.
<b>o prensas</b>	13 a 20	Lodo mixto digerido por vía anaerobia.
<b>desaguadoras</b>	17 a 25	Lodo de digestión aerobia.

Equipo	Contenido de sólidos (%)	Comentarios (*)
<b>Filtro prensa</b>	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.
<b>Centrifuga</b>	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)<sub>2</sub>]. 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	<i>Salmonella</i> sp.	Virus	
Resolución CONAMA 375/2006	A	<10 <sup>3</sup> 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<sup>-1</sup>] 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).

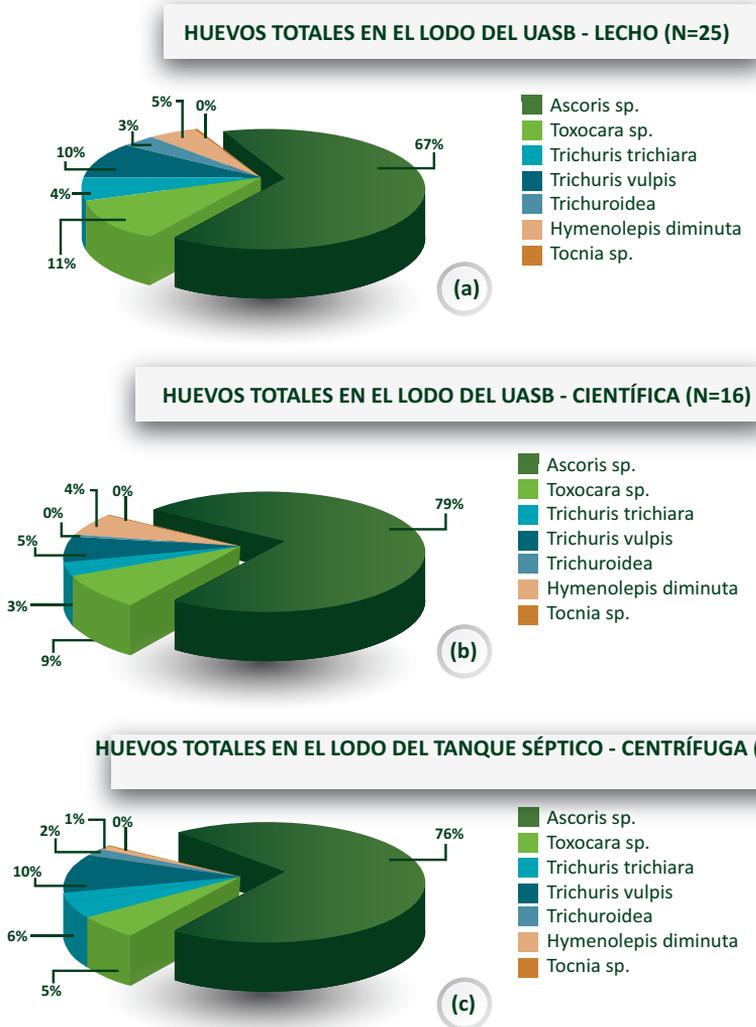
Al comparar la frecuencia y el recuento de *Salmonella sp.*, en las muestras analizadas en este estudio, con los valores de esa bacteria en estudios realizados en otras regiones del país, se verificó una elevada variabilidad en los resultados. Estas diferencias, como se mencionó anteriormente, pueden 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 [Ca (OH)<sub>2</sub>] 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

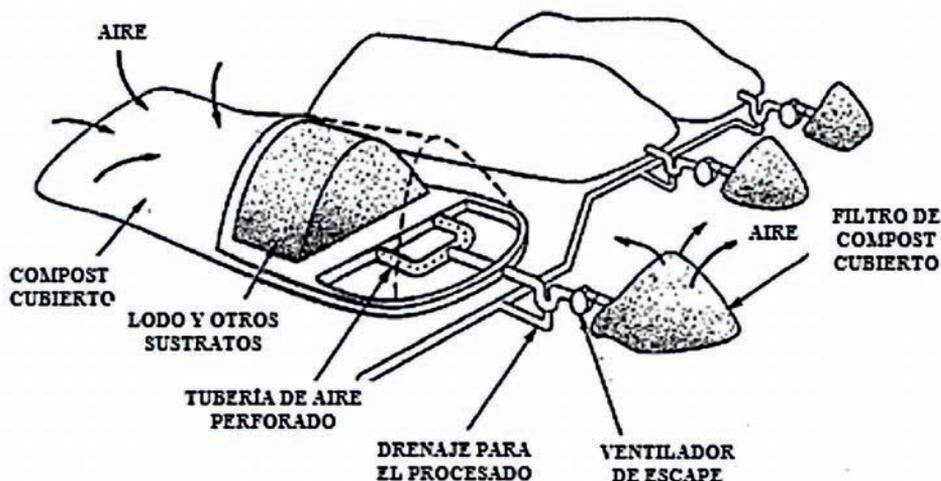
## Compostaje

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  $\text{CO}_2$ , 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.

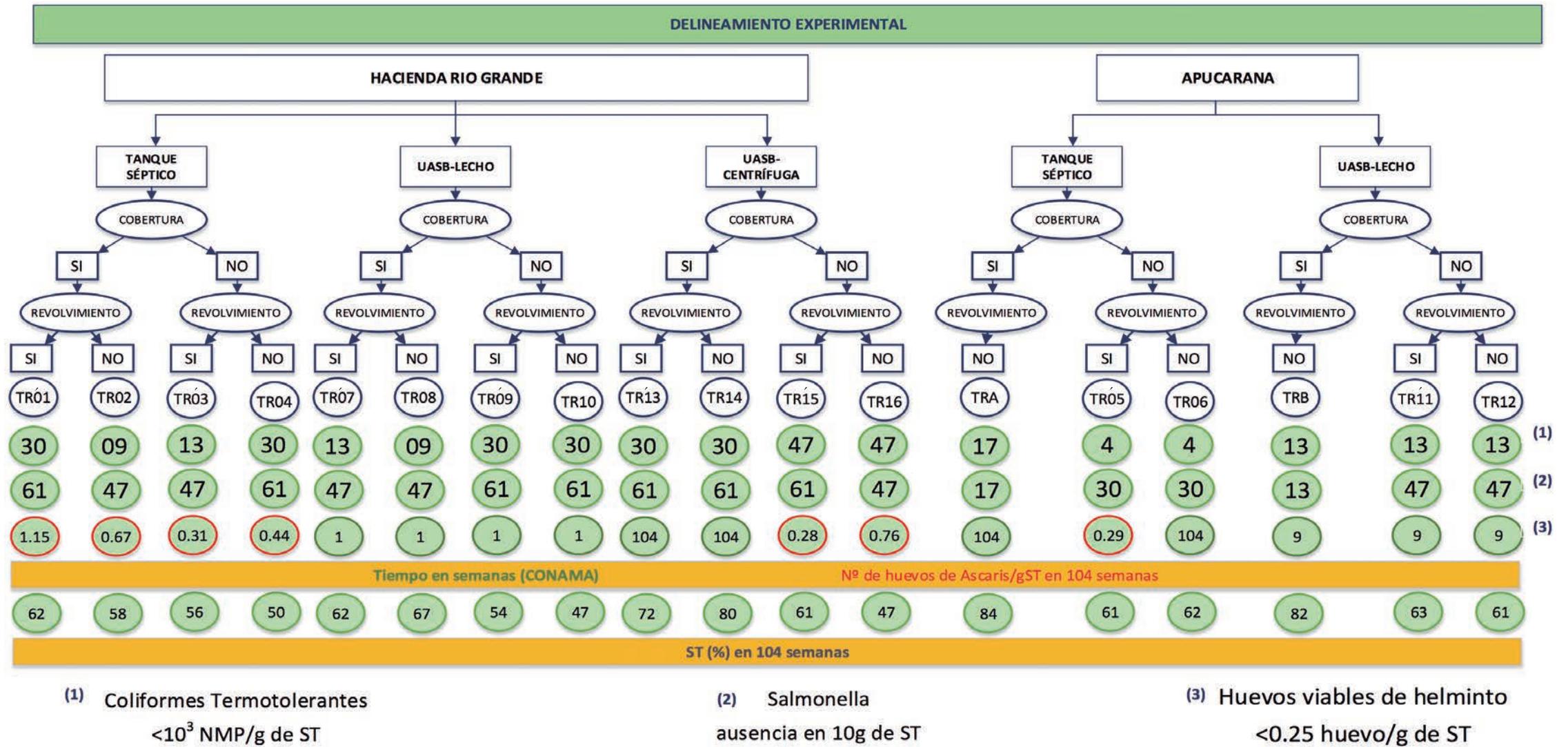


Fuente: Autores

## 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 / m<sup>2</sup>, 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  $4 \times 10^4$  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

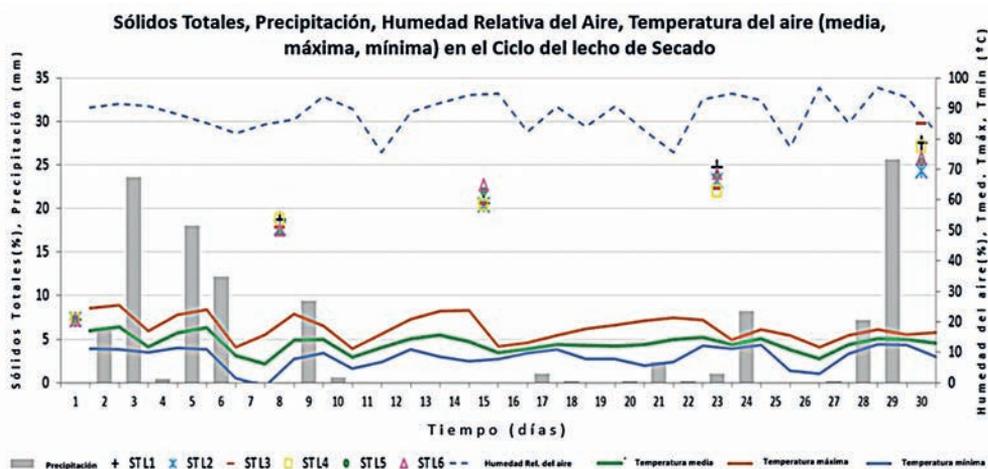
El contenido inicial de sólidos en los lodos fue del 3,5% de ST, llegando al 30,1% en 27 días con tasa de aplicación de 15,8 kg de ST / m<sup>2</sup>. En el día 24, cuando se realizó el análisis de huevos de helmintos, el contenido de ST era 23,3% en L1 y 24,7% en L2, con alturas de 10 y 13 cm, respectivamente. 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

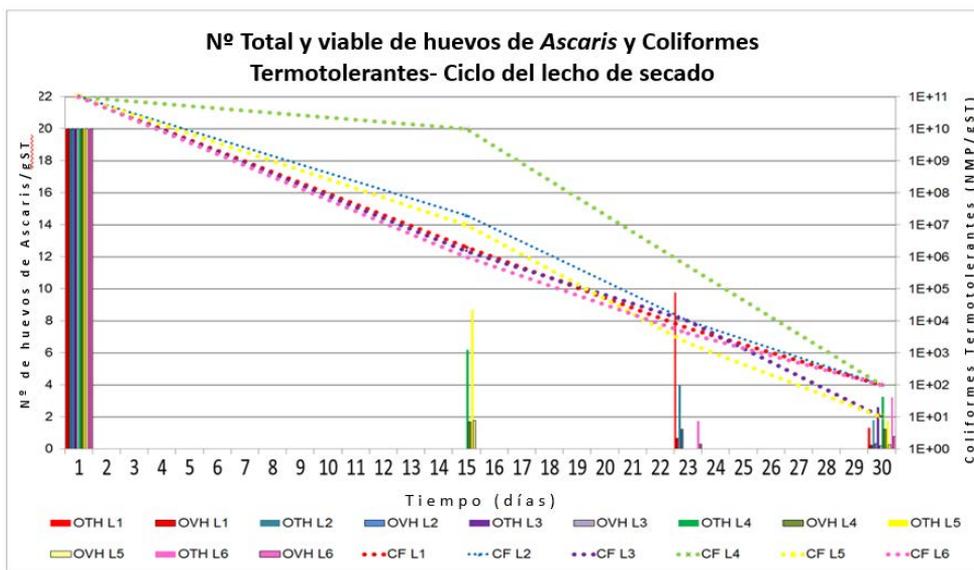


Fuente: Autores.

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 summ* 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](http://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](http://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.



# CAPÍTULO 5

## APROVECHAMIENTO

DE LODOS Y BIOSÓLIDOS



DOI: <https://doi.org/10.24267/9789585120136.5>



**SIMONE BITTENCOUR**

Ingeniera Agrónoma. Maestría en Agronomía y Doctora en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambientales de la Universidad Federal de Paraná. Profesora de la Facultad Fael. Profesional de la Compañía de Saneamiento del Paraná (Sanepar) en los temas de gestión de residuos de sistemas de residuos líquidos. Email: [sbittencourt@sanepar.com.br](mailto:sbittencourt@sanepar.com.br)



## 5.1 USO AGRÍCOLA DEL LODO GENERADO EN LA PTAR DEL ESTADO DE PARANÁ, BRASIL

*Simone Bittencour*

Es de gran importancia ambiental que el lodo generado en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) tengan un destino adecuado, contribuyendo a la salud pública y la preservación ambiental. La incineración (Xu, Wang & Wang, 2015), el uso como biomasa para generación de energía (Koga, et al., 2007), la mezcla para fabricación de cemento (Departamento de Planejamento do Meio Ambiente. DPMA, 2011) y de materiales de construcción (Okuno, et al., 2004) la aplicación en áreas agrícolas y la disposición en rellenos, son algunos de los ejemplos de destino final, utilizados mundialmente, siendo los dos últimos frecuentes en Brasil.

El destino final del lodo en usos agrícolas es ambientalmente sostenible, al promover el reciclaje de nutrientes y ser beneficioso, tanto para el cultivo de plantas como para mejorar las características físico-químicas y biológicas del suelo. A pesar de ser una alternativa consolidada en muchos países (Priest, 2017; United State Environment Protection Agency, s.f., Le Conseil Canadien des Ministres de L'environnement, 2017; Water Uk, 2010), en Brasil está limitada a pocos estados (Sampaio, 2013). Paraná es uno de los estados donde el destino final prioritario del lodo es la agricultura.

El lodo es un material predominantemente orgánico, que contiene nutrientes como nitrógeno y fósforo, los cuales benefician al suelo y al desarrollo vegetal, aunque puede ser utilizado también en la recuperación de suelos erosionados y de áreas degradadas (Navas, Machin & Navas, 1999; Bezerra, et al., 2006), así como, fuente de nutrientes para cultivos agrícolas y forestales (Lourenço, et al., 1996; Deschamps, Favaretto, 1998; Junio, et al., 2013). Sin embargo, estos subproductos también pueden contener sustancias inorgánicas y orgánicas contaminantes, con potencial de causar impactos negativos al ambiente y a la salud de poblaciones humanas y animales, eventualmente expuestas, así como la proliferación de agentes patógenos, que deben reducirse a niveles que minimicen los riesgos para la salud humana.

En Brasil, el destino agrícola de lodo doméstico sigue la Resolución núm. 375, del 29 de agosto de 2006 del Consejo Nacional del Medio Ambiente.

