



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 m³/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.

Parámetro	Arcilla plástica	Arcilla local	Lodo generado en la PTAP Passaúna
H ₂ O (%)	40	26	80
pH	4,5	6,5	5,5
C _r	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

Parámetro	Arcilla plástica	Arcilla local	Lodo generado en la PTAP Passaúna
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

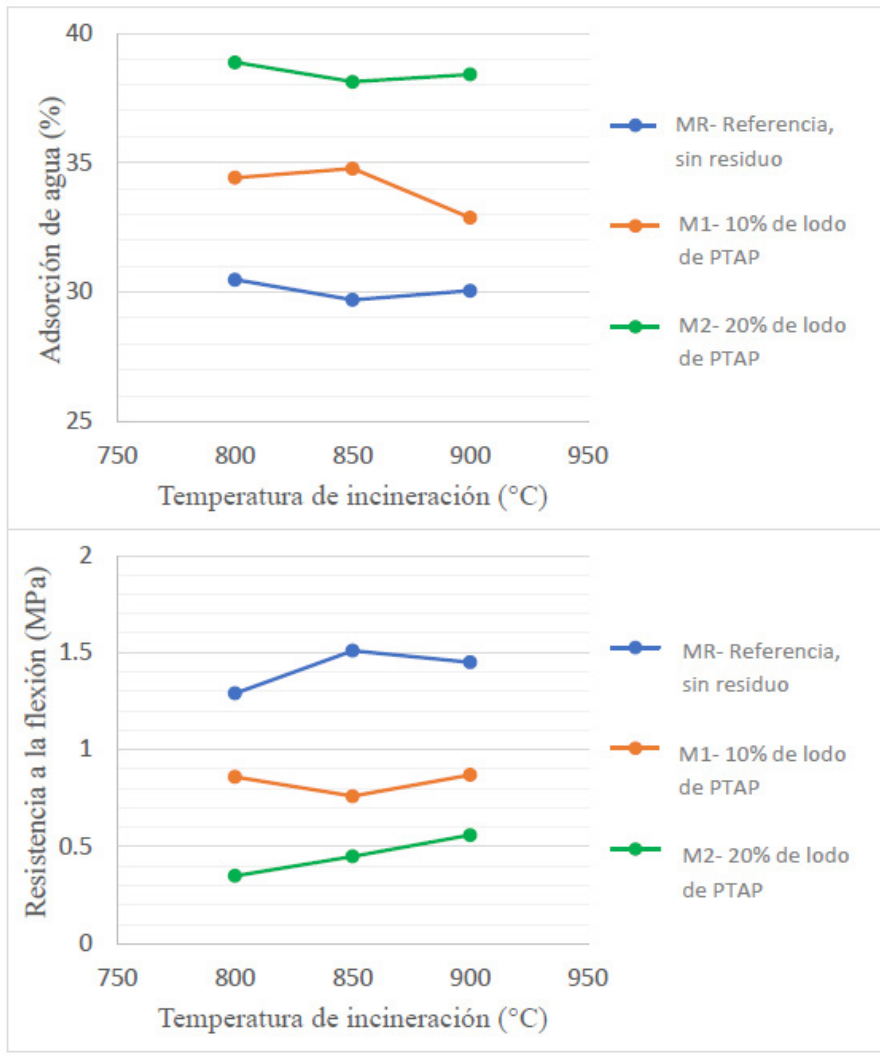
Fuente: Autores

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

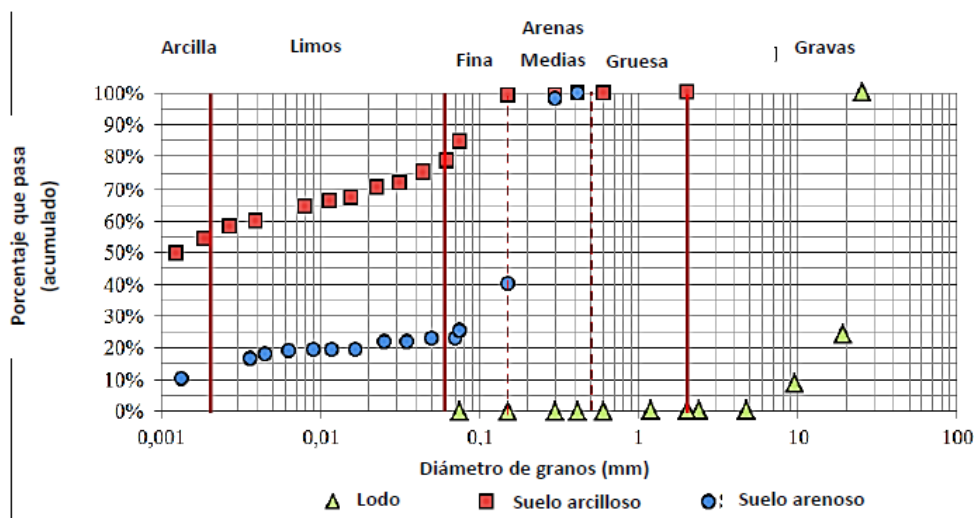
del lodo generado en la PTAP. Lo anterior, se presenta en la Tabla 6.3 y en la Figura 6.3.

