

Artículo científico

## Caracterización para oportunidad de reúso de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales de una industria de grasas vegetales

*Characterization for the opportunity to reuse sludge from the treatment of wastewater from a vegetable fat industry.*

**Cecilia Del Carmen Arrocha Anguizola**

**Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.**

**Dirección para recibir correspondencia: ceci.arrocha@gmail.com**

**Recibido 7.07.2020 Aceptado 26.10.2020**

### Resumen

El tratamiento de las aguas residuales generadas en una industria de producción de grasas vegetales se realiza mediante un proceso de lodos activados. Esta planta de tratamiento de aguas residuales produce, como subproducto, de una a dos toneladas diarias de lodos. Su disposición representa un riesgo para el medio ambiente, así como también genera un alto costo para la empresa implicada. Por esta razón, este estudio consiste en caracterizar estos lodos para impulsar alternativas de reusos de forma sanitaria y atribuirle un valor agregado. Se opta por un análisis cuantitativo de parámetros físicos, químicos y biológicos bajo una investigación cuantitativa de método exploratorio y se generan los datos a través de la recolección de 16 muestras. Se obtiene como resultado un déficit de nitrógeno, con una relación carbono - nitrógeno promedio de 49:1 y una humedad promedio de 77%. Encontrándose estos parámetros por encima del rango ideal para darle al lodo un reúso como abono orgánico, por lo cual se requiere una adecuación previa para este tipo de reúso. Por medio de esta investigación se muestra la oportunidad de aprovechar un subproducto considerado generalmente como un desecho.

**Palabras Clave:** agua residual doméstica, materia orgánica, refinería, aceites vegetales, subproducto, residuos sólidos, abono orgánico.

### Abstract

The wastewater treatment generated in a vegetable fats production industry is carried out through an activated sludge process. This wastewater treatment plant produces, as a by-product, one to two tons of sludge per day. Its disposal represents a risk to the environment, as well as it generates a high cost for the company involved. For this reason, this study consists of characterizing these sludges to promote alternative reuse in a sanitary way and feature an added value to it. A quantitative analysis of physical, chemical, and biological parameters is chosen under a quantitative investigation of an exploratory method; and the data is generated through the collection of 16 samples. The result is a nitrogen deficit, with an average carbon - nitrogen ratio of 49: 1 and average humidity of 77%. These parameters are found above the standard range to reuse the sludge as organic fertilizer, therefore it requires a previous adaptation for this type of reuse. Through this research, it is shown the opportunity to take advantage of a by-product generally considered as waste and possibly create a use for it.

**Key words:** domestic wastewater, organic material, refinery, vegetable oils, by-product, solid waste, organic fertilizer.

### Introducción

Es inevitable que las actividades humanas generen aguas residuales (AR), según Romero (2010). La contaminación causada por las aguas residuales ha llevado a la construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). El subproducto más importante generado por la PTAR son los lodos debido a su volumen y tratamiento posterior (Limón, 2013).

Las características y cantidad de los lodos generados pueden variar al depender del tipo de agua residual a tratar, y el tratamiento efectuado. Por lo general, la disposición de estos lodos se ejecuta mediante la contratación de empresas especializadas para retirarlos según el peso, y genera un alto costo económico. Lo que puede desencadenar una posible fuente de contaminación al ser dispuestos incorrectamente.

La caracterización del lodo permite determinar las alternativas para considerar su posible reúso de forma sanitaria, y así, poder utilizar este subproducto generado. Mantilla (2015) concluye que el uso de los lodos para recuperación de suelos agrícolas es de bajo costo y de fácil manejo. También se posibilita la estandarización en sus componentes y, facilita controles efectivos desde su generación.