Entre los procedimientos de la Resolución CONAMA 375/06, están aquellos relacionados con la concesión de licencias, la frecuencia de monitoreo del lodo, la elaboración de proyectos agronómicos, las condiciones de manejo, transporte y aplicación del material. El documento también establece criterios para cultivos y áreas agrícolas aptas para recibir el material, para restricciones en la ubicación, para la definición de la tasa de aplicación y para el monitoreo de las áreas de aplicación. Entre los requisitos mínimos de calidad del lodo, se definen límites de concentración para agentes patógenos, indicadores bacterianos y contaminantes inorgánicos. A diferencia de la mayoría de las legislaciones internacionales sobre el tema, la Resolución CONAMA 375/06 exige el monitoreo de sustancias orgánicas en el lodo, sin haber determinado los límites máximos de concentración (Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente do Brasil, 2006).

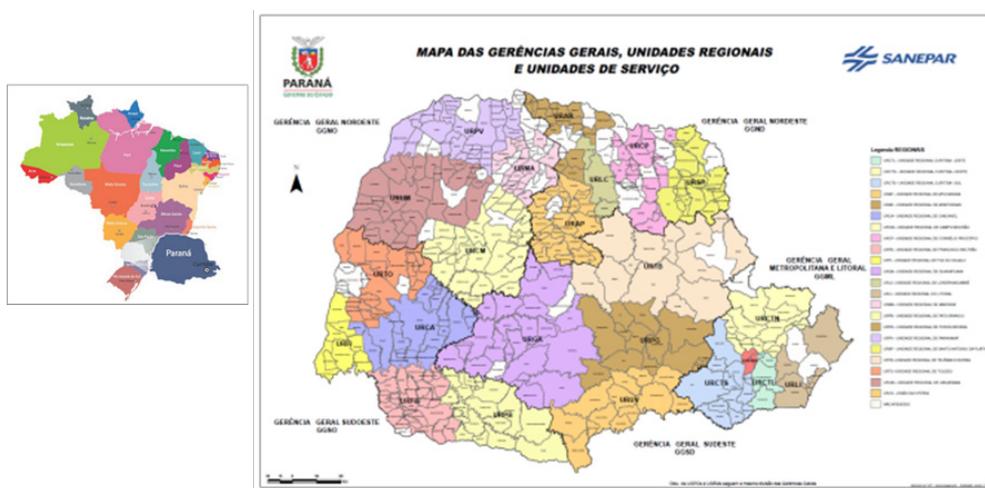
En el estado de Paraná, los procedimientos, estándares y requisitos para la utilización del lodo en áreas agrícolas son establecidos por la Resolución de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Recursos Hídricos (SEMA) 021/09 (2009). Esta resolución define la unidad de gestión de lodo (UGL) como una unidad, vinculada o no a las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), con fines de reciclaje agrícola. Las UGLs son unidades responsables por la recepción, procesamiento, caracterización, transporte, destino del lodo producido por una o más plantas de tratamiento de aguas residuales sanitarias y monitoreo de los efectos ambientales, agronómicos y sanitarios de su aplicación en área agrícola (Resolución CONAMA 375/06, 2006).

Las características del lodo generado en una PTAR, sea exclusivamente doméstico o doméstico e industrial, los temas relacionados con la infraestructura y aspectos geográficos, como la ausencia de rellenos licenciados o de áreas agrícolas próximas, y los criterios legales, tienen influencia en la definición de la alternativa de destino final más adecuada. Así, esas y otras peculiaridades locales son variables y deben ser consideradas para la definición de un plan de gestión de lodo de aguas residuales (AR) que promueve la sostenibilidad del proceso.

## El sistema de alcantarillado sanitario en Paraná

El estado de Paraná (ver Figura 5.1) posee 399 municipios y la Compañía de Saneamiento del Paraná (SANEPAR) actúa con sistemas de abastecimiento de agua, en 345 y con sistemas de alcantarillado sanitario, en 174. El volumen de agua residual facturado por la empresa en el año 2015 fue de 392,5 millones  $\text{m}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ , siendo este tratado en 234 PTAR (Companhia de Saneamento do Paraná, 2015).

**Figura 5.1** Localización del Estado de Paraná y municipios atendidos por la Compañía de Saneamiento de Paraná (SANEPAR, 2017).



Fuente: Sanepar 2017

El tratamiento de aguas residuales se realiza en reactores anaeróbicos, tipo *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB) seguido o no de post-tratamiento, con excepción de la PTAR Belém, en el municipio de Curitiba, donde el tratamiento biológico del agua residual es aeróbico, en sistema de lodos activados de aireación prolongada. El post-tratamiento en las PTAR con sistemas de tratamiento que contienen reactores anaeróbicos, tipo UASB, que lo contiene es de uno de los siguientes tipos: flotación por aire disuelto; laguna de estabilización; la laguna aireada y el filtro anaeróbico. Ninguna de las PTAR, tiene decantador primario en operación.

## Gestión del uso agrícola de lodo en Paraná

En el proceso de gestión de uso agrícola, desarrollado por SANEPAR, primero se define el formato de la UGL, es decir, su ubicación y las PTAR que la componen. Para esta definición, los gestores del proceso consideran:

- la disponibilidad de área e infraestructura para el tratamiento y el almacenamiento del lodo;
- el coste de transporte de lodo bruto de las PTAR que constituirán la UGL, hasta la PTAR o lugar donde estará situada físicamente la unidad;
- el costo de análisis de laboratorio, considerando que cuanto mayor sea el número de PTAR que componen una UGL, menor será este costo;
- la distancia del área agrícola donde se pretende aplicar el lodo de AR, factor que influye en el costo de transporte de la UGL hasta el área de aplicación.

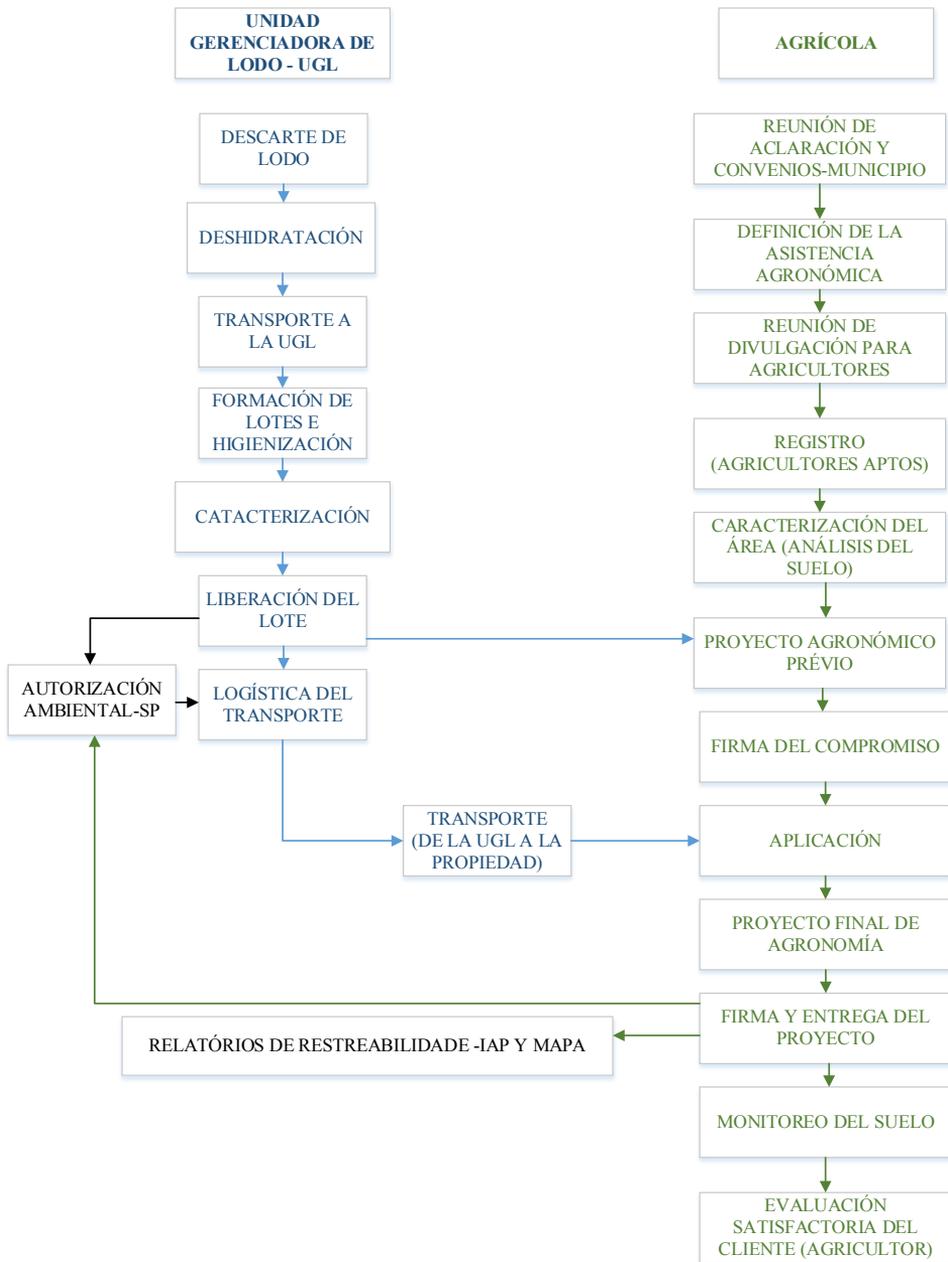
Después de definir la UGL, es elaborado, por un profesional habilitado, el plan de gerenciamiento de la unidad, necesario para el licenciamiento ambiental de la UGL (Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná, 2009). El documento contiene la descripción de todo el proceso de gestión, incluyendo las características de la UGL y del lodo generado, las áreas y cultivos prioritarios para su aplicación.

Los siguientes pasos son el licenciamiento de la UGL y la solicitud al Ministerio de Agricultura, Pecuaria y Abastecimiento (MAPA), de autorización para uso agrícola y forestal de lodo generado en las UGLs; se trata de una autorización para comercialización del material secundario, de acuerdo con lo dispuesto en el artículo 16 del Decreto 4.954 de 14 de enero de 2004 (Presidência da República, Casa Civil do Brasil, 2004).

De las 85 UGLs licenciadas por el órgano ambiental estatal (IAP), responsables de la gestión de lodo generado por una o más PTAR, 48 están en operación y realizan el destino agrícola.

Las actividades desarrolladas en el proceso de gestión de uso agrícola ocurren en dos esferas de acción: una en el ámbito de la UGL y otra en el ámbito agrícola (ver Figura 5.2).

**Figura 5.2** Diagrama de flujo de las etapas de gestión del proceso de uso agrícola de lodo en Paraná



Fuente: Autores

El desarrollo del proceso de uso agrícola es complejo (ver Figura 5.2) debido a que en el ámbito de la UGL las diversas etapas exigen planificación y control y, consecuentemente, son necesarios profesionales capacitados para su adecuada realización. De la misma forma, estas condiciones son primordiales para el desarrollo de las acciones en el ámbito agrícola, ya que involucran la participación, además del sector de saneamiento y del sector agrícola, de otros sectores como de salud y medio ambiente.

Para una mejor comprensión, se describen algunos aspectos importantes del proceso, desarrollado por la SANEPAR, para hacer viable el uso agrícola de los lodos provenientes de AR.

## Ámbito de la UGL

### Desprendimiento de lodo bruto neto de los reactores y deshidratación

El lodo es descargado de los reactores para mantener la eficiencia del tratamiento de aguas residuales en los mismos. Cada descarte de lodo efectuado en las PTAR que componen la UGL es debidamente medido, a fin de llevar el control de la producción de lodo que arribará a la UGL.

Después del descarte se realiza la deshidratación del lodo, en centrífugas o en lechos de secado. En las PTARs de caudal por encima de  $200 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ , o en aquellas de menor caudal que no poseen un área suficiente para la implantación de lechos de secado, el secado se lleva a cabo por medio de centrífugas (en 16 PTARs). En las PTARs de menor capacidad se utilizan lechos de secado de lodo.

### Higienización, formación, caracterización y liberación del lote de lodos

Es necesario higienizar el lodo según lo descrito en el Plan de Gestión de la UGL, para atender a los requisitos y límites de calidad de la Resolución SEMA 021/09 (2009).

El proceso de higienización adoptado en todas las UGLs que opera SANEPAR, es el de Estabilización Alcalina Prolongada (EAP), el cual eleva el pH del lodo a 12 con un período posterior de curación de 30 días, reduciendo así los agentes patógenos a los niveles exigidos por la legislación (Resolución SEMA 021/09 PARANÁ, 2009). De este modo, la formación del lote de lodo proveniente de AR ocurre 30 días antes de la toma de muestras para

llevar a cabo los análisis de laboratorio, momento en el que no se añade más lodo al lote. En este proceso de higienización se aplica una dosificación de cal de entre el 30 a 50%, en relación con los sólidos totales (ST) del lodo, ocurriendo así que en los lodos más secos se utilizan dosificaciones más cercanas al 30%.

La higienización del lodo proveniente de los lechos de secado se realiza de alguna de las siguientes formas:

- a) la mezcla de la cal y lodo se efectúa inmediatamente después de cada retirada de lodo del lecho, y es almacenada en un patio hasta la formación del lote (en tandas);
- b) el lodo retirado de cada descarga del lecho se almacena hasta obtener la cantidad necesaria para la formación de un lote, una vez alcanzado el volumen necesario se lleva a cabo la mezcla de cal con el lote completo de lodo (en una sola etapa).

En el lodo que se encuentra siendo procesado en la centrífuga, la mezcla de la cal es continua, ejecutada inmediatamente después de deshidratarlo, usando un mezclador mecánico. Posteriormente, se lleva la mezcla almacenada a un patio, donde permanece hasta alcanzar las dimensiones de un lote.

En las PTAR que pertenecen a las UGLs ubicadas en otro lugar, el lodo es almacenado hasta la obtención de la cantidad que viabiliza económicamente su transporte hasta la UGL licenciada, lugar donde el lodo es higienizado. De esta manera, el proceso de higienización se realiza en la PTAR generadora.

Usualmente, en las UGLs del interior de Paraná se forma un lote de lodo de AR al año, mientras que en las UGLs de la Región Metropolitana de Curitiba (RMC) los lotes son formados mensualmente (UGL Belém) o trimestralmente (otras UGLs de la RMC).

En el proceso de higienización por EAP, es necesario que el lodo, después de aplicada la cal, permanezca, como mínimo, 60 días almacenado en patio (30 días para el período de curación y cerca de 30 días para realización de análisis de huevos viables de helmintos). En el caso de la generación de lodo de la UGL Belém, a pesar de la Resolución CONAMA no

375/06 establecer la formación con su respectiva caracterización bimestralmente, la caracterización es mensual para optimizar el uso del patio de almacenamiento y para facilitar la logística de transporte para las áreas agrícolas. El muestreo para caracterización de los lotes de lodo se efectúa de acuerdo con los procedimientos descritos en la Instrucción Normativa núm. 10 de 2004, del Ministerio de Agricultura, Pecuaria y Abastecimiento (MAPA) (2004).

Cada lote de lodo se caracteriza de acuerdo con los parámetros establecidos por la Resolución SEMAPAR en el 21/09 (Secretaría de Estado de Medio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná, 2009). Después que se comprueba que el lote atiende a los límites establecidos por la legislación, en cuanto a la sanidad, estabilidad y sustancias inorgánicas, por medio de la interpretación de los resultados de laboratorio, el mismo es liberado para uso agrícola.

Si el lodo presenta características inapropiadas para uso agrícola en relación con la sanidad, el mismo pasará por una nueva higienización y, en el caso de no atender a los límites de sustancias inorgánicas, la alternativa es la disposición en rellenos para residuos Clase II - no inertes (ABNT, 2004).

El transporte del lodo hasta el área de aplicación es realizado por medio de contrato de transporte con empresa transportadora, pero previamente es necesaria la solicitud de la autorización ambiental (AA) al IAP para el transporte y destino final respectivo del lote.

## Ámbito Agrícola en Brasil

### Reuniones de aclaración y divulgación, definición de la asistencia y registro de agricultores

Previamente a la entrega del lodo en áreas agrícolas en un municipio, se llevan a cabo reuniones de aclaración con personal de las entidades relacionadas con la salud, el medio ambiente y los agricultores del municipio. El objetivo es presentar el proyecto, identificar tanto a los agricultores interesados como las áreas y cultivos aptos para la aplicación, al mismo tiempo que se levanta el censo de los agricultores interesados en recibir lodo para beneficiar sus tierras.

También se define la asistencia agronómica, es decir, el acompañamiento del profesional que elaborará los proyectos agronómicos y orientará al agricultor en los criterios exigidos. La asistencia agronómica es ejecutada por un profesional propio de la SANEPAR o externo a la empresa en asociación, por ejemplo, con el Instituto Paranaense de Asistencia Técnica y Extensión Rural (Emater), cooperativas de agricultores, o con el ingeniero agrónomo u forestal responsable del área agrícola o forestal, así como, por la contratación del servicio.

## **Reconocimiento de áreas agrícolas y proyecto agronómico**

El lodo proveniente de AR está disponible para los agricultores, previamente registrados, que cultivan plantas aptas, cuyas áreas son viables para la aplicación del material (Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná, 2009). La evaluación de las áreas es llevada a cabo por profesional calificado; también, se recolectan muestras de suelo y se hace una caracterización de la fertilidad para la elaboración del proyecto agronómico.

El proyecto agronómico es el documento elaborado por profesionales capacitados en la aplicación de lodo en una determinada área agrícola, observando los criterios y procedimientos de la legislación vigente (Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná, 2009). En el proyecto se determina la tasa de aplicación, considerando las características agronómicas del lodo, del suelo y las necesidades nutricionales del cultivo y, cuando sea necesario, se define como complemento, la fertilización.

La determinación de la tasa de aplicación máxima de lodo (en % de ST) se ejecuta utilizando el menor valor calculado, considerando los siguientes criterios:

a) necesidad de nitrógeno (N): se calculó el suministro de N disponible en el lodo en el primer cultivo, conforme determina la legislación vigente (Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente do Brasil, 2006; Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná, 2009);

b) necesidad de corrección de acidez del suelo: se calcula la necesidad de corrección de acidez del suelo para elevación de la saturación de bases (V%) al nivel exigido por el cultivo (Oleynik, et al., 2004; Poggere, et al., 2012);

c) límite de carga total acumulada de sustancias inorgánicas en el suelo: se lleva a cabo el cálculo teórico de acumulación de sustancias inorgánicas en el suelo, considerando la cantidad del elemento en el lodo (Secretaría de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná, 2009).

Previamente a la aplicación del lodo en las áreas agrícolas, los agricultores reciben orientación técnica y firman los proyectos agronómicos, donde atestiguan que son conscientes de todos los requerimientos e indicaciones para su uso y se comprometen a seguirlos adecuadamente. El lodo se suministra sin costo para el agricultor.

El proyecto agronómico es elaborado en original y dos copias, todas ellas debidamente firmadas tanto por los responsables (de la UGL e ingeniero agrónomo) como por el agricultor. Las copias de los proyectos agronómicos se entregan al IAP, anexas a la solicitud de AA para el próximo lote de lodo. Los datos de los proyectos se utilizan para los informes enviados al IAP y al MAPA.

Después de la aplicación de lodo en el área agrícola se lleva a cabo el monitoreo de las características del suelo, conforme determina la legislación. Por último, la evaluación de la satisfacción del cliente (agricultor) tiene como objetivo la mejora continua del proceso.

## **Informe de trazabilidad**

El informe de trazabilidad es el documento que contiene datos que posibilitan relacionar el origen y calidad del lodo utilizado como insumo agrícola, con los respectivos terrenos agrícolas donde fue aplicado, cultivos y destino de los productos cosechados. Este documento tiene como objetivo identificar los posibles problemas que se pudieran generar en la salud humana, animal o ambiental por el contacto con los lodos o por el consumo de los productos (Secretaría de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná, 2009).

## **Uso agrícola de lodo en Paraná entre los años 2014 y 2015**

En los años 2014 y 2015 se aplicaron 46.361 toneladas de lodo proveniente de AR, debidamente higienizados por EAP ( $20.670 t_{ST}$ ), en 3.280 ha de terrenos agrícolas del estado de Paraná (ver Tabla 5.8), siendo la tasa promedio

de aplicación de  $6,94 t_{ST} \cdot ha^{-1}$ . Las UGL de la RMC fueron responsables del 65% del total del lodo destinado, medido este en toneladas de materia seca.

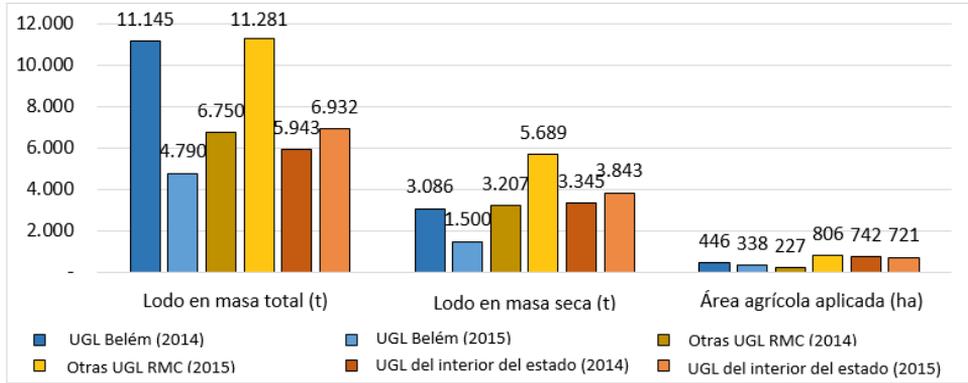
**Tabla 5.1** Destino agrícola de lodo higienizado por estabilización alcalina prolongada, por grupo de UGL, en el estado de Paraná en 2014 y 2015.

Grupo de UGL	Toneladas destinadas		Área aplicada (ha)	Tasa de aplicación media (tST ha-1)
	Masa total	Sólidos totales		
Belém (RMC) <sup>1</sup>	15.935	4.586	784	4,8
Otras RMC <sup>2</sup>	17.732	8.896	1.033	8,7
Interior <sup>2</sup>	12.694	7.188	1.463	6,1
TOTAL	46.361	20.670	3.280	6,9

NOTA: Tratamiento de deshidratación por: 1 Los activados de aireación prolongada; 2 Reactor anaeróbico tipo UASB seguido de post-tratamiento. Las cantidades de lodo en masa total y de sólidos totales (ST) se refieren a lodo con adición de cal en la higienización.

Para la UGL Belém hubo una reducción en la cantidad de lodo destinada a uso agrícola en el año 2015, al ser comparado con el año 2014, y al contrario de lo que fue observado para los demás grupos de UGLs (ver Figura 5.3). Esta reducción fue ocasionada por la imposibilidad de ejecutar el apropiado proceso de higienización del lodo, debido al uso del área de los patios de almacenamiento para la construcción de nuevas unidades estructurales en la PTAR. De esta forma, en el año 2015 una mayor cantidad de lodo de la PTAR Belém fue destinada para relleno sanitario y consecuentemente una menor cantidad de terrenos agrícolas recibieron lodo proveniente de esa UGL (ver Figura 5.3).

**Figura 5.3** Cantidad lodo de AR higienizado por estabilización alcalina prolongada y de áreas agrícolas que recibieron lodo, por el grupo de la UGL, en Paraná en 2014 y 2015.



Fuente: Autores

Los 70 lotes de lodo provenientes de AR destinados a uso agrícola producidos en 2014 y 2015, mostraron niveles de indicadores bacterianos y organismos patógenos por debajo de los límites establecidos por la Resolución SEMA 021/09 (2009), los cuales se presentan en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2** Parámetros de sanidad de los lotes de lodo, higienizados por EAP aplicados en áreas agrícolas, en Paraná en 2014 y 2015.

Parámetros de saneamiento	Límite SEMA 021/09	Media	Número de resultados de laboratorio (70)	
			Resultado por abajo de LQ	Resultado igual a cero
Coliformes termotolerantes (NMP·g <sup>-1</sup> ST <sup>-1</sup> )	< 10 <sup>3</sup>	135	57	0
Huevos de helmintos viables (g·ST <sup>-1</sup> )	< 0,25	-	59	11
<i>Salmonella</i> sp. (en 10 g <sub>ST</sub> <sup>-1</sup> )	ausencia	-	-	70
Virus (UFP o UFF·g <sup>-1</sup> ST <sup>-1</sup> )	< 0,25	-	70	-

NOTA: gST-1-por gramos de sólidos totales de lodo. LQ-límite de cuantificación de laboratorio. NMP - número más probable. UFP-unidad formadora de placa. UFF-unidad formadora de foco. Media, excluyendo los resultados iguales a cero y el LQ.

En el período de 2014 a 2015, los lotes de lodo fueron utilizados por 54 agricultores, siendo aplicados en los cultivos de fríjol, soja, maíz, trigo, nuez pecan, naranjo, árboles de caucho y eucalipto, en áreas agrícolas situadas en 26 municipios del estado. En la Tabla 5.3 se presentan los resultados de los parámetros agronómicos de los lotes de lodo proveniente de AR destinados a uso agrícola, en ese período; cabe señalar que las resoluciones CONAMA 375/06 y SEMA 021/09 no establecen límites para dichos parámetros.

**Tabla 5.3** Media y desviación estándar de los parámetros agronómicos de los lotes de lodo higienizados por estabilización alcalina prolongada, aplicados en áreas agrícolas en Paraná, en 2014 y 2015.

Parámetro agrícolas	Unidad	Total	
		Media	Desviación estándar
pH <sub>H<sub>2</sub>O</sub>		10,5	1,7
ST	%	52,3	18,3

Parámetro agrícolas	Unidad	Total	
		Media	Desviación estándar
SVT	(% de ST)	34,6	9,4
C <sub>org</sub>		16,2	5,5
N <sub>kjeldahl</sub>		1,9	0,9
N <sub>amoniacal</sub>		0,3	0,4
N <sub>nitrito+nitrito</sub>		0,06	0,2
P <sub>total</sub>		0,7	0,6
K <sub>total</sub>		0,1	0,09
Ca <sub>total</sub>		10,2	3,8
Mg <sub>total</sub>		4,7	3,2
S <sub>total</sub>		0,8	0,7
Na <sub>total</sub>	0,07	0,04	

NOTA: Parámetros agronómicos exigidos por las resoluciones CONAMA 375/06 y SEMA 021/09.

En cuanto a las sustancias orgánicas, las resoluciones CONAMA 375/06 y SEMA 021/09 establecen que 34 contaminantes orgánicos deben ser determinados, incluso cuantitativamente, en los lodos destinados a uso agrícola (ver Tabla 5.4); sin embargo, no se establecen límites de concentración.

**Tabla 5.4** Concentraciones de sustancias orgánicas permitidas en suelos agrícolas según las resoluciones CONAMA 375/06 y SEMA 021/09

Compuestos	Concentración permitida en el suelo
	Resolución CONAMA 375/06
Benzenos Clorados	
1,2-Diclorobenzeno	0,73
1,3-Diclorobenzeno	0,39
1,4-Diclorobenzeno	0,39
1,2,3-Triclorobenzeno	0,01
1,2,4-Triclorobenzeno	0,011
1,3,5-Triclorobenzeno	0,5
1,2,3,4-Tetraclorobenzeno	0,16
1,2,4,5-Tetraclorobenzeno	0,01
1,2,3,5-Tetraclorobenzeno	0,0065
Ftalatos o Ésteres de Ácido Ftálico	
Di-n-butilftalato	0,7
Di(2-etilhexil)ftalato (DEHP)	1,0
Dimetilftalato	0,25
Fenoles No Clorados	
Cresóis	0,16
Fenoles Clorados	
2,4-Diclorofenol	0,031
2,4,6-Triclorofenol	2,4
Pentaclorofenol	0,16
Hidrocarbomos Aromáticos Policíclicos (HAPs)	
Benzo(a)antraceno	0,025
Benzo(a)pireno	0,052
Benzo(k)fluoranteno	0,38
Indeno(1,2,3-c.d)pireno	0,031

<b>Compuestos</b>	<b>Concentración permitida en el suelo Resolución CONAMA 375/06</b>
Naftaleno	0,12
Fenantreno	3,3
Lindano	0,001
Contaminantes Orgánicos Persistentes (COPs)	
Aldrin	-
Dieldrin	-
Endrin	-
Clordano	-
Heptacloro	-
DDT	-
Toxafeno	-
Mirex	-
Hexaclorobenzeno	-
PCB's	-
Dioxinas y Furanos	-

Fuente: Resolución CONAMA 375/06

Cuando una sustancia orgánica se detecta en la caracterización del lodo, se debe realizar el monitoreo de esa sustancia orgánica en el suelo. Las resoluciones determinan que deben ser monitoreadas constantemente las concentraciones de la Tabla 4 en el suelo y la frecuencia del monitoreo será establecida por la entidad ambiental competente. Las resoluciones también establecen que en función de las características específicas del agua del alcantarillado sanitario y de los efluentes recibidos, las UGL podrán requerir, junto a la entidad ambiental competente, alteración de la lista de sustancias orgánicas a ser analizadas en los lodos (Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente do Brasil, 2006 y Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná, 2009).

Debido a la disminución en la frecuencia del número de análisis de sustancias orgánicas autorizadas por el IAP, para las UGLs de la RMC, 42 de los 70 lotes de lodo destinados a uso agrícola, de 2014 a 2015, se caracterizaron en cuanto a las sustancias orgánicas. De estos, solo una fracción presentó sustancias orgánicas por encima del límite de cuantificación de laboratorio.

El lote de la UGL Río de las Antas, municipio de Irati (ver Tabla 5.12).

Los resultados del cálculo teórico de la concentración de las sustancias orgánicas, detectadas aplicadas en el suelo, estuvieron muy por debajo del límite permitido por las resoluciones CONAMA 375/06 y SEMA 021/09 (ver Tabla 5.5). De esta forma, no se realizó ningún estudio para verificar las causas de la presencia de estos compuestos en los lotes, además, según determina la Resolución CONAMA 375/06, se sugirió que se realizaran análisis de estos compuestos en el suelo de las áreas agrícolas que recibieron esos lodos.

**Tabla 5.5** Sustancias orgánicas detectadas en lote de lodo de AR de la UGL Río de las Antas, municipio de Irati, aplicado en áreas agrícolas en 2015.

Sustancia orgánica	Concentración (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Lote de lodo	Aplicada en el suelo	Permitida en el suelo (CONAMA 375/06 y SEMA 021/09)
1,3-Diclorobenzeno	0,206	$1,0 \times 10^{-3}$	0,39
1,4-Diclorobenzeno	0,273	$1,3 \times 10^{-3}$	0,39

Sustancia orgánica	Concentración (mg kg <sup>-1</sup> )		
	Lote de lodo	Aplicada en el suelo	Permitida en el suelo (CONAMA 375/06 y SEMA 021/09)
Di(2-etilhexil)ftalato (DEHP)	0,0125	$6,2 \times 10^{-5}$	1,00
Lindano	0,00058	$2,9 \times 10^{-6}$	0,001
Cresoles	0,0173	$8,6 \times 10^{-5}$	0,16

NOTA: El cálculo de la cantidad de sustancia orgánica aplicada en el suelo se realizó utilizando la cantidad de 2 millones de kg de suelo por hectárea. Se adoptó una tasa media de aplicación en los proyectos agronómicos de aplicación del lote de 10 tST ha<sup>-1</sup>.

En cuanto a los parámetros inorgánicos (metales) de los lotes de lodo destinados a uso agrícola en Paraná en 2014 y 2015, todos los lotes presentaron resultados por debajo del límite de cuantificación de laboratorio para los parámetros As y Se. Se observa, por los coeficientes de variación (ver Tabla 5.6), que hubo una gran variabilidad en la concentración de metales en los lotes.

**Tabla 5.6** Media y coeficiente de variación de los parámetros inorgánicos (metales) de los lotes de lodo higienizados por estabilización alcalina prolongada, aplicados en áreas agrícolas en Paraná, en 2014 y 2015.

Parámetro inorgánico	Media (mg kg <sup>-1</sup> ST)	CV (%)	Percentil				Resolución SEMA 021/09
			75	90	95	99	
As	5,5	92	10,0	10,0	10,0	10,0	41
Ba	168,7	60	211,7	263,4	300,7	491,6	1300
Cd	3,9	1484	2,8	14,7	16,0	419,5	20
Cr	118,3	130	122,7	304,7	390,3	672,6	1000
Cu	114,5	70	120,9	186,4	249,2	446,7	1000
Hg	1,7	185	1,0	10,0	10,0	10,0	16
Mo	5,7	82	10,0	10,0	10,0	10,0	50
Ni	32,7	79	43,9	70,2	80,9	110,7	300
Pb	41,3	126	34,6	124,9	170,7	215,7	300
Se	5,6	86	10,0	10,0	10,0	10,0	100
Zn	453,6	53	521,7	736,3	948,1	1149,8	2500

NOTA: En los resultados por debajo del límite de cuantificación de laboratorio (LQ), el mismo se utilizó para el cálculo de las medias.

En la Tabla 5.6 se presenta la comparación entre los límites de la Resolución SEMA 021/09 con los porcentajes de 75, 90, 95 y 99 para los metales contenidos en los lotes evaluados, confirmándose la información de que el lodo generado presenta contenidos de sustancias inorgánicas (metales) por debajo de los límites establecidos por la Resolución SEMA 021/09 (Bittencourt, et al., 2010).

En Paraná, los lodos son generados en las PTAR cuyo afluente procede de áreas de baja actividad industrial. La aceptación de efluentes industriales en la red de alcantarillado doméstico de la empresa de saneamiento, SANEPAR, está condicionada a la atención por parte de la industria de criterios de calidad del efluente. Se definen valores límites para: DBO, DQO, pH, temperatura, aceites y grasas, sólidos sedimentables, N, P, Ag, As, Cd, Cr, Cu, Fe soluble, Hg, Ni, Pb, Se, Sn, Zn, el benceno, el cianuro, el cloroformo, el dicloroetano, el estireno, el etibenceno, el fenol, el fluoruro, el sulfato, el sulfuro, los surfactantes, el tetraciuuro de carbono, el tolueno y el xileno. Los gestores pueden establecer límites más restrictivos basados en la evaluación local de capacidad de las redes recolectoras y de la PTAR (Companhia de Saneamento do Paraná, 2013).

## Referencias

- Associação Brasileira de Normas Técnicas [ABNT]. (2004). *NBR 10.004: Resíduos sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Bezerra, F. B., De Oliveira, M. A. C. L., Perez, D. V., De Andrade, A. G., & Meneguelli, N. D. A. (2006). Lodo de esgoto em revegetação de área degradada. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 41(3), 469-476. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2006000300014>
- Bittencourt, S., Andreoli, C. V., Mochida, G. A., & Serrat, B. M. (2010). Uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná. In: Coscione, A. R., Nogueira, T. A. R. y Pires, A. M. M. (Ed.). *Uso Agrícola de Lodo de Esgoto: avaliação após a Resolução n.375 do CONAMA* (pp. 281-300). Botucatu: FEPAF.
- Bittencourt, S. (2014). *Gestão do processo de uso agrícola de lodo de esgoto no estado do Paraná: Aplicabilidade da Resolução Conama 375/06*. (Tese Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Companhia de Saneamento do Paraná (2017). *Mapa das gerências gerais, unidades regionais e unidade de serviço. Portal de Informações: Sistema de Informações e Gestão da SANEPAR*. Curitiba: SANEPAR.

- Companhia de Saneamento do Paraná. (2015) *Relatório de Administração e de Sustentabilidade: Demonstrações Contábeis*. Curitiba: SANEPAR. Recovered from <[http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/investidores\\_rel\\_ian\\_dfp\\_itr/ian-dfp\\_itr/rel\\_Relato%C3%B3rios%20Trimestrais2015-12-31\\_0.pdf](http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/investidores_rel_ian_dfp_itr/ian-dfp_itr/rel_Relato%C3%B3rios%20Trimestrais2015-12-31_0.pdf)>
- Companhia de Saneamento do Paraná (2013). *Sistema Normativo da SANEPAR*. IT/OPE/1899 - Gestão de Efluentes Não Domésticos. Curitiba: SANEPAR.
- Departamento de Planejamento do Meio Ambiente, Divisão Administrativa de Esgoto do Yokohama. (2011). *O nível de radiação em Yokohama (Situação Geral)*. Recovered from <http://www.city.yokohama.lg.jp/kenko/houshasen/multi-language/portuguese.pdf>
- Deschamps, C., & Favaretto, N. (1998). Efeito do lodo de esgotos complementado com fertilizante mineral na produtividade e desenvolvimento da cultura do feijoeiro e do girassol. *Sanare*, 8(8), 33-39.
- Junio, G. R. Z., Sampaio, R. A., Nascimento, A. L., Santos, G. B., Santos, L. D. T., & Fernandes, L. A. (2013). Produtividade de milho adubado com composto de lodo de esgoto e fosfato natural de Gafsa. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande*, 17(7), 706-712.
- Koga, Y., Oonuki, H., Amari, T., Endo, Y., Kakurata, K., & Ose, K. (2007). Biomass Solid Fuel. Production from Sewage Sludge with Pyrolysis and Co-firing in Coal Power Plant. *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review*, 44(2). Recovered from <<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e442/e442043.pdf>>.
- Le Conseil Canadien des Ministres de L'environnement (2017.). *Biosolids*. Recovered from <https://www.ccme.ca/en/resources/waste/biosolids.html>
- Lourenço, R. S., Anjos, A. R. M. dos, Libardi, P. L., & Medrado, M. S. M. (1996). Efeito do lodo de esgoto na produtividade de milho e feijão, no sistema de produção da bracinga. *Sanare*, 5(5), 90-92.
- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil. (4 de novembro de 2004). Instrução normativa MAPA nº 10, de 06/05/2004. Aprova as definições e normas sobre as especificações e as garantias, as tolerâncias, o registro, a embalagem e a rotulagem dos fertilizantes minerais, destinados à agricultura. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*. Recovered from <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/sanidadevegetal/legislacao>>
- Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente do Brasil. (30 de agosto de 2006). Resolução CONAMA n. 375, de 29 de agosto de 2006. Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamen-

- to de esgoto sanitário e seus produtos derivados. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*. Recovered from <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>>. Acesso em 25/01/2013.
- Navas, A., Machín, J., & Navas, B. (1999). Use of biosolids to restore the natural vegetation cover on degraded soils in the badlands of Zaragoza (NE Spain). *Bioresource Technology*, 69, 199-205.
- Okuno, N., Ishikawa, Y., Shimizu, A., & Yoshida, M. (2004). Utilization of sludge in building material. *Water Science and Technology*, 49(10), 225-232. <https://doi.org/10.2166/wst.2004.0650>
- Oleynik, J., Bragagnolo, N., Bublitz, U., & Silva, J.C.C. (1995). *Análises de solo: tabelas para transformação de resultados analíticos e interpretação de resultados* (3. ed.). Curitiba: EMATER-Paraná.
- Poggere, G. C., Serrat, B. M., Motta, A. C. V., Bittencourt, S., Dalpisol, M., & Andreoli, C. V. (2012). Lodos de esgoto alcalinizados em solos do Estado do Paraná: taxa de aplicação máxima anual e comparação entre métodos para recomendação agrícola. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 17(4), 429-438.
- Presidência da República. Casa Civil do Brasil. (2004). Decreto Federal nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004. Regulamenta a Lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, que dispõe sobre a inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes ou biofertilizantes destinados à agricultura. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*. Recovered from [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/decreto/d4954.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d4954.htm).
- Priest, G., & Association, A. W. (2017). *The Australian and New Zealand Biosolids Partnership: Creating New Frameworks for Biosolids Management*.
- Resolución núm. 375 (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. 29 de agosto. Brasil: Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).
- Sampaio, A. (2013). Afinal, queremos ou não viabilizar o uso agrícola do lodo produzido em estações de esgoto sanitário? Uma avaliação crítica da Resolução CONAMA 375. *Revista DAE*, 193, 16-27. Recovered from <<http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.109>>
- Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná. (30 de junho de 2009). Resolução Sema n. 021, de 30 de junho de 2009. Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento. *Diário*

- USEPA (s.f.). *Biosolids*. United States Environment Protection Agency. Recovered from <https://www.epa.gov/biosolids>.
- Water, U.K. (January 2010). *Recycling of biosolids to agricultural land*. 3. Recovered from [http://www.nutri-bio.co.uk/doclib/1\\_1414\\_270416\\_water\\_uk\\_recycling\\_of\\_biosolids\\_to\\_agricultural\\_land\\_2010\\_final\\_briefing\\_pack\\_1\\_.pdf](http://www.nutri-bio.co.uk/doclib/1_1414_270416_water_uk_recycling_of_biosolids_to_agricultural_land_2010_final_briefing_pack_1_.pdf)
- Xu, H., Wang, C., & Wang, K. (2015). Full-Scale Plant Study of the Innovative Spray-Drying-Based Sludge Incineration (SDSI) Process: Behavior of Heavy Metals. *Energy Fuels*, 29(6), 3908–3912.





# CAPÍTULO 6

## LODOS Y BIOSÓLIDOS

GENERADOS EN

PLANTAS DE TRATAMIENTO

» DE AGUA POTABLE



DOI: <https://doi.org/10.24267/9789585120136.6>



#### FERNANDO FERNANDES I

Ingeniero Civil de la UNICAMP (Universidad Estatal de Campinas), Doctor en Ingeniería por el Instituto Nacional Politécnico de Toulouse (INPT), Francia. Profesor del Centro de Tecnología y Urbanismo de la Universidad Estatal de Londrina (UEL) en el programa de ingeniería civil y en el programa de posgrado en ingeniería civil a nivel de maestría y doctorado en el Estado de Paraná, Brasil. E-mail: fernando@uel.br

#### FLÁVIA GONÇALVES PISSINATI PELAQUIM

Ingeniera Civil y Ambiental. Especialista en Ingeniería de Seguridad en el Trabajo y Maestría Ingeniería de Edificaciones y Saneamiento. Doctoranda en Ingeniería Civil. Docente en la Universidad Estatal de Londrina (UEL) y la Universidad del Norte de Paraná (Presencial e EAD. E-mail: flaviagoncalves@uel.br

#### RAQUEL SOUZA TEIXEIRA

Ingeniera Civil de la Universidad Federal de Ouro Preto (1992), maestría en Geotecnia de la Escuela de Ingeniería de San Carlos (EESC)/Universidad de San Pablo (1996) y Doctora en Ingeniería Civil de la Universidad Federal de Santa Catarina (2008). Profesora Asociada de la Universidade Estatal de Londrina – UEL-PR/BR / Programa de Pós-Graduação en Ingeniería Civil. Especialista en: Geotecnia, Mecánica de Suelos y Contaminación de suelos. E-mail: raquel@uel.br

#### EMILIA KIYOMI KURODA

Ingeniera Civil de la Escuela de Ingeniería de San Carlos Universidad de San Pablo - EESC-USP (1999), Maestría (2002) y Doctorado (2006) en Hidráulica y Saneamiento de las mismas instituciones y pós-doctorado en University of Meijo, Japón (2007 - 2008) y la Universidad Estatal de Londrina UEL (2008-2009). Profesora en el Centro de Tecnología y Urbanismo de la Universidad Estatal de Londrina. E-mail: ekkuroda@uel.br

#### SIMONE BITTENCOURT

Ingeniera Agrónoma. Maestría en Agronomía y Doctora en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambientales de la Universidad Federal de Paraná. Profesora de la Facultad Fael. Profesional de la Compañía de Saneamiento del Paraná (Sanepar) en los temas de gestión de residuos de sistemas de residuos líquidos. Email: sbittencourt@sanepar.com.br



## 6.1 USO DEL BIOSÓLIDO GENERADO EN PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE

*Fernando Fernandes, Maria Flavia Gonçalves, Raquel Souza Teixeira, y Emilia Kiyomi Kuroda.*

Los lodos generados en Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) tienen una composición predominantemente mineral y no son de interés en el uso agrícola, aunque pueden disponerse en el suelo, principalmente en la recuperación de áreas de suelo degradado; también, pueden ser utilizados como material de cobertura en rellenos sanitarios, principalmente mezclados con suelo local. Adicionalmente, pueden disponerse en otros usos, como son: terraplenes exclusivos, mezclados con artefactos de hormigón y en los materiales para la producción de ladrillos cerámicos.

Los lodos generados en PTAPs también puede disponerse en rellenos sanitarios municipales, pero para esta alternativa es necesaria su deshidratación previa. Además, se pueden utilizar para cubrir las células de rellenos sanitarios, mezclados con suelo natural o puro.

### **Incorporación en ladrillo cerámico**

En el 2004, se efectuó un estudio de laboratorio (en la Universidad Estatal de Londrina, Paraná) para la incorporación del lodo generado en la PTAP Passaúna (SANEPAR-Curitiba) para que este fuese incorporado en la producción de ladrillos cerámicos y de bloques huecos de concreto. La incorporación de lodos en la producción de estos productos básicos para la edificación tiene la ventaja de no generar pasivos ambientales y, si se hace de manera adecuada, conduce a una disposición final ambientalmente segura, ya que el lodo queda incorporado al material de construcción y este a las edificaciones.

La PTAP Passaúna está ubicada en Curitiba, Estado de Paraná y durante la época del estudio procesaba un caudal de 400 L/s, generando 15 m<sup>3</sup>/día de lodo desaguado en centrífuga, con un 22% de sólidos. Después de efectuar las pruebas de laboratorio requeridas, se determinaron los porcentajes más adecuados y se implementaron las mezclas de los lodos generados en la PTAP en la producción de ladrillos cerámicos, en algunas de las alfarerías de la región de la Cachimba, en Curitiba, Paraná. En esta

región, en esos tiempos, las alfarerías usaban dos tipos de material: una arcilla plástica, de granulometría fina y el suelo natural que en ese caso era un suelo arcilloso pero de plasticidad más baja, es decir, un suelo más bien siltoso. La arcilla generalmente era extraída de regiones sedimentarias cercanas a los ríos y se transportaba hasta las alfarerías, mientras que el suelo natural era obtenido en las proximidades de las fábricas. En la Tabla 6.1 se muestra la composición granulométrica de los materiales utilizados.

**Tabla 6.1** Composición granulométrica de los materiales usados en la producción de ladrillos cerámicos

Material	Fracción granulométrica (%)		
	Arcilla plástica	Arcilla local	Lodo PTAP Passaúna
Arcilla	43	38	10
Sílice	18	14	14
Arena fina	37	38	40
Arena media	2	10	35
Arena gruesa	0	0	1

Fuente: Autores

Este lodo posee un contenido mayor de arcilla, pero para este ensayo se utilizó lodo seco. Se observó que los agregados tenían grumos de arcillas en algunos casos, es decir, aunque el lodo contenía más arcilla, la fuerza eléctrica de cohesión inducida por el coagulante y el polielectrolito provocaba la formación de pequeños gránulos de mayor diámetro, lo que hace que el lodo presente un comportamiento mecánico más cercano a la arena.

En la Tabla 6.2 se muestran los datos de composición de los materiales utilizados en el experimento.

**Tabla 6.2** Datos de composición de los materiales usados en los experimentos, los metales se expresan en mg/kg de peso seco.

<b>Parámetro</b>	<b>Arcilla plástica</b>	<b>Arcilla local</b>	<b>Lodo generado en la PTAP Passaúna</b>
H <sub>2</sub> O (%)	40	26	80
pH	4,5	6,5	5,5
C <sub>r</sub>	5,2	38,0	7,7
Ni	1,4	10,1	2,4
Pb	17,7	26,0	37,2
Cd	0,7	1,6	64,8

<b>Parámetro</b>	<b>Arcilla plástica</b>	<b>Arcilla local</b>	<b>Lodo generado en la PTAP Passaúna</b>
Mn	6,3	28,2	464,8
Cu	5,1	7,1	311,1
Zn	3,1	5,7	615,6
Al	2.885,8	6.676,7	8.998,1

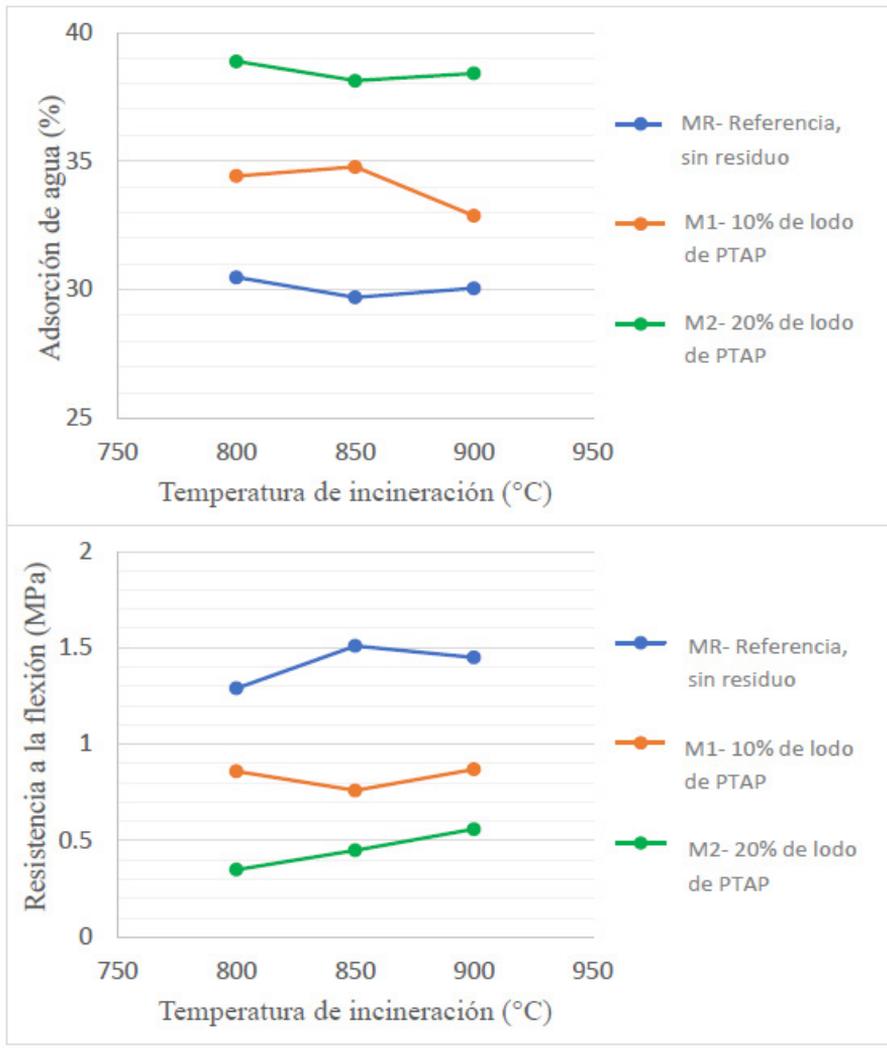
Fuente: Autores

Se observa que la composición del lodo generado en la PTAP Passaúna presentaba una composición compatible con los materiales que ya se utilizaban para la fabricación de ladrillos cerámicos, pero con mayor concentración de metales, ciertamente oriundos de los productos químicos utilizados en el tratamiento del agua bruta.

Las muestras fueron secadas en un invernadero, para después ser troceadas y molidas, hasta formar un polvo semejante al talco. Siguiendo el sistema de funcionamiento de las alfarerías locales, la proporción de materiales en la mezcla hecha fue de una porción de arcilla plástica por dos porciones de arcilla local. A esta mezcla básica se añadió entre el 10 y 20% de lodo generado en la PTAP, siendo la masa final dividida en porciones de prueba de 26 mm de ancho por 17 mm de espesor, con una longitud de 100 mm. Posteriormente, estas porciones fueron sometidas a secado en invernadero a una temperatura de 40 °C, durante 12 horas, para después elevar esa temperatura a 100 °C durante otras 12 horas. Después de

secas las muestras, la quema o cocción de estas se efectuó en muflas eléctricas, en las cuales se fue incrementando la temperatura a una velocidad de 125 °C por hora, alcanzando el nivel de incineración (entre 800, 850 y 900 °C) por 3 horas. Posteriormente, se dejaron enfriar las porciones, y se evaluó la absorción de agua que presentaban estas, así como el módulo de ruptura a la compresión de las mismas.

**Figura 6.1** Módulo de resistencia a la flexión de los cuerpos de prueba usados.



Fuente: Autores

El estudio exploratorio mostró que la adición de lodo, generado en la PTAP, a la masa para fabricar los ladrillos influye en la absorción de agua de estos y en su módulo de resistencia a la compresión, esto es, se elevó la absorción de agua y se disminuyó el módulo de resistencia de los mismos. Las pruebas complementarias mostraron que las adiciones de lodo proveniente de la PTAP en proporciones de hasta el 4% de la mezcla total, resultaron en ladrillos terminados con buenas características y que cumplen los requisitos y límites fijados por las normas brasileñas.

Los ladrillos cerámicos producidos se evaluaron en cuanto a la resistencia a la compresión de acuerdo con la Norma NBR 6461/83 (ladrillo cerámico para albañilería, verificación de la resistencia a la compresión). Durante los ensayos, se probaron 13 ladrillos cerámicos fabricados con cada tipo de mezcla, obteniéndose los valores medios de resistencia a la compresión. Los ladrillos que incluían lodo generado en la PTAP presentaron resistencia a la compresión ligeramente menor que los ladrillos hechos solo con el material usual, pero ambos lotes estaban dentro de los límites fijados por la norma.

Los ladrillos también fueron evaluados en pruebas de lixiviación y solubilización, de acuerdo con las normas NBR 10.005 y 10.006. Desde el punto de vista ambiental los resultados del análisis de líquidos lixiviados mostraron que no se trataba de residuos peligrosos (clase I), siendo clasificados como clase II, no inerte.

## **Cobertura de celdas de rellenos sanitarios**

La disposición inadecuada de residuos sólidos en el suelo es perjudicial para el medio ambiente, sobre todo por el potencial contaminante del lixiviado; con el fin de minimizar este impacto ambiental, las barreras impermeabilizantes están diseñadas para impedir la percolación de los líquidos generados. La impermeabilización de la base y de los muros laterales del relleno puede ser hecha por medio de geomembranas sintéticas adicionándoles capas de suelo con baja permeabilidad.

La codisposición de lodos generados en las PTAPs, mezclándolos con suelos como capas de impermeabilización de fondo, cobertura diaria y cobertura final de rellenos sanitarios, se muestra como una posibilidad interesante, frente a las demás alternativas de uso benéfico de este tipo de residuos no peligrosos y no inertes (clase II A) (ABNT, 2004). Una vez

respetados los parámetros geotécnicos predichos por Boscov (2008) (*i.e.* fracciones granulométricas adecuadas y de baja permeabilidad), la codisposición no implica la reducción de la vida útil del relleno sanitario, problema principal mencionado en cuanto a la disposición del lodo en estos lugares debido al gran volumen que ocupa.

Dos suelos de diferentes clases de textura fueron elegidos para simular su utilización en barreras impermeables de rellenos sanitarios. El suelo de carácter arcilloso fue recogido en la ciudad de Londrina, PR, mientras que el suelo arenoso fue recolectado en el municipio de Madaguaçu, PR.

El lodo utilizado fue recolectado en la PTAP de Cafezal, Londrina, PR, y procede de un tratamiento de ciclo completo que utiliza como coagulante el Cloruro Férrico Hexahidratado ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Por tratarse de un material tixotrópico con valor de humedad gravimétrica que sobrepasaba el 900%, fue necesario llevar a cabo el secado en lechos de drenaje, hasta alcanzar aproximadamente el 15%. Los lechos de drenaje (de 2,5 m de largo y 1,0 m de ancho) contenían como material de relleno una capa de 0,20 m de grava núm. 3, superpuesta por mantas de geotextil. Se pudo observar desde la formación de agregados hasta la transformación del lodo en un material granular (ver Figura 6.2).

**Figura 6.2** Transformación del lodo de PTAP del estado líquido a sólido.



Fuente: Teixeira et al., 2013.

En el presente trabajo se analizaron los resultados obtenidos en razón del carbono, Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de los dos suelos, y

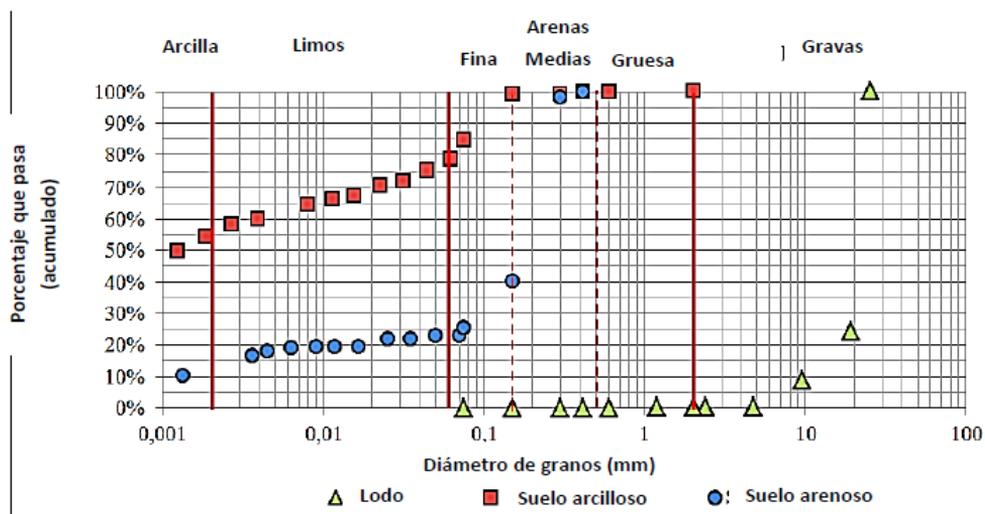
del lodo generado en la PTAP. Lo anterior, se presenta en la Tabla 6.3 y en la Figura 6.3.

**Tabla 6.3** Características físico-químicas de los suelos y del lodo generado en la PTAP utilizados en el estudio.

Caracterización	Material			
	Tipo de Suelo		Lodo de PTAP <sup>(3)</sup>	
	Arcilloso <sup>(1)</sup>	Arenoso <sup>(2)</sup>		
Física	Masa específica de los sólidos ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	3,03	2,69	2,75
	Límite líquido- LL (%)	52	31	NP <sup>(4)</sup>
	Límite de plasticidad - LP (%)	38	15	NP
	Índice de plasticidad (%)	14	16	NP
Química	pH (en KCl)	4,4	3,9	5,1
	C ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	4,77	ND <sup>(5)</sup>	18,35
	Materia orgánica ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	8,20	ND	31,56
	CIC ( $\text{cmolc}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	8,87	3,42	16,95

Notas: <sup>(1)</sup> Suelo Londrina, PR; <sup>(2)</sup> Suelo de Mandaguauçu, PR; <sup>(3)</sup> Lodo seco; <sup>(4)</sup> No plástico; <sup>(5)</sup> No detectable.

**Figura 6.3** Curva granulométrica, porcentajes y clasificación textural de los materiales estudiados



Característica	Tipo de Suelo		Lodo de PTAP(3)
	Arcilloso <sup>(1)</sup>	Arenoso <sup>(2)</sup>	
Arcilla (%)	55,50	13,00	0
Limos (%)	23,50	10,00	0
Arena Fina (%)	20,73	41,00	0,50
Arena Media (%)	0,27	36,00	2,00
Arena Gruesa (%)	0	0	2,50
Grava (%)	0	0	95,00
Clasificación Textural	Arcilla limosa	Arena fina a medio arcillosa	Grava arenosa

Fuente: Autores

Los lodos generados en la PTAP presentaron valores de carbono orgánico y materia orgánica considerablemente mayores que los que se hallaron en los dos tipos de suelo. Esta situación, de cierta forma, era esperada, ya que en el material de los lodos se encuentra la concentración de los elementos existentes en el suelo y, eventualmente, algas y bacterias que, junto con el agua, entran en el proceso de tratamiento. A pesar de ello, el contenido de materia orgánica encontrado en los lodos ( $31,56 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) es inferior a los contenidos encontrados en los residuos de rellenos sanitarios que, en el promedio nacional brasileño, van aproximadamente de 50 a  $55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Milanez, et al., 2012). De esta forma, el uso de la mezcla suelo-lodo, aparentemente, no acarrearía perjuicio ambiental. Cabe resaltar que, el CIC en el lodo es aproximadamente dos veces mayor que el del suelo arcilloso y más de cinco veces mayor que el del suelo arenoso. Lo cual contribuye a la retención de metales, siendo este un factor beneficioso para el sistema de relleno sanitario (Andreoli, et al., 2013).

Las proporciones suelo-lodo utilizadas fueron: 1:0,5 y 1:1 para el suelo arcilloso, y 1:0,25 para el suelo arenoso, medidas estas en cantidad de masa. La elección de proporciones para la mezcla de suelo arcilloso se dio porque estas representan aplicaciones prácticas en campo. Además, se consideró hacer la combinación con el lodo no deshidratado, solo después de la deshidratación del mismo en lechos de drenaje, con lo que el suelo arcilloso mejoró sus condiciones cohesivas y de compresibilidad, ya que hay predominio de partículas gruesas en el lodo y de partículas finas en el suelo, causando cierto grado de equilibrio en la distribución de los granos. Para el suelo arenoso se siguieron los mismos principios, pero

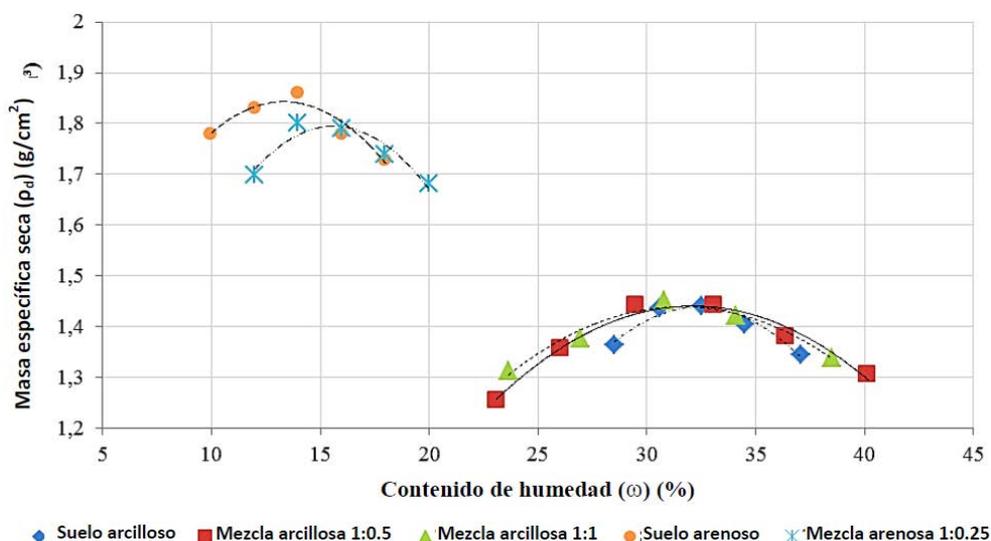
como este es un material con mayor granulometría natural, se optó por una menor proporción de lodo, nuevamente buscando un posible equilibrio en la distribución de granos en la composición final.

Para ambos suelos, y también para las mezclas suelo-lodo probadas, se llevaron a cabo ensayos de compactación usando el cilindro proctor con energía normal y reutilizando el suelo para la obtención de la curva de compactación (NBR 7182/1986). Con las curvas de compactación se obtuvieron las humedades óptimas ( $\omega_{\text{Óptima}}$ ) y las masas específicas secas máximas ( $\rho_{d \text{ Máxima}}$ ) para los suelos y para las mezclas.

Además, se efectuaron ensayos de permeabilidad, usando la prueba de permeabilidad con carga variable (NBR 14545/2000-método B), en muestras extraídas de los materiales (suelo y mezclas suelo-lodo) compactadas con humedad y masa específica seca, cerca de la  $\omega_{\text{Óptima}}$  y  $\rho_{d \text{ Máxima}}$ . Todos los ensayos de laboratorio se ejecutaron por vía seca, con grado de compactación mínimo definido en el 95% y desviación máxima del contenido de humedad de  $\pm 1\%$ .

Las curvas de compactación obtenidas en los ensayos en laboratorio se presentan en la Figura 6. 4.

**Figura 6.4** Curvas de compactación de los suelos y de las mezclas



Fuente: Autores

A partir de las curvas de compactación fue posible determinar los valores de  $\omega_{\text{óptima}}$  y  $\rho_{d \text{ Máxima}}$  para los suelos y para las mezclas, los cuales se presentan en la Tabla 6.4.

**Tabla 6.4** Valores de  $\omega$  óptima y  $\rho_d$  Máxima de los suelos y de las mezclas.

Tipo de suelo	$\omega$ Óptima (%)	$\rho_d$ Máxima (g/cm <sup>3</sup> )
Suelo arcilloso	32,4	1,43
Mezcla arcillosa 1:0,5	32,8	1,44
Mezcla arcillosa 1:1	31,8	1,45
Suelo arenoso	14,0	1,86
Mezcla arenosa 1:0,25	14,5	1,80

Fuente: Autores

Los resultados muestran que la humedad óptima ( $\omega_{\text{óptima}}$ ) y la masa específica seca ( $\rho_{d \text{ Máxima}}$ ), para el suelo arcilloso y para las mezclas que contenían este tipo de suelo fueron muy cercanas entre sí. Lo mismo se puede constatar para el suelo arenoso y su mezcla, pero en este caso se presentó una diferencia un poco en la humedad y un poco menor en la masa específica seca.

Los valores de los coeficientes de permeabilidad ( $k$ ) obtenidos de los ensayos de laboratorio, efectuados en el suelo, el lodo y las mezclas se describen en la Tabla 6.5.

**Tabla 6.5** Coeficientes de permeabilidad ( $k$ ) obtenidos en el laboratorio sobre los materiales utilizados.

Tipo de suelo	$k$ (m·s <sup>-1</sup> )
Suelo arcilloso	$1,0 \times 10^{-9}$
Mezcla arcillosa 1:0,5	$6,3 \times 10^{-10}$
Mezcla arcillosa 1:1	$3,1 \times 10^{-10}$
Suelo arenoso	$3,5 \times 10^{-9}$
Mezcla arenosa 1:0,25	$5,2 \times 10^{-9}$

Fuente: Autores

Se observa que en todos los materiales se presentó un coeficiente  $k$  en el

rango de  $10^{-10}$  y  $10^{-9}$   $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , mostrando una variación de hasta diez veces. Es importante señalar que tales valores encuadran en los valores referencia para materiales de baja permeabilidad, indicados para uso en obras de relleno sanitario (Bosco, 2008). Cabe destacar que la granulometría pedregosa del lodo no alteró significativamente la permeabilidad de los suelos a los que se añadió una vez que esta fue perceptiblemente reducida durante el proceso de compactación (se observó la quiebra de los terrones del lodo cuando se compactó).

Por lo tanto, se puede concluir que el incremento de lodo de PTAP en los suelos estudiados, después de compactación, se mostró viable, ya que los coeficientes de permeabilidad presentaron valores menores para los trazos con el suelo arcilloso y próximo al trazado con el suelo arenoso en comparación con los suelos compactados sin adición del lodo. Esto evidencia el potencial de las mezclas en la retención de infiltración y ratifica la indicación de la aplicación del lodo al suelo para la confección de las barreras impermeabilizantes. Además, la codisposición del lodo en sí se presenta como una ganancia para la gestión de este residuo, ya que, una vez observada su potencialidad, las PTAP de pequeño porte pueden utilizar tal técnica, minimizando el volumen de un residuo que podría destinarse al relleno sanitario, así como la eventual necesidad de implantación de tecnologías más costosas.

## **Disposición en rellenos sanitarios convencionales**

Para evaluar los efectos de lixiviación, simulando una posible situación de campo cuando el material está dispuesto en celdas de rellenos sanitarios o utilizado como cobertura de celdas en rellenos sanitarios, se realizaron ensayos en columnas de lixiviación en prototipos de escala reducida, con los lodos deshidratados tortas tipos A y B.

Las columnas fueron construidas usando tubos de PVC DN 100, con altura de 50 cm y diámetro de 10 cm; por otra parte, en la base se adaptó un accesorio con fondo recortado, más una rejilla y una manta geotextil (gramaje de  $150 \text{ gm}^{-2}$ ) para soporte de la capa de lodo; para la recolección del líquido infiltración fue adaptado un dispositivo de fondo cónico. Cada columna se llenó con un tipo de lodo hasta una altura de 30 cm, de acuerdo con la Figura 6.5.

**Figura 6.5** Esquema y foto del ensayo de lixiviación de los lodos tipos A y B



Fuente: Autores

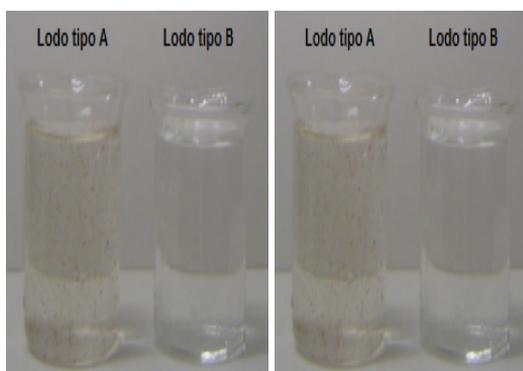
Según datos del Instituto Agronómico de Paraná (IAPAR 2019), la precipitación media anual de Londrina es de 1.610 mm, ocurriendo en promedio en 121 días del año. Con base en estos datos y en el área de los prototipos a escala reducida utilizados en esta prueba, se simuló una condición crítica de precipitación continua de  $3,5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  (equivalente a 50 veces el valor de la precipitación media anual de Londrina, PR), que se aplicó a través de 3 mangueras/prototipo, simulando una distribución más uniforme en el lodo por un período de 6 días.

La simulación de la precipitación fue efectuada con agua "ultrapura", y en forma simultánea, en las columnas con lodos tipos A y B a través de una bomba peristáltica previamente regulada para el caudal definido. Todo el líquido/lodo lixiviado de las columnas fue recogido diariamente en recipientes de 5 L, los cuales fueron almacenados de forma apropiada para, posteriormente, obtener de su contenido las muestras compuestas.

Los lodos deshidratados tipos A y B, utilizados en las columnas de lixiviación, presentaron un contenido de sólidos del 77,8% y 79,5%, respectivamente. Después de la lixiviación se observó una reducción del 4% en el contenido de sólidos de los lodos, ocasionada, seguramente, por la incorporación del agua en los materiales sólidos.

La Figura 6.6 muestra las fotos de las muestras compuestas de los líquidos que se han percolado de las columnas de lixiviación de los lodos tipos A y B.

**Figura 6.6** Fotografías de las muestras compuestas de los líquidos percolados de las columnas de lixiviación de las muestras que contenían lodos tipos A y B



Fuente: Autores

En la Tabla 6.6 se muestra la caracterización física, química y microbiológica de las muestras compuestas de los percolados de los lodos tipos A y B.

**Tabla 6.6** Caracterización de las muestras compuestas de los líquidos percolados de las columnas de lixiviación de los lodos tipos A y B

Parámetro	Muestra compuesta de líquido percolado en el lodo deshidratado tipo A	Muestra compuesta de líquido percolado en el lodo deshidratado tipo B	Valor límite clase I Resolución 357/2005
pH	5,5	5,1	6 - 9
Conductividad ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )	44,5	39,7	--
Turbidez (uT)	3,3	0,58	40

Parámetro	Muestra compuesta de líquido percolado en el lodo deshidratado tipo A	Muestra compuesta de líquido percolado en el lodo deshidratado tipo B	Valor límite clase I Resolución 357/2005
Color (uH)	89	6,67	Color natural
DBO <sub>5</sub> d, 20°C (mg·L <sup>-1</sup> )	2,9	2,9	3
DQO (mg·L <sup>-1</sup> )	54,84	27,59	--
Aluminio (mg·L <sup>-1</sup> )	0,12	0,05	0,1 *
Hierro (mg·L <sup>-1</sup> )	0,10	0,007	0,3 *
Cádmio (mg·L <sup>-1</sup> )	N.D	N.D	0,001
Cálcio (mg·L <sup>-1</sup> )	3,45	2,82	--
Plomo (mg·L <sup>-1</sup> )	N.D	N.D	0,01
Cobaltio (mg·L <sup>-1</sup> )	N.D	N.D	0,05
Cobre (mg·L <sup>-1</sup> )	0,04	0,03	0,009 *
Cromo (mg·L <sup>-1</sup> )	N.D	N.D	0,05
Fósforo (mg·L <sup>-1</sup> )	N.D	N.D	0,03
Magnésio (mg·L <sup>-1</sup> )	1,01	0,27	--
Manganeso (mg·L <sup>-1</sup> )	0,44	0,67	0,1
Níquel (mg·L <sup>-1</sup> )	N.D	N.D	0,025
Potásio (mg·L <sup>-1</sup> )	0,30	0,30	--
Silicio (mg·L <sup>-1</sup> )	5,42	1,07	--
Sódio (mg·L <sup>-1</sup> )	0,50	0,40	--
Titânio (mg·L <sup>-1</sup> )	0,007	0,003	--
Zinco (mg·L <sup>-1</sup> )	<L.Q	0,02	0,18

Nota: <L.Q, bajo el límite de cuantificación; ND, no detectado; \*valor límite no establecido por la Resolución 357/2005 del CONAMA para aguas dulces clase I; \* valor referente al compuesto en la forma disuelta.

El contacto del agua con los lodos deshidratados dispuestos en las columnas de lixiviación resultó en el incremento de algunos parámetros, especialmente de la conductividad por la presencia de sales y algunos metales, en especial el calcio, silicio y magnesio (no controlados por la Resolución 357/2005) y cobre y manganeso con concentraciones (de 0,04 y 0,44 mg L<sup>-1</sup> para el percolado en el lodo deshidratado tipo A y de 0,03 y 0,67 mg L<sup>-1</sup> para el tipo B) superiores a los valores limitados por dicha Resolución para aguas dulces clase I de 0,009 \* y 0,1 mg·L<sup>-1</sup>, respectiva-

mente. Sin embargo, se debe considerar que los metales analizados se refieren a la concentración total mientras que el valor limitado de cobre por la resolución corresponde a la fracción disuelta.

Además, suponiendo que después de la percolación el agua constituirá el lixiviado de relleno sanitario y que este será sometido al tratamiento para posteriormente ser arrojado en cuerpos receptores, habrá que ponderar el efecto de dilución en el río para obtener la concentración final después de la mezcla.

Para los metales Fe y Al, las concentraciones totales en las muestras compuestas resultaron inferiores a los valores limitados para las fracciones disueltas de  $0,1^*$  y  $0,3^*$   $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , respectivamente, indicando que los metales reactivos de la coagulación se eliminan eficientemente por desaguación y no están disponibles fácilmente a partir del contacto con el agua.

## Referencias

ABNT (1984a). *NBR 7181 - Análise Granulométrica*. Río de Janeiro: Asociación Brasileña de Normas Técnicas [Associação Brasileira de Normas Técnicas].

ABNT (1984b). *NBR 6508 - Determinação da Massa Específica dos Grãos*. Río de Janeiro: Asociación Brasileña de Normas Técnicas [Associação Brasileira de Normas Técnicas].

ABNT (1984c). *NBR 6459 - Determinação do Limite de Liquidez*. Río de Janeiro: Asociación Brasileña de Normas Técnicas [Associação Brasileira de Normas Técnicas].

ABNT (1984d). *NBR 7180 - Determinação do Limite de Plasticidade*. Río de Janeiro: Asociación Brasileña de Normas Técnicas [Associação Brasileira de Normas Técnicas].

ABNT (1986). *NBR 7182 - Solo: Ensaio de Compactação*. Río de Janeiro: Asociación Brasileña de Normas Técnicas [Associação Brasileira de Normas Técnicas].

ABNT (2000). *NBR 14545 - Solo: Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável*. Río de Janeiro: Asociación Brasileña de Normas Técnicas [Associação Brasileira de Normas Técnicas].

ABNT (2004). *NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação*. Río de Janeiro: Asociación Brasileña de Normas Técnicas [Associação Brasileira de Normas Técnicas].

- Andreoli, C. V., Motta, A. C. V., Fernandes, C. V. S. (2013). Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água. En: *Lodo de Estações de Tratamento de Água - Gestão e Perspectivas Tecnológicas*. cap. 2. pp. 68 -130. Curitiba, SANEPAR, 2013.
- Boskov, M. E.G. (2008). *Geotecnia ambiental*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Instituto Agronomico do Paraná. (2019). *ATLAS CLIMÁTICO DO ESTADO DO PARANÁ*. Londrina: IAPAR.
- Milanez, et al. (coord.). (2012). *Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos: relatório de pesquisa*. Brasília-DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, IPEA.
- Resolución CONAMA N° 357 de 2005. *NORMATIVA FEDERAL BRASIL*. Recuperada de <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>

## 6.2 DESTINO DE LOS BIOSÓLIDOS GENERADOS EN LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE (PTAP)

*Simone Bittencourt*

El lodo generado en los decantadores y el agua proveniente del lavado de filtros constituyen los principales residuos producidos en plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), con tecnología de ciclo completo. Estos residuos poseen características diversas, que dependen de los procesos adoptados en el tratamiento del agua y de la forma de recolección de los residuos. Los lodos provenientes de las PTAPs, usualmente contienen entre el 1 al 4% de sólidos totales; estos mismos, cuando se sitúan de forma inadecuada en el ambiente, pueden causar serios impactos negativos (Achon & Cordeiro, 2013).

Los lodos generados en las PTAPs, son clasificados como residuos sólidos (ABNT, 2004), se logran durante los procesos de transformación del agua cruda, captada principalmente en ríos y reservorios, en agua potable para consumo humano. Este residuo está compuesto por sustancias sólidas, orgánicas e inorgánicas, procedentes del agua cruda, así como de los coagulantes y los floculantes utilizados en el tratamiento.

Periódicamente, los lodos generados en las PTAPs deben ser removidos del sistema para garantizar la eficiencia del tratamiento de agua que, en general, abarca los siguientes procesos: coagulación, floculación, decantación y filtración. Actualmente, uno de los desafíos para las empresas de saneamiento es implementar alternativas adecuadas para el destino final de estos residuos, vigilando los aspectos: económico, técnico y ambiental.

Las mejores prácticas de gestión (en inglés, *Best Management Practices*, BMP) relacionadas con las PTAPs, incluyen el proceso de captación y tratamiento del agua (tanto en la prevención de la contaminación en la fuente como la reducción de la generación de residuos), tratamiento eficiente de los residuos, disposición de residuos en los suelos y prácticas para minimizar los posibles impactos acuáticos de la descarga de aguas residuales generadas en las PTAPs, tales como las aguas de lavado de filtros (USEPA, 2011).

Además del ejemplo de la descarga de las aguas provenientes del lavado de filtros en cuerpos de agua superficiales, existen también las opciones de disposición final de los lodos de las PTAPs en forma líquida en lagunas de

residuos, inyección bajo la superficie del suelo (ver Figura 6.7) y Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), siendo que para cualquiera de ellos es necesario establecer límites de cantidad y calidad (Mutter & Tokarz, 2015). En la forma sólida los lodos pueden ser dispuestos en rellenos sanitarios, utilizados en compostaje u otros usos beneficiosos como la aplicación en suelo para fines agrícolas o recuperación de áreas degradadas.

**Figura 6.7** Aplicación de lodo de las PTAP con contenido de sólidos de 2 a 4% en suelo.



Fuente. Mutter y Tokarz (2015).

## Contexto mundial

En los EUA, con base en las *BMP*, se busca reducir el vertido de residuos de las PTAPs en aguas superficiales y en las depuradoras de aguas residuales, fomentando la aplicación en los suelos, la disposición en rellenos sanitarios o la inyección en pozos profundos. Una encuesta efectuada en 2006, mostró que el 70% de las PTAPs observan uno o más métodos como son: reciclaje, evaporación, compostaje, deposición en relleno sanitario, riego por pulverización, inyección subterránea y aplicación en suelos, para reducir las descargas en aguas superficiales o en las PTARs. Tanto los lodos provenientes del proceso de precipitación con cal como del proceso de coagulación y decantación se aplican en suelos. Esta aplicación dependerá del cultivo, de la química del suelo y de las propiedades intrínsecas de los lodos. Los lodos generados en la precipitación con cal pueden ser utilizados en los terrenos agrícolas, en sustitución de productos comercia-

les para neutralizar el pH del suelo. Por otro lado, los lodos provenientes de procesos de coagulación que utilizan aluminio, no benefician el suelo y se utilizan solo como material de relleno. Sin embargo, dependiendo de las características de los lodos, pueden existir desventajas en la aplicación en suelos, como, por ejemplo, el aumento de la concentración de metales en ellos (y posiblemente en las aguas subterráneas) (USEPA, 2011).

Entre las opciones de disposición final utilizadas en Dinamarca, se encuentran: la deposición en terrenos, la reutilización en plantas de biogás para controlar el sulfuro, el vertido en las PTARs y la aplicación en zonas agrícolas (Sharma, Thornberg & Andersen, 2013).

En Japón, una de las alternativas para las cenizas generadas en la incineración de lodos producidos en las PTAPs es la fabricación de artefactos de hormigón y ladrillos, así como para el acondicionamiento de suelos (Kawamura & Trussell, 1991).

De esta forma, son diversas las alternativas de destino final adoptadas a nivel mundial, que incluyen el uso en siderurgia, agricultura, control de eutrofización, cobertura de rellenos sanitarios, fabricación de cemento, revestimientos cerámicos, objetos de cerámica y recuperación de áreas degradadas.

## **Alternativas de destino final de lodos generados en las PTAPs**

A continuación se presentan algunas de las alternativas de disposición final del lodo generado en las PTAPs, las cuales se adoptan mediante el análisis de la viabilidad: técnica, económica y ambiental.

### **Descarga en cuerpos hídricos superficiales**

Diversos países mantienen la práctica de verter el lodo de las PTAPs en cuerpos hídricos superficiales. Una de las justificaciones para esta práctica es que los componentes del lodo forman parte de la composición del agua del río del que fue captada y, por lo tanto, ese material está siendo devuelto a su origen. Sin embargo, es importante considerar que, además del material constituyente del agua cruda, los lodos generados en las PTAPs también contienen productos químicos utilizados en el proceso de tratamiento y que la captación de agua para consumo reduce el caudal del río aguas abajo, en consecuencia, el vertido del residuo puede interferir en la calidad del agua.

El vertido de residuos de las PTAPs puede causar degradaciones en el cuerpo receptor, afectando condiciones estéticas, físicas y químicas. Debido a este hecho, se han elaborado regulaciones para restringir e incluso prohibir la disposición final de esos lodos en los cuerpos de agua. En los EUA se permite la descarga directa de residuos procedentes de la filtración en las aguas superficiales. Las *BMP* para este tipo de descarga, de acuerdo a la USEPA (2011) incluyen:

- Limitación de los volúmenes de descarga. Se recomiendan las descargas efectuadas de forma lenta y continua, en lugar de descargas de golpe o instantáneas por lotes. El vertido lento permite la dilución y minimiza los impactos de la descarga de contaminantes.
- Prohibición de vertidos de residuos sólidos, a menos que las opciones de disposición en relleno sanitario o aplicación en suelo no sean viables, y/o mediante la comprobación de que la descarga no degrada la calidad del cuerpo de agua receptor.

## **Disposición de los lodos de las PTAPs en las plantas de tratamiento de aguas residuales**

El vertido de lodos generados en las PTAPs en las PTARs, es un método comúnmente utilizado en Europa y EUA; sin embargo, según el Instituto de Ingeniería de São Paulo (IE, SP, 2008), estos vertidos no son la forma adecuada de disposición, ya que los lodos generados en las PTAPs, por ser predominantemente inorgánicos, no se degradan en la depuradora y, por lo tanto, solo se transfieren, debiendo ser dispuestos con los lodos generados normalmente por las PTARs.

En el caso de esta forma de destino final, es necesario considerar que el vertido dependerá de la cantidad de lodo a agregar, las características del tipo de tratamiento de aguas residuales y la forma de disposición final del lodo producido por las PTARs. Así, para cada situación se debe efectuar un análisis cuidadoso, considerando, por ejemplo, las recomendaciones que hace el IE, SP, (2008), que son las que siguen:

- aumentar la cantidad de sólidos puede acarrear problemas de desempeño en la depuradora y aumentar los costos de tratamiento y disposición final de los lodos;

- en un sistema convencional de lodos activados, puede resultar en problemas para que se efectúe la digestión del lodo;
- en el sistema de lodos activados de aireación prolongada, dependiendo de la cantidad de lodo generado en las PTAPs agregada, la fase líquida puede ser impactada;
- en las lagunas aireadas y las lagunas de estabilización, la descarga puede resultar en la reducción del tiempo entre limpiezas de las lagunas de decantación, y
- en reactores anaeróbicos, el impacto se ocasionará debido a la toxicidad de los lodos (e.g. contenido de aluminio) y aumentará el número y volúmenes de extracciones de lodos del sistema.

Algunas investigaciones demuestran que la utilización de lodos generados en las PTAPs en el mejoramiento de los efluentes de las lagunas de estabilización (Soares, 2013) y para la remoción de P del efluente final (Chao, 2006) pueden ser alternativas para la disposición de estos residuos, auxiliando en la remoción de parámetros de interés de calidad de las AR tratadas. Sin embargo, la remoción de P depende de aspectos como: el tiempo de permanencia del lodo en el decantador de las PTAPs, la especie química de fósforo presente en el AR (e.g. orgánico,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HPO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ); la presencia de polímero; del pH y del tiempo de contacto (IE, SP, 2008).

Debido al hecho de que los lodos provenientes de las PTAPs fueron clasificados como residuos industriales, en el estado de São Paulo existe el impedimento legal para el vertido de esos subproductos en el sistema público de alcantarillado (São Paulo, 2006).

## **Disposición de lodos generados en las PTAPs en los rellenos sanitarios**

La disposición de lodos producidos por las PTAPs puede realizarse en un relleno exclusivo para el caso o en rellenos de residuos urbanos. Sin embargo, en este último caso, se debe efectuar una disposición controlada, pues el lodo generado en las PTAPs puede infiltrarse por los espacios vacíos de los residuos sólidos locales y colmatar los drenajes. En los rellenos sanitarios, cuando están debidamente deshidratados, los lodos generados en las PTAPs pueden ser utilizados como cobertura diaria de la capa depositada con suelos.

Se recomienda tener siempre como alternativa de emergencia a los rellenos como la disposición final de los lodos generados en la PTAP, aun cuando haya otra forma de destino prioritario, a fin de evitar la pérdida de control en situaciones de variaciones bruscas en la cantidad o calidad de los lodos u otro tipo de situación imprevista en la planta (Januario & Ferreira, 2007).

## **Lodo de PTAP en la producción de materiales de construcción civil y de artefactos cerámicos**

Entre las alternativas de disposición final se tiene la producción o incorporación en materiales de construcción civil. Los lodos generados en las PTAPs poseen características mineralógicas similares a las de la arcilla, por lo que pueden ser utilizados como materia prima en la fabricación de materiales cerámicos, como ladrillo común o macizo, ladrillo perforado y tejas, entre otros. Esta es una alternativa de disposición final sostenible que puede disminuir significativamente la cantidad de materia prima en la fabricación de estos productos, aumentando la vida útil de los yacimientos o minas de materias primas. Según el IE, SP (2008), el sector de producción de cerámica brasileño tiene condiciones adecuadas para absorber el lodo generado en todas las PTAPs, aunque solo pueden ser incorporados un 10% en cantidad de masa, con relación a la cantidad de arcilla que utilizan.

Sin embargo, es necesario verificar si el ladrillo producido cumple con las exigencias de las normas técnicas vigentes. El estudio desarrollado por Porras, Isaac y Morita (2008), sobre la evaluación de la utilización de lodos producidos en los decantadores de las PTAPs de Campinas, São Paulo, junto con los agregados provenientes del reciclado de residuos de la construcción civil del municipio, mostraron que la humedad del lodo influyó significativamente en la calidad de los ladrillos estabilizados con cemento. El estudio demostró que la fabricación del producto es posible con un contenido de humedad inferior al 50% y que ningún ladrillo producido en las condiciones estudiadas cumplió con las normas brasileñas de calidad (e.g. dimensiones, absorción de agua y resistencia a la compresión).

Los estudios a escalas de laboratorio y piloto han demostrado que es técnicamente viable la incorporación de hasta el 8% de lodos generados en las PTAPs (porcentaje en relación con la cantidad de masa de arena) en la producción de hormigón (IE /SP, 2008). El hormigón con lodo generado en PTAP añadido, puede ser utilizado en aplicaciones no estructurales, alcanzando los parámetros exigidos para el desempeño mecánico y a la durabilidad, como son: la construcción de contrapisos, morteros para

asentamiento de componentes, y la fabricación de bloques de concreto para uso no estructural, además de otras aplicaciones que no requieran resistencias elevadas.

## **Aplicación directa en los suelos**

La aplicación controlada del lodo generado en las PTAPs directamente en los suelos es una alternativa que se está extendiendo (Bittencourt, et al., 2012, Motta, et al., 2013), ya que los compuestos que en mayor proporción se encuentran en estos lodos, es decir, los óxidos e hidróxidos de aluminio y hierro, arcillas limosas y la materia orgánica, son constituyentes de los suelos mismos. Sin embargo, para que esta práctica sea considerada una alternativa viable, es necesario comprobar que no se causarán impactos negativos en los suelos receptores.

Entre los beneficios de la aplicación de los lodos generados en las PTAPs, directamente en los suelos, está la disminución de la disponibilidad de fósforo (P) en suelos donde hay elevada disponibilidad de ese nutriente, debido principalmente al excesivo uso de materiales ricos en P (como la gallinaza proveniente de la cría de pollos y otros abonos orgánicos). Como efecto negativo, se puede tener un aumento en la capacidad de adsorción de P del suelo, pudiendo resultar en una menor disponibilidad de este nutriente para las plantas (Ippolito, et al., 2011). En la aplicación de lodo generados en las PTAPs en los suelos, también es importante tener en cuenta que en algunos casos se pueden presentar elevadas concentraciones de contaminantes removidos en el proceso de potabilización del agua cruda, por lo tanto, es importante caracterizar estos subproductos en cuanto a su potencial de contaminación (North East Biosolids y Residuals Association, 2017).

Existe una preocupación por la aplicación directa en los suelos de lodos generados en las PTAPs proveniente de los procesos de coagulación con aluminio (Al), debido a la fitotoxicidad que esta sustancia puede causar cuando el pH en el suelo es bajo ( $\text{pH} < 5$ ); sin embargo, el contenido de aluminio en los suelos es alto de forma natural. El aluminio, junto con la Sílice, son compuestos primarios de suelos (i.e. la corteza terrestre contiene cerca del 7% de Al global); por lo tanto, la adición de más aluminio, mediante la aplicación de este tipo de lodos, resulta en un aumento poco significativo en la concentración de este elemento en los suelos, no representando riesgo para las plantas o para el ambiente, siempre que la tasa

de aplicación del lodo sea moderada y controlada y, adicionalmente, el pH del suelo se mantenga en un nivel agronómico apropiado (North East Biosolids y Residuals Association, 2017). Es importante considerar que el control de pH del suelo es primordial para la producción agrícola, de esta forma, en el caso de suelos ácidos, condición que solubiliza el aluminio, es necesaria la corrección de acidez mediante la aplicación de productos alcalinos, como es la cal.

En el Distrito Federal de Brasil, desde marzo de 1997, el lodo de la PTAP del Río Descoberto (que es coagulado con sulfato de aluminio férrico) es centrifugado y utilizado en la recuperación de áreas degradadas (Barbosa, 1997). En un estudio de estas áreas degradadas, Moreira, et al. (2009) verificaron que la aplicación del lodo en suelos degradados promovió la inmovilización del aluminio intercambiable y del plomo (Pb) que antes de la aplicación estaban disponibles en los suelos, así como incrementó la transferencia de nutrientes a los horizontes más profundos del suelo, permitiendo la mejor fijación de la vegetación. Según Moreira et al. (2011), los lodos generados en las PTAPs pueden ser considerados como residuos no inertes y compatibles con el uso para la recuperación de áreas degradadas en regiones con características geológicas e hidroquímicas similares a las del área donde el estudio fue ejecutado.

La utilización de los lodos generados en las PTAPs en la recuperación de áreas degradadas puede ser optimizada mediante la aplicación simultánea de un residuo orgánico (Teixeira, Melo & Silva, 2005) como es el lodo generado en PTARs, el cual es considerado un material de alto potencial agronómico, rico en materia orgánica y nutrientes, como nitrógeno y fósforo (Pedroza, et al., 2006, Tamanini, et al., 2008). El lodo proveniente del saneamiento de AR, cuando es higienizado mediante procesos alcalinos, tiene, además, un potencial correctivo para la acidez del suelo (Serrat, et al., 2011).

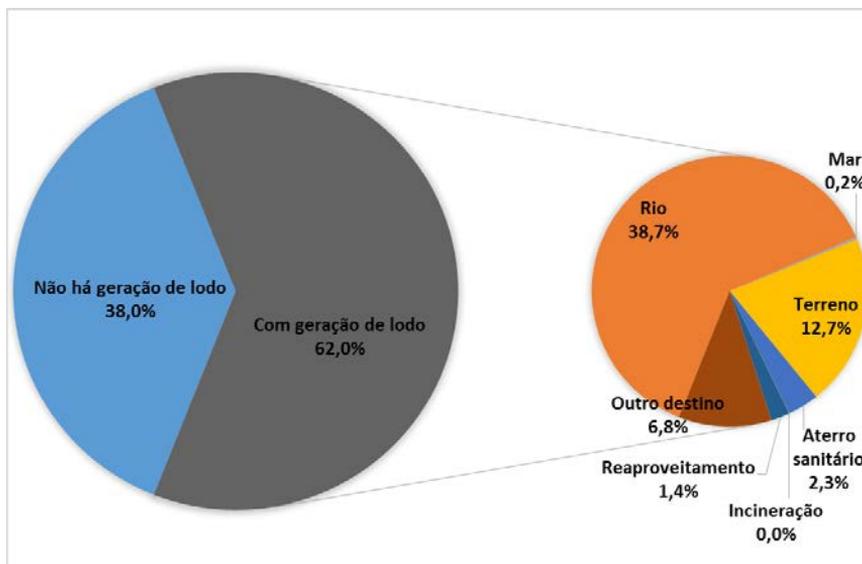
Las experiencias de la aplicación de lodos generados en las PTAPs, con y sin lodo de PTAR agregado (ambos generados en la Región Metropolitana de Curitiba (RMC), Paraná) en suelos degradados, demuestran que esta aplicación no tuvo influencia en el desarrollo vegetal del millo ni alteró las características de los suelos. En cuanto a las variables evaluadas, se observó que la aplicación de lodos generados en las PTAPs no presentó potencial de mejora en las propiedades de fertilidad del suelo (Bittencourt, et al., 2012). En este estudio, la aplicación de lodos provenientes de las PTARs (higienizados por proceso alcalino) neutralizó el aluminio y

alteró tanto el pH como el porcentaje de: Ca, H<sup>+</sup>Al, C, P y V en el suelo. En un estudio similar, también efectuado en la RMC, la aplicación del lodo generado en las PTAPs con dosificación de 170 t·ha<sup>-1</sup> de sólidos totales, tuvo una pequeña influencia en las propiedades químicas y físicas del suelo, y sobre el crecimiento y la nutrición de las plantas, sugiriendo que su disposición puede ser efectuada en áreas degradadas y, eventualmente, también en áreas no degradadas. Los resultados experimentales indicaron que el lodo proveniente de las PTAPs no influyó en el pH y bases intercambiables, considerando un suelo con pH elevado. Así mismo, al analizar las características físicas de suelo, se notó una disminución de la densidad y el aumento de la macroporosidad del suelo (Motta, et al., 2013). Es importante señalar que los resultados de la aplicación de lodos en los suelos, además de las características encontradas en los suelos, también son dependientes de las características de los lodos generados en las PTAPs, las cuales están directamente relacionadas con la composición del agua bruta afluyente a la PTAP y al proceso de tratamiento adoptado.

## **Contexto brasileño**

En Brasil, en el 2008, de un total 5.564 municipios, el 62% produjo lodos generados en PTAPs. El principal destino de los lodos generados (38,7%) fue el vertido en cuerpos de agua superficial, ver Figura 6.8 (IBGE, 2010). Es importante resaltar que en un municipio se pueden dar más de un destino final de los lodos generados.

**Figura 6.8** Porcentaje de municipios con generación de lodos en el proceso de purificación del agua y por destinos finales de los lodos generados en el 2008.



Fuente. IBGE, 2010.

La reinerte, según la norma brasileña NBR 10004 (ABNT, 2004), por no presentar inflamabilidad, corrosividad, reactividad, toxicidad y patogenicidad, y por poder tener propiedades como biodegradabilidad o solubilidad en el agua.

En los casos de vertido en cuerpos de agua, el lodo generado en las PTAPs es derramado sin pasar por ningún tratamiento previo, muchas veces en desacuerdo con los estándares ambientales establecidos, hecho que acaba ocasionando impactos ambientales, como azolvamiento y deterioro de la calidad del agua. Uno de los factores que llevan a las PTAPs a no respetar las legislaciones, son los elevados costos involucrados en el proceso de implantación de sistemas de tratamiento de estos residuos (Scalize, 2003), ya que para la mayor parte de los destinos finales de este subproducto es necesario que los lodos generados en las PTAPs pasen por un proceso de deshidratación.

## Destinación final de lodo generado en las PTAPs del estado de Paraná

El estado de Paraná posee 399 municipios, de los cuales la Compañía de Saneamiento del Paraná (SANEPAR) actúa en 345 con sistemas de abastecimiento de agua (ver Figura 6.17). La empresa opera 170 PTAPs, 1.027 pozos artesianos y 4 represas para el abastecimiento público, atendiendo al 100% de la población urbana con suministro de agua potable (SANEPAR, 2015). En el año 2015, la estimación de generación de lodos de las PTAPs del estado fue de 18.909 t/año<sup>-1</sup> de materia seca, siendo la RMC responsable por aproximadamente el 35% de ese total.

En el Paraná (ver figura 6.9), los lodos generados en las PTAPs son considerados residuos sólidos (PARANÁ, 1999, PARANÁ, 2002, PARANÁ, 2016). El Decreto 6.674 (PARANÁ, 2002) define lodo como el material sólido o semi-sólido, con alto contenido de humedad, generado por procesos físicos, químicos y biológicos en sistemas de tratamiento de efluentes líquidos o tratamiento de agua.

**Figura 6.9** Ubicación del Estado de Paraná



Fuente. SANEPAR, 2017.

La Ley 12.493 - Política Estatal de Residuos Sólidos (PARANÁ, 1999) establece que en el territorio del Estado están prohibidas los siguientes destinos finales para los residuos sólidos:

I- Lanzamiento "in natura" a cielo abierto, tanto en áreas urbanas como rurales;

II- Quema a cielo abierto;

III- Lanzamiento en cuerpos de agua, manglares, terrenos baldíos, redes públicas, pozos y cacimbas, aunque abandonados;

IV- Lanzamiento en redes de drenaje de aguas pluviales, de alcantarillados sanitarios, de electricidad, y de teléfono.

Como medidas para minimizar la generación de lodo en Paraná, se ha promovido un aumento en el uso de aguas subterráneas como manantiales de abastecimiento, la adopción de sistema de desarenador y / o pre-decantación para disminuir la cantidad de sólidos en la entrada del sistema, además, el uso de coagulantes más eficientes libres de contaminantes (Andreoli, et al., 2013).

Entre las alternativas de disposición final del lodo de PTAP adoptadas en el estado están: el lanzamiento en cuerpo de agua superficial, la disposición en lagunas de lodos ubicadas en el área de PTAP, la disposición en rellenos sanitarios licenciados, el lanzamiento en red colectora de alcantarillado sanitario y el uso para recuperación de áreas degradadas. En el proceso de tratamiento del lodo, las principales técnicas de secado son el espesamiento y la centrifugación.

En el pasado una de las alternativas utilizadas para destinar el lodo generado en la RMC fue para la fabricación de ladrillos, en alfarerías licenciadas por el órgano ambiental. La relación entre arcilla y lodo era definida por un criterio operacional de la propia alfarería, siendo adoptada una proporción de cerca del 5% de lodo al 95% de arcilla y el ladrillo producido pasaba por monitoreo de calidad. Actualmente, esta alternativa fue sustituida por el uso en recuperación de cavas resultantes de la minería de arena, de menor costo. En este destino final, el lodo se deposita en celdas (ver figura 6.10) que, cuando se llenan, se cubren con una capa de suelo para la regeneración natural de la vegetación y consigo la recomposición del paisaje. El proceso de recuperación del área es licenciado por la entidad ambiental estatal que recibe informes periódicos de la calidad del agua subterránea, proveniente de pozos de monitoreo localizados en el local.

**Figura 6.10** Recuperación de área de cava de minería de arena con lodo de estación de tratamiento de agua, Región Metropolitana de Curitiba



## Referencias

- Achon, C.L., & Cordeiro, J.S. (24 de maio de 2013). Riscos da destinação de lodos de ETAs - Leis 9.605/1998 e 12.305/2010. In *XVII Exposição de Experiências Municipais em Saneamento. 43º Assembléia nacional do ASSEMAE*. Vitória, ES, Brasil: VII-28.
- Andreoli, C. V., Zaperlon, A., Bertoldi, B., & Carneiro, C. (2013) A problemática da geração e disposição de lodo de ETA. In Charles Carneiro, Cleverson V. y Andreoli. (Org.). *Lodo de estações de tratamento de água - Gestão e perceptivas tecnológicas* (v. 1, pp. 442-480). Curitiba: Thinks.
- ABNT (2004). NBR 10.004: Resíduos sólidos - Classificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Barbosa, A.B.D. (1997). A experiência da CAESB em recuperação de água de lavagem de filtros e desidratação de lodo de ETA. In *19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Anais*. Foz do Iguaçu (PR): ABES. CD-ROM.

- Bittencourt, S., Serrat, B. M., Aisse, M. M., Marin, L. M. K. DE S., & Simão, C. C. (Julião setembro 2012). Aplicação de lodos de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto em solo degradado. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 17(3), 315-324.
- Chao, R.S. (2006). *Remoção de fósforo de efluentes de estações de tratamento biológico de esgotos utilizando lodo de estação de tratamento de água*. (Mestrado Escola Politécnica Engenharia Hidráulica). São Paulo.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2008*. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro: IBGE.
- Instituto de Engenharia de São Paulo (IE/SP). (2008). Relatório de conclusões do Seminário Nacional sobre Tratamento, Disposição e Usos Benéficos de Lodos de Estações de Tratamento de Água. In *Seminário nacional sobre tratamento, disposição e usos benéficos de lodos de estações de tratamento de água*. São Paulo, IE,
- Ippolito, J. A., Barbarick, K. A., & Elliott, H. A. (January - February 2011). Drinking water treatment residuals: a review of recent uses. *Journal of Environmental Quality*, 40.
- Januário, G. F., & Ferreira Filho, S. S. (2007). Planejamento e aspectos ambientais envolvidos na disposição final de lodos das estações de tratamento de água da região metropolitana de São Paulo. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 12(2), 117-126.
- Kawamura, S., & Trussell, R. R. (junio 1991). Main features of large water treatment plants in Japan. *Journal American Water Works Association*, 83(6), 56-62.
- Moreira, R.C.A., Boaventura, G.R., Nunes, S.A., Plnheiro, L.A., Nascimento, C. T. C., Silva, D.R., & Lira, C.P. (2011). Geochemical and geophysical study in a degraded area used for disposal of sludge from a water treatment plant. *Applied and Environmental Soil Science*, 1-13.
- Moreira, R.C.A., Guimarães, E.M., Boaventura, G.R., Momesso, A. M., & Lima, G.L. (2009). Estudo geoquímico da disposição de lodo de estação de tratamento de água em área degradada. *Química Nova*, 32(89), 2085-2093.
- Motta, A. C. V., Dalpisol, M., Simon, P. L., Serrat, B. M., Bittencourt, S., Carneiro, C., & Andreoli, C. V. (2013) Disposição do lodo de estação de tratamento de água em área degradada. In Charles Carneiro, Cleverson V. y Andreoli. (Org.). (2013). *Lodo de estações de tratamento de água - Gestão e percepções tecnológicas* (v. 1, pp. 442-480). Curitiba: Thinks.

- Mutter, R., & Tokarz, B. (2015). Water treatment plant residuals management case studies. *Operators Conference*. AWWA, Virginia. Recovered from <<http://www.vaawwa.org/file/Committees/Plant%20Operations/2015%20Plant%20Ops%20Water%20Treatment%20Plant%20Residuals.pdf>>
- North East Biosolids y Residuals Association. (2017). *Water treatment residuals (hydrosolids)*. Recovered from <<https://www.nebiosolids.org/water-treatment-residuals/>>
- PARANÁ. (1999) Lei N° 12.493, de 22 de janeiro de 1999. Estabelece princípios, procedimentos, normas e critérios referentes a geração, acondicionamento, armazenamento, coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos no Estado do Paraná, visando controle da poluição, da contaminação e a minimização de seus impactos ambientais e adota outras providências, 1999.
- PARANÁ. (2002) Decreto N° 6.674, de 03 de dezembro de 2002. Regula a Lei N° 12.493, de 22 de janeiro de 1999, 2002.
- PARANÁ (2016) Portaria IAP n° 202 de 26/10/2016 Publicação: 28 out 2016 Estabelece os critérios para exigência e emissão de Autorizações Ambientais para as Atividades de Gerenciamento de Resíduos Sólidos.
- Pedroza, J. P., HAandel, A. C., Beltrão, N. E. M., Dionísio, J. A., & Duarte, M.E.M. (2006). Qualidade tecnológica da pluma do algodoeiro herbáceo cultivado com biossólidos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10(3), 586-592.
- Porras; Á. C., Isaac, R. de L. y Morita, D. M. (diciembre 2008). Incorporação do lodo das estações de tratamento de água e agregado reciclado de resíduo da construção civil em elementos de alvenaria - tijolos estabilizados com cimento. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 18-2, 5-28.
- SÃO PAULO. (2006) Lei N° 12.300, de 16 de março de 2006. Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos e define princípios e diretrizes, 2006.
- SANEPAR (2015). *Relatório de Administração e de Sustentabilidade: Demonstrações Contábeis*. Curitiba: Companhia de Saneamento do Paraná. Recovered from <[http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/investidores\\_rel\\_ian\\_dfp\\_itr/ian-dfp-itr/rel\\_Relat%C3%B3rios%20Trimestrais2015-12-31\\_0.pdf](http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/investidores_rel_ian_dfp_itr/ian-dfp-itr/rel_Relat%C3%B3rios%20Trimestrais2015-12-31_0.pdf)>. Acesso em: 24/08/2016.
- Scalize, P. S. (2003). *Disposição de resíduos gerados em uma estação de tratamento de água em estações de tratamento de esgoto*. (Tese Doutorado em Hidráulica e Saneamento. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos.

- Serrat, B.M., Santiago, T.R., Bittencourt, S., Motta, A.C.V., Silva, L. A. T. P., & Andreoli C.V. (2011). Taxa de aplicação máxima anual de lodo de esgoto higienizado pelo processo de estabilização alcalina: estudo comparativo de curvas de pH de solos. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 19, 30-37.
- Sharma, A. K., Thornberg, D., & Andersen, H. R. J. (2013). Application of waterworks sludge in wastewater treatment plants. *Environmental Science & Technology*, 10, 1157-1166. Doi 10.1007/s13762-013-0191-6
- Soares, L. A. (2013). *Utilização de resíduo de ETA no tratamento de efluente de lagoas de estabilização* (Dissertação Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente). Universidade Federal de Goiás. Goiânia.
- Tamanini, C. R., Motta, A. C. V., Andreoli, C. V., & Doetzer, B. H. (2008). Land reclamation recovery with the sewage sludge use. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, (51)4, 643-655.
- Teixeira, S. T., Melo, W. J., & Silva, E. T. (2005). Aplicação de lodo da estação de tratamento de água em solo degradado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40(1), 91-94.
- USEPA (2011). *Drinking Water Treatment Plant Residuals Management. Technical Report. EPA 820-R-11-003. Summary of Residuals Generation, Treatment, and Disposal at Large Community Water Systems*. United States Environmental Protection Agency.



Este libro se terminó de imprimir  
en el mes de diciembre de 2020  
en Búhos Editores LTDA.