

Fitotoxicidad de los lodos generados en un sistema de lodos activados modalidad aireación extendida para el tratamiento de agua residual doméstica

Phytotoxicity of sludge generated in an activated sludge system mode extended aeration for domestic wastewater treatment.

Angelica Maria Millan-Bueno¹
angelica.millan01@usc.edu.co

Linda Lucia Córdoba-Agredo¹
linda.cordoba00@usc.edu.co

José Luis Cárdenas-Talero²
jose.cardenas03@usc.edu.co

Jorge Antonio Silva-Leal²
jorge.silva04@usc.edu.co

Estudiante, Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería, Programa Bioingeniería (1)
Docente, Universidad Santiago de Cali, Facultad de Ingeniería (2)

Resumen

El aumento de la población global ha llevado a un incremento considerable en la generación de aguas residuales, lo que plantea desafíos en su tratamiento y gestión de sus subproductos. Los lodos varían según los sistemas de tratamiento, siendo los sistemas de lodos activados modalidad de aireación extendida, esenciales en la degradación de la materia orgánica. Estos lodos son ricos en nutrientes y materia orgánica, lo que los hace valiosos como fertilizantes, pero su uso en la agricultura requiere precaución debido a posibles contaminantes. La fitotoxicidad, que evalúa el efecto de los lodos en el crecimiento de las plantas, es un factor crítico. Se realiza mediante pruebas de germinación de semillas para determinar concentraciones seguras de lodos y evitar la exposición a contaminantes. El proyecto evaluó la fitotoxicidad de lodos generados en sistemas de lodos activados de aireación extendida durante el tratamiento de aguas residuales domésticas. En los lodos analizados se mantuvieron valores de pH dentro de los rangos adecuados para suelos ácidos. Mientras el lodo secundario no se considera estabilizado biológicamente y presenta riesgo microbiológico, los lodos deshidratados con tiempo de secado de 25 días se consideran estabilizados biológicamente. Ambos lodos muestran fitotoxicidad, que varía con la proporción de lodo y suelo, las mezclas de lodo y suelo mostraron diferentes niveles de fitotoxicidad; la relación lodo suelo 100-0 resultó altamente fitotóxica, una proporción de 75-25 disminuyó la fitotoxicidad, mientras que una proporción 50-50 permitió la germinación y la combinación de 25-75 favoreció la germinación significativamente. El lodo deshidratado tiene potencial como fertilizante, pero su uso debe condicionarse principalmente por el riesgo microbiológico.

Palabras Clave: Fitotoxicidad, lodos, aireación extendida, agua residual doméstica.

Abstract

The increase in global population has led to a considerable increase in the generation of wastewater, which poses challenges in its treatment and management of its by-products. Sewage sludge varies according to treatment systems, with activated sludge systems in the extended aeration mode being essential in the degradation of organic matter. These sludges are rich in nutrients and organic matter, which makes them valuable as fertilizers, but their use in agriculture requires caution due to possible contaminants. Phytotoxicity, which evaluates the effect of sludge on plant growth, is a critical factor. It is performed by seed germination tests to determine safe concentrations of sludge and avoid exposure to contaminants. The project evaluated the phytotoxicity of sludge generated in extended aeration activated sludge systems during domestic wastewater treatment. The sludge tested maintained pH values within the appropriate range for acidic soils. While the secondary sludge is not considered biologically stabilized and presents a microbiological risk, the dewatered sludge with a drying time of 25 days is considered biologically stabilized. Both sludges show phytotoxicity, which varies with the ratio of sludge to soil, the sludge-soil mixtures showed different levels of phytotoxicity; the 100-0 sludge-soil ratio was highly phytotoxic, a ratio of 75-25 decreased phytotoxicity, while a ratio of 50-50 allowed germination and the combination of 25-75 significantly favored germination. Dehydrated sludge has potential as a fertilizer, but its use should be conditioned mainly by the microbiological risk.

Keywords: Phytotoxicity, sewage sludge, extended aeration, domestic wastewater.

1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población a nivel mundial ha resultado en un aumento significativo en la generación de aguas residuales en diversas ubicaciones. Este incremento plantea desafíos sustanciales en términos de tratamiento y gestión apropiada para prevenir la contaminación ambiental (Wijesekara et al., 2017).

En este contexto, el tratamiento de aguas residuales emerge como una estrategia crucial para producir agua tratada y lodos. Las características de estos lodos varían según los sistemas de tratamiento empleados (Alonso et al., 2002). Los sistemas de lodos activados, en particular, la modalidad de aireación extendida, juegan un papel esencial en este proceso al contribuir significativamente a la degradación de la materia orgánica (Vargas et al., 2020).

Actualmente en Colombia, las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) generan alrededor de 274 toneladas de biosólidos al día. El 97% de esta producción es generada por tres plantas: el salitre (Bogotá), Cañaveralejo (Cali) y San Fernando en (Medellín) (Daguer, 2003). La planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad – de Cali (PTAR – C), la cual produce 100 toneladas diarias de biosólidos (EMCALI, 2006).

Es crucial destacar que los lodos generados en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) son ricos en nutrientes y materia orgánica, lo que los convierte en una valiosa fuente de fertilizante. La gestión adecuada de estos lodos puede contribuir a los principios de una economía circular, que promueve la reutilización de recursos. Sin embargo, su uso en la agricultura debe llevarse a cabo con precaución debido a la posible presencia de contaminantes perjudiciales para el ambiente y la salud humana (Ning et al., 2017).

La fitotoxicidad, un término que se refiere a la influencia de los lodos en el crecimiento y desarrollo de las plantas, es un aspecto crítico para considerar. La fitotoxicidad se evalúa mediante pruebas de germinación y crecimiento de semillas, lo que permite determinar la concentración segura de lodos para su uso agrícola y evitar la exposición de las plantas a niveles tóxicos de contaminantes (Charles et al., 2011; Himanem et al., 2012; Young et al., 2012; Mendes et al., 2016; 2020).

Dadas las crecientes preocupaciones sobre el cambio climático, el crecimiento de la población y la presión sobre los recursos naturales se hace evidente la necesidad de una economía más sostenible y circular (UNWWAP, 2017). El aumento de la demanda de alimentos debido al desarrollo económico ha llevado a una expansión significativa de la agricultura, lo que, a su vez, ha generado problemas medioambientales debido al uso de pesticidas y fertilizantes (Foronda-Zapata et al., 2020). Este proyecto se enfocó en la evaluación de la fitotoxicidad de los lodos generados en sistemas de lodos activados, modalidad aireación extendida, durante el tratamiento de aguas residuales domésticas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los lodos evaluados en este estudio fueron tomados de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Cachipay (PTAR-Cachipay), ubicada en el área de expansión urbana conocida como Corredor Cali-Jamundí. Esta planta recibe las aguas residuales de aproximadamente 12.000 habitantes de la zona. Para llevar a cabo la investigación, se procedió a la recolección de los lodos de aguas residuales domésticas generados en el sistema de lodos activados, específicamente en la modalidad de aireación extendida de esta planta de tratamiento. Estos lodos fueron objeto de un proceso de caracterización enfocado en determinar su pH, compuestos químicos, patógenos, materia orgánica y nutrientes. Para ello, se realizó un muestreo puntual en dos puntos específicos: en la salida del sedimentador secundario, correspondiente al lodo secundario-acuoso, y en los lechos de secado (25 días de secado), que constituyen la fase de deshidratación del lodo.

En el proceso de la evaluación de la estabilidad biológica de los lodos, se determinaron los sólidos totales, sólidos fijos totales y los sólidos volátiles totales, para todas estas determinaciones de sólidos se hicieron pruebas en triplicado que ayudaron a disminuir el índice de error que el estudio pudiera haber arrojado. para evaluar los sólidos totales, se introdujeron

las capsulas a usar a una mufla por 20 minutos a una temperatura de 600°C y posterior a esto se dejaron reposar en un desecador por una hora, pasado este tiempo las capsulas vacías fueron pesadas (w1) para así, tomar