Los lodos residuales son ricos en materia orgánica, macronutriente, micronutrientes y poseen una alta diversidad microbiana. Por ello mejoran la calidad de los suelos y estimulan la población microbiana; sin embargo, al no tener un adecuado manejo de los mismos, pueden causar un riesgo al ambiente y a la salud poblacional. (Martínez et al, 2011)

Ramírez y Pérez (2006) evaluaron la aplicación de lodos como abono orgánico en el crecimiento, desarrollo y producción del rábano rojo, del cual se obtuvo resultados favorables en el desarrollo del cultivo y el cumplimiento de las normas sanitarias.

El objetivo de esta investigación es la caracterización de lodos, proveniente de una PTAR, para así impulsar sus alternativas de reúsos de forma sanitaria, con el cual se busca atribuirle un valor agregado, al ser un factor importante, la relación carbono-nitrógeno de las muestras para considerar la oportunidad de su reúso como abono orgánico.

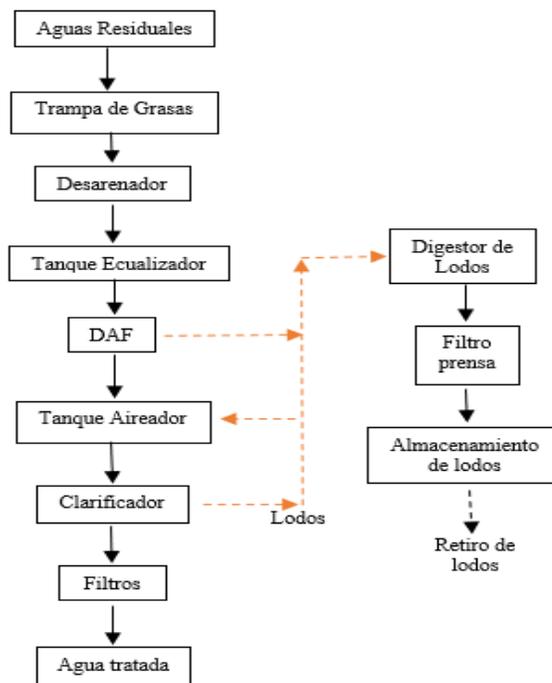
### Descripción del área de estudio

Los lodos caracterizados en este estudio provienen de una PTAR, que se encuentra en el kilómetro 16.5 carretera a El Salvador, en el municipio de San José Pinula del departamento de Guatemala. La industria trabaja con los siguientes tipos de aceites vegetales: palma, palmiste, y soya.

Las AR que ingresan a la PTAR son: AR de los procesos industriales, las cuales se producen por lavados después de la refinación de aceites; AR domésticas, las cuales se producen por las cafeterías, aseo, y servicios sanitarios; y las aguas del sistema pluvial.

La PTAR funciona mediante un proceso de lodos activados, con una adaptación de un sistema de flotación por aire disuelto (DAF), figura 1, debido a la alta carga orgánica que maneja. La misma regularmente maneja un caudal de 25 m<sup>3</sup>/h y cuenta con un periodo de retención de 24 horas. Los lodos generados en todo el proceso son recolectados para su estabilización, y posteriormente son secados por medio de un filtro prensa, figura 1. Se extrae del filtro prensa, entre una a dos toneladas de lodos por día, los cuales son retirados por una empresa especializada.

Figura 10. Esquema de proceso en la PTAR



## Metodología

### Enfoque metodológico

Para examinar la posibilidad de reutilizar estos lodos, de una PTAR de industria productora de grasas vegetales, como abono orgánico se plantea una investigación cuantitativa con un alcance e investigación exploratoria. Según Lozano (2008) este alcance plantea un análisis general de pocas muestras para obtener información básica, donde previamente hay poca información o no se ha realizado investigación en el sitio. De esta forma permite considerar realizar una investigación más profunda a futuro.

A continuación, se presentan los detalles sobre los parámetros determinados, muestreo y métodos utilizados en este estudio:

### Parámetros analizados

Se determinan y analizan las siguientes variables: coliformes totales (C.T.), coliformes fecales (C.F.), humedad (H), sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV), sólidos totales fijos (STF), potencial de hidrógeno (pH), conductividad eléctrica (C.E.), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), cobre (Cu), zinc (Zn), hierro (Fe), manganeso (Mn), sodio (Na), boro (B), carbono orgánico (CO), nitrógeno total ( $N_{total}$ ), carbono - nitrógeno (C:N). Estos parámetros fueron seleccionados de acuerdo a su importancia para reutilización de los lodos como abono orgánico.

### Muestra y Muestreo

La muestra analizada en esta investigación corresponde a los lodos extraídos en el turno de la noche y en el turno de la mañana. En cada turno se realizaron 8 muestreos.

Se realiza un tipo de muestreo puntual y un diseño de muestreo no probabilístico de forma deliberada con la industria. El mismo se realiza en el punto de almacenamiento de lodos, figura 1, dentro de la estación seca. Las muestras son almacenadas en bolsas plásticas estériles, las cuales son selladas y preservadas en cadena de frío. Cabe mencionar que, durante la obtención de muestras de lodos, se registran procesos de mantenimiento en la PTAR, es decir, la PTAR no se encuentra estabilizada durante cierto periodo del muestreo.

### Instrumentos y procedimientos para la obtención de información

A continuación, se presentan los instrumentos y métodos aplicados para determinar los parámetros:

#### 1) Coliformes totales y fecales

Se toma 25 g de muestra para ser disuelta en 50 cm<sup>3</sup> de agua destilada. Se deja un tiempo de contacto de 30 minutos. Luego se procede a realizar la técnica de tubos de fermentación con tres diluciones, y cinco tubos de fermentación para cada dilución. Los resultados son multiplicados por 2, como relación del material sólido en líquido. Para los C.T. se utiliza una incubadora Thelco 31483 (Precision Scientific Co, EE. UU) y para los C.F. se utiliza una incubadora 150 (Lab-Line, EE. UU).

#### 2) Humedad

Se toma 25 g de muestra para ser colocado en una cápsula de porcelana, previamente pesada en una balanza analítica Sartorius CP224S, y ser secada en un horno Stabil-Therm (Blue M, EE. UU) a 105°C hasta obtener masa constante. Según Zagal y Sadzawka (2007), se aplica la ecuación 1.1 para determinar el % de humedad presente en la muestra:

$$H = \frac{B-C}{B-A} \times 100 \quad (1.1)$$

De donde:

A = Peso de la cápsula

B = Peso de la cápsula + peso de la muestra

C = Peso de la cápsula + peso de muestra seca

#### 3) Sólidos totales

Según Zagal y Sadzawka (2007), se aplica la ecuación 1.2 para determinar los ST presente en la muestra:

$$H = \frac{C-A}{B-C} \times 100 \quad (1.2)$$

De donde:

A = Peso de la cápsula

B = Peso de la cápsula + peso de la muestra

C = Peso de la cápsula + peso de muestra seca

#### 4) Sólidos totales volátiles

La cápsula con la muestra seca, de la prueba de ST, se calcina en una mufla a 550°C por un periodo de tiempo

de una hora, y se deja enfriar en el desecador para posteriormente ser pesada. Según Zagal y Sadzawka (2007), se aplica la ecuación 1.3 para determinar el % de STV:

$$H = \frac{C-D}{\text{peso de la muestra}} \times 100 \quad (1.3)$$

De donde:

C = Peso de la cápsula + peso de muestra seca

D = Peso de la cápsula + peso de muestra calcinada

5) Sólidos totales fijos

Se calcula por diferencia, al restar los STV de los ST.

6) Secado de muestras

Se coloca la muestra fresca de forma esparcida en una placa de vidrio, se introduce en un horno Stabil-Therm (Blue M, EE. UU) a una temperatura alrededor de 40°C y se pulveriza la muestra seca. De la muestra pulverizada se determinan los siguientes parámetros:

6.1) P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe, Mn, Na, B, CO y N<sub>total</sub>.

Se determinan según las metodologías/pasos indicadas en el Manual de Asistencia técnica No. 47 por ICA (1989). Cabe mencionar que la cuantificación de K, Ca, Mg, Cu, Zn, Fe, Mn y Na se realiza por espectrofotometría de adsorción atómica. Para P y B su cuantificación se da por colorimetría de longitud de onda a 430 nm y 880 nm respectivamente. El S se determina por transmitancia a una longitud de onda de 420 nm. Mientras que el CO y N<sub>total</sub> se cuantifican por titulación.

6.2) Potencial de hidrógeno

Se toma 10 g de muestra, para ser disuelta en 25 cm<sup>3</sup> de agua destilada. Se deja un tiempo de contacto de 30 minutos. Luego se procede a determinar el pH de la muestra por medio del potenciómetro.

6.3) Conductividad eléctrica

Se toma 10 g de muestra, para ser disuelta en 50 cm<sup>3</sup> de agua destilada. Se deja un tiempo de contacto de 10 minutos. Posteriormente se procede a determinar la C.E. de la muestra por medio del conductímetro, esta lectura es multiplicada por 5, como relación del material sólido en líquido.

6.4) Relación carbono - nitrógeno

Es una relación obtenida a partir de la división numérica del contenido de CO entre el N<sub>total</sub> de la muestra analizada.

**Resultados**

A continuación se detallan los resultados obtenidos a determinar. Los parámetros fisicoquímicos se presentan en la tabla 1 y 2, y los parámetros bacteriológicos se detallan en la tabla 3.

Es importante destacar que para las muestras No. 1, 2 y 3, la PTAR se encuentra en proceso de mantenimiento, por lo cual no trabaja estabilizada. En la muestra No. 4, se inicia el proceso de estabilización debido a la culminación del periodo de mantenimiento en la PTAR. Para las muestras No. 5, 6, 7 y 8, ya se encuentra completamente estabilizada la PTAR.

**Tabla 14. Parámetros fisicoquímicos**

Muestras	pH (Unidad de pH)		Ca (%)		C.E. (µS/cm)		P (%)		K (%)		Mg (%)		S (%)		Cu (mg/kg)		Zn (mg/kg)		
	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	
PTAR no estabilizada	1	8.4	9.2	11	10	7,170	6,655	2	1	0.1	0.1	0.8	0.7	0.3	0.4	35	25	80	115
	2	7.7	6.9	9	7	5,580	7,155	2	1	0.2	0.1	0.6	0.4	0.3	0.3	40	40	100	130
	3	10.8	8.8	12	9	7,065	4,455	1	1	0.1	0.1	0.9	0.6	0.4	0.4	40	40	135	125
	4	10.0	10.6	13	14	7,565	6,520	1	1	0.2	0.1	0.6	0.8	0.4	0.4	30	30	135	145
PTAR estabilizada	5	7.0	6.9	7	8	12	10	1	1	0.2	0.1	0.4	0.5	0.3	0.4	20	20	150	150

Muestras	pH (Unidad de pH)		Ca (%)		C.E. (µS/cm)		P (%)		K (%)		Mg (%)		S (%)		Cu (mg/kg)		Zn (mg/kg)	
	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM
6	7.9	9.0	7	9	4	5	1	1	0.2	0.2	0.4	0.5	0.3	0.3	25	35	270	255
	7.4	7.4	8	7	6	5	1	1	0.1	0.1	0.4	0.4	0.3	0.4	20	20	190	205
	6.3	7.0	6	7	10	5	2	2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.3	0.2	15	10	240	190

Nota. LN = Lodos de la noche; LM = Lodos de la mañana

**Tabla 15. Continuación parámetros fisicoquímicos**

Muestras	Mn (mg/kg)		B (mg/kg)		Fe (g/kg)		Na (g/kg)		Relación C:N		H (%)		ST (%)		STV (%)		STF (%)		
	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	LN	LM	
PTAR no estabilizada	1	75	105	29	7	8	6	1	1	40 :1	61 :1	84	76	16	24	8	16	8	8
	2	45	60	19	24	6	6	2	1	45 :1	47 :1	78	79	22	21	14	15	8	6
	3	85	45	22	21	6	5	1	1	50 :1	72 :1	70	74	30	26	20	18	10	8
	4	245	170	26	14	13	11	3	2	28 :1	35 :1	81	80	19	20	11	12	8	8
PTAR estabilizada	5	45	50	29	20	7	6	1	1	52 :1	57 :1	74	74	26	26	19	18	7	8
	6	45	45	15	17	9	11	2	2	51 :1	44 :1	78	81	22	19	14	11	7	7
	7	40	55	14	13	8	7	1	1	51 :1	56 :1	76	77	24	23	16	15	8	7
	8	45	35	19	22	6	6	3	2	46 :1	54 :1	73	77	27	23	15	16	11	7

Nota. LN = Lodos de la noche; LM = Lodos de la mañana

**Tabla 16. Parámetros bacteriológicos**

Muestras	C.T. (NMP/g)		C.F. (NMP/g)		
	LN	LM	LN	LM	
PTAR no estabilizada	1	50,000	1,080,000	28,000	280,000
	2	3,200,000	3,200,000	420,000	96,000
	3	420,000	260,000	78,000	158,000
	4	8,600	220	480	136
PTAR estabilizada	5	82,000	3,200,000	50,000	3,200,000
	6	3,200,000	440,000	50,000	28,000
	7	28,000	48,000	16,400	42,000
	8	860,000	860,000	48,000	28,000

Nota. LN = Lodos de la noche; LM = Lodos de la mañana

### Análisis de Resultados

Los niveles de pH y Ca presentan una disminución al estar estabilizada la PTAR, tabla 1, ya que al no estar estabilizada la PTAR, por lo general, se aumenta la aplicación de Cal.

Al presentarse un pH mayor a 8, el lodo es ideal para nivelar suelos acidificados. Según Román et al. (2013) el rango ideal de pH para un abono orgánico es de 5.8 a 7.2. En este caso, cuatro días de muestreo presentan un rango mayor, tabla 1, a un pH de 7.2. Esto hace necesario que se deba nivelar el pH de los lodos para ser utilizados como abono orgánico.

La C.E. presenta una variación significativa de disminución al encontrar la PTAR estabilizada, tabla 1. Al obtener valores de C.E. muy altos en los lodos, y ser

aplicado como abono orgánico, se presenta dificultades en el crecimiento de muchos cultivos por las altas cantidades de sales. Según Gómez y Merchan (2016) para una C.E.  $< 500 \mu\text{S}/\text{cm}$  se presenta un buen desarrollo de las plantas.

Según INTAGRI (2016) un contenido nutrimental entre 0.2-2.1 % de P, 0.5-1.7 % de K, 0.3-1.0 % de Mg, como se presenta en la mayoría de los resultados obtenidos, tabla 1, se da por un bajo aporte de nitrógeno.

Según INTAGRI (2016) un contenido nutrimental entre 20-70 mg/kg de Cu, 108-300 mg/kg de Zn, 165-490 mg/kg de Mn y 14-38 mg/kg de B, como se presenta en la mayoría de los resultados obtenidos, tabla 1 y 2, se da por un bajo aporte de nitrógeno. Los resultados de Cu y Zn están por debajo del límite máximo permisible (LMP) según la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos – USEPA, también de la Norma Mexicana (NOM)-004-SEMARNAT-2002 y Decreto N° 1287 de Colombia para el tipo de lodos de la clase A.

Los valores obtenidos de Fe en este estudio, tabla 2, se pueden considerar normales, al ser comparados con los resultados obtenidos por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM) de España, que al realizar análisis a los lodos provenientes de 66 diferentes PTAR se obtuvo valores de Fe desde 5 a 70 g/kg. Cabe mencionar que en el tratamiento del AR se da un proceso de aireación, por consiguiente, el Fe es oxidado y el mismo se precipita quedando en los lodos.

Para el Na se obtuvieron resultados en un rango de 0.9 a 2.8 g/kg, tabla 2. Las concentraciones de Na deben ser monitoreadas en los abonos orgánicos para evitar problemas de salinidad en los suelos.

La relación C:N puede variar según la descomposición que se lleve a cabo de la materia orgánica en los lodos, así como también varía a lo largo de su proceso. Según Román et al. (2013) para iniciar un abono orgánico la relación C:N debe estar en un rango de 25:1 a 35:1. La gran mayoría de las muestras analizadas, tabla 2, presentan resultados mayores al rango requerido, es decir, se presenta un exceso de carbono. Para utilizar los lodos como abono orgánico se debe adicionar material rico en nitrógeno, como el estiércol o gallinaza, y así alcanzar una adecuada relación C:N.

Según Román et al. (2013) el rango ideal de H para un abono orgánico es de 45% a 60%, ya que una  $H < 45\%$  representa falta de agua para los microorganismos, y una  $H > 60\%$  representa una falta de oxígeno. Todas las muestras cuentan con una  $H > 60\%$ , tabla 2, por consiguiente, se debe disminuir la misma para ser utilizado como abono orgánico.

Los ST son el residuo al evaporar el agua que contenga la muestra. Los mismos están comprendidos por: STV, que son partículas orgánicas que se volatilizan a una temperatura y los STF, que son partículas inorgánicas (Romero, 2010).

Según Laca et al (2019) cuando la relación de STV/ST está en un rango de 60% a 65% es indicativo de lodos digeridos. Los promedios de los resultados obtenidos, tabla 2, al aplicar la relación STV/ST de las muestras analizadas da un 65%, por consiguiente, se considera que estos lodos analizados están digeridos.

Al aplicar estos lodos en los suelos, como abono orgánico, se debe cumplir con los niveles presentes de organismos patógenos sanitariamente aceptados según la regulación de cada región. Así, disminuir los riesgos de enfermedades que los mismos puedan ocasionar.

Según Kiely (1999), citado por Torres et al. (2005), los lodos cuentan con una mayor concentración de microorganismo patógenos a causa de la reducción del contenido de agua y, por lo tanto la cantidad de C.T. y C.F. encontrados, mostrados en la tabla 3, son normales debido al AR de tipo doméstica que recibe la PTAR.

Las unidades trabajadas de coliformes en esta investigación, número más probable (NMP), no corresponde a la regulada por el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 de Guatemala, ya que este las presenta en unidades formadoras de colonias (UFC). Los resultados de CF obtenidos, excepto la muestra No.5 de lodos de la mañana, están por debajo del LMP según la Norma Mexicana (NOM)-004-SEMARNAT-2002 para el tipo de lodos de clase C.

## Conclusiones

El reúso de los lodos, proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales, dependerá de sus características. Las cuales pueden mejorar suelos acidificados, suelos con bajo nivel de nutrientes o acelerar la recuperación de suelos afectados por

incendios forestales. También, se pueden aprovechar en el reforzamiento de taludes al ser mezclados con el suelo. Cabe mencionar que, al disponer de los mismos, sin conocer sus características se puede presentar problemas de contaminación y desaprovechar una posible materia prima.

Con esta investigación se obtiene un conocimiento de referencia acerca de la composición y/o propiedades de los lodos generados en una planta de tratamiento de aguas residuales en la industria de grasas vegetales. Cabe mencionar que, al afectarse la estabilización en la planta, se refleja una variación en parámetros fisicoquímicos y biológicos de estos lodos. La estabilización se afecta principalmente por procesos de mantenimiento que se realizan periódicamente.

El contenido de micronutrientes, macronutrientes, y la relación C:N, de estos lodos, muestran un déficit de nitrógeno según la literatura. Este es un nutriente esencial en los abonos orgánicos para el desarrollo de cultivos, por consiguiente se debe añadir otros materiales ricos en nitrógeno para incrementar su nivel. También, estos lodos cuentan con una humedad por encima del límite recomendado para un abono orgánico apto. Estos hallazgos se dan sin importar las condiciones de estabilización en la que se encuentre la PTAR, por esta razón es necesaria la adecuación de los lodos.

## Referencias

- Decreto N° 1287, 10 de julio 2014. Establece criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, Bogotá D.C, Colombia.
- ICA, 1989. El análisis de suelos, plantas y agua para riego. Instituto Colombiano Agropecuario. Bogotá: Disciplinas agrícolas. Vol. Manual de Asistencia Técnica No. 47
- INTAGRI, 2016. Los abonos orgánicos: beneficios, tipos y contenidos nutrimentales. Serie Agricultura Orgánica No. 8. México, pp. 4.
- Gómez, L. L. y A. M. Merchan, 2016. Caracterización fisicoquímica de los lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua residual industrial de una empresa de café del departamento de Caldas. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Católica de Manizales. Manizales, Colombia, pp. 106.
- Guatemala. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006. Reglamento de las descargas y reúso de aguas residuales y de la disposición de lodos. Diario de Centroamérica. 5 de mayo de 2006
- Kiely, G. y Veza, J., 1999. Ingeniería ambiental, fundamentos entornos, tecnologías y sistemas de gestión. McGraw-Hill Interamericana de España. España.
- Laca, A., A. Laca y J. Díaz, 2019. Producción y características de lodos; ecuaciones y cálculos para el tratamiento de aguas. Ediciones Paraninfo, Madrid, España, pp. 251-262
- Limón, J. G., 2013. Los lodos de las plantas de tratamiento de aguas residuales, ¿Problema o recurso?. Guadalajara, México, pp. 9.
- Lozano, J. Blogger.com: Propiedad Intelectual y contenidos digitales [Blog]. 6 de noviembre de 2008. Disponible en: <https://janeth-investigacioniv.blogspot.com/2008/11/investigacion-exploratoria.html>. Consultado el 12 de enero del 2020.
- Mantilla, G., 2015. Validación de uso de lodos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales tipo UASB como insumo en recuperación de suelos agrícolas. Bucaramanga, Colombia. ESAICA 1(1):18-23.
- Martínez, A., M. Pérez, J. Pinto, B. Gurrola, y A. Osorio, 2011. Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. Rev. Int. Contam. Ambient. 27(3): 241-252.
- Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino, 2009. Caracterización de los lodos de depuradoras generados en España. España: INVENTIAL, S.L.
- 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.
- Ramírez, P., y M. Pérez, 2006. Evaluación del potencial de los biosólidos procedentes del tratamiento de aguas residuales para uso agrícola y su efecto sobre el cultivo de rábano rojo (*Raphanus sativus* L.). Revista Facultad Nacional Agronomía 59 (2): 3543-3556.

- Román, P., M. Martínez y A. Pantoja (Editores), 2013. Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina (FAO). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Santiago, Chile.
- Romero, J., 2010. Tratamiento de aguas residuales. Teoría y principios de diseño. Tercera Edición. Escuela Colombiana de Ingeniería. Bogotá, Colombia.
- Torres, P. et al. 2005. Influencia del material de enmienda en el compostaje de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales – PTAR. Ingeniería e Investigación 58(2):53-61.
- USEPA, 1993. Standards for the use or Disposal of Sewage Sludge; Final Rules. 40 CFR Part: 503. U.S. Environmental Protection Agency.

Zagal, E. y A. Sadzawka, 2007. Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos. Facultad de Agronomía. Universidad de Concepción. Chillán, Chile, pp. 12-16

### **Información de la autora**

Ingeniera ambiental, Cecilia Del Carmen Arrocha Anguizola, graduada en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de Panamá, en el año 2015. Msc. en Ingeniería Sanitaria 2020, de la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos, ERIS de la Universidad de San Carlos de Guatemala.