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 ⁽³⁾	
	Arcilloso ⁽¹⁾	Arenoso ⁽²⁾		
Física	Masa específica de los sólidos (g.cm ⁻³)	3,03	2,69	2,75
	Límite líquido- LL (%)	52	31	NP ⁽⁴⁾
	Límite de plasticidad - LP (%)	38	15	NP
	Índice de plasticidad (%)	14	16	NP
Química	pH (en KCl)	4,4	3,9	5,1
	C (g.kg ⁻¹)	4,77	ND ⁽⁵⁾	18,35
	Materia orgánica (g.kg ⁻¹)	8,20	ND	31,56
	CIC (cmolc.kg ⁻¹)	8,87	3,42	16,95

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

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



Característica	Tipo de Suelo		Lodo de PTAP(3)
	Arcilloso ⁽¹⁾	Arenoso ⁽²⁾	
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

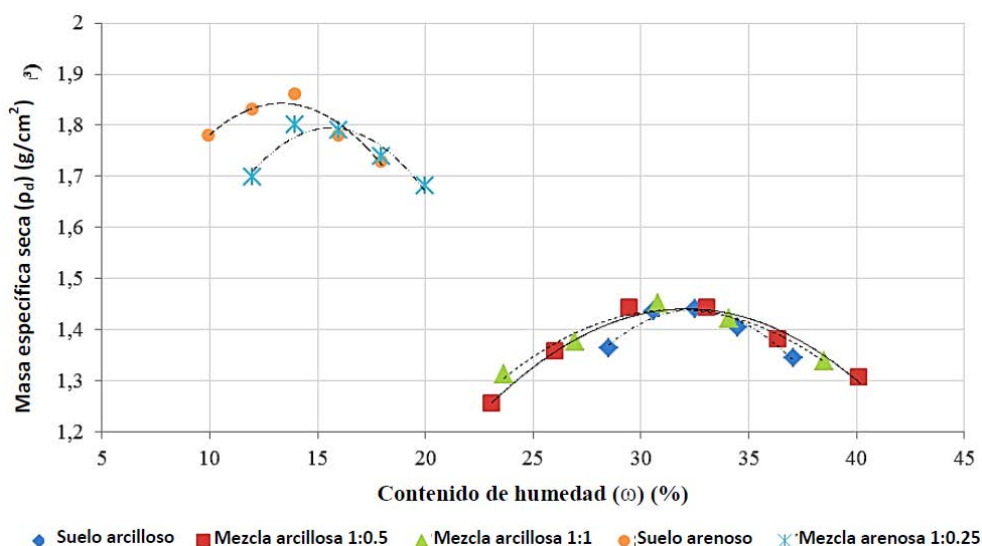
como este es un material con mayor granulometría natural, se optó por una menor proporción de lodo, nuevamente buscando un posible equilibrio en la distribución de granos en la composición final.

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 $\rho_{\text{d Máxima}}$ para los suelos y para las mezclas, los cuales se presentan en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4 Valores de ω óptima y ρ_{d} Máxima de los suelos y de las mezclas.

Tipo de suelo	ω Óptima (%)	ρ_{d} Máxima (g/cm ³)
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 ($\rho_{\text{d Máxima}}$), 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 ⁻¹)
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 (Boskov, 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 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

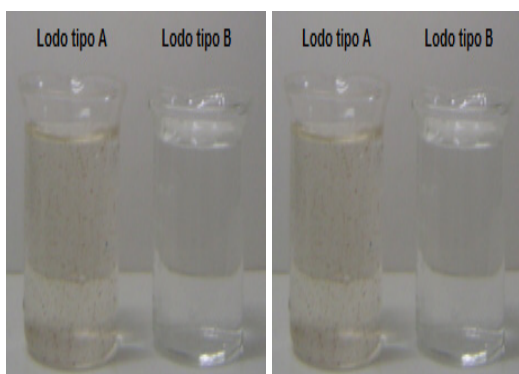
Según datos del Instituto Agronómico de Paraná (IAPAR 2019), la precipitación media anual de Londrina es de 1.610 mm, ocurriendo en promedio en 121 días del año. Con base en estos datos y en el área de los prototipos a escala reducida utilizados en esta prueba, se simuló una condición crítica de precipitación 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 ₅ d, 20°C (mg·L ⁻¹)	2,9	2,9	3
DQO (mg·L ⁻¹)	54,84	27,59	--
Aluminio (mg·L ⁻¹)	0,12	0,05	0,1 *
Hierro (mg·L ⁻¹)	0,10	0,007	0,3 *
Cádmio (mg·L ⁻¹)	N.D	N.D	0,001
Cálcio (mg·L ⁻¹)	3,45	2,82	--
Plomo (mg·L ⁻¹)	N.D	N.D	0,01
Cobaltio (mg·L ⁻¹)	N.D	N.D	0,05
Cobre (mg·L ⁻¹)	0,04	0,03	0,009 *
Cromo (mg·L ⁻¹)	N.D	N.D	0,05
Fósforo (mg·L ⁻¹)	N.D	N.D	0,03
Magnésio (mg·L ⁻¹)	1,01	0,27	--
Manganeso (mg·L ⁻¹)	0,44	0,67	0,1
Níquel (mg·L ⁻¹)	N.D	N.D	0,025
Potásio (mg·L ⁻¹)	0,30	0,30	--
Silicio (mg·L ⁻¹)	5,42	1,07	--
Sódio (mg·L ⁻¹)	0,50	0,40	--
Titânio (mg·L ⁻¹)	0,007	0,003	--
Zinco (mg·L ⁻¹)	<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⁻¹ para el percolado en el lodo deshidratado tipo A y de 0,03 y 0,67 mg L⁻¹ 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⁻¹, 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, H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , 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).

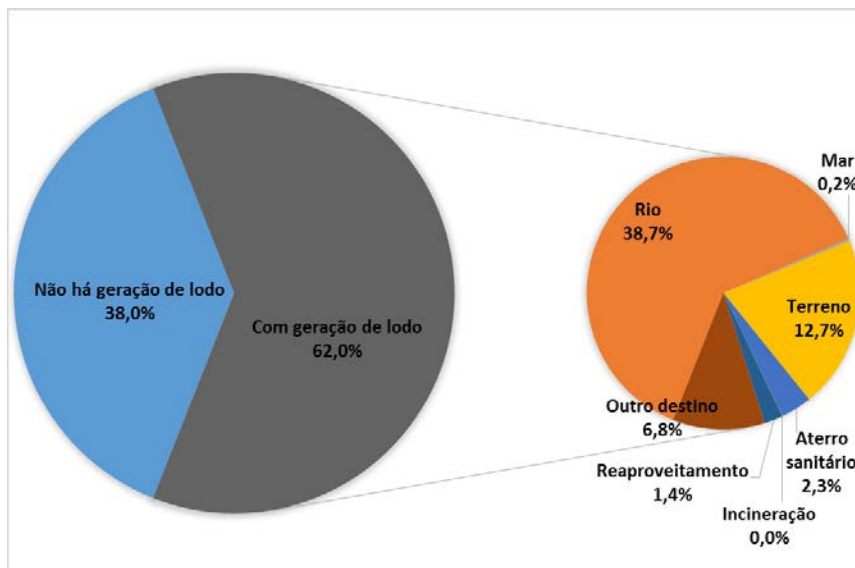
Las experiencias de la aplicación de lodos generados en las PTAPs, con y sin lodo de PTAR agregado (ambos generados en la Región Metropolitana de Curitiba (RMC), Paraná) en suelos degradados, demuestran que esta aplicación no tuvo influencia en el desarrollo vegetal del millo ni alteró las características 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⁺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⁻¹ 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⁻¹ 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>. 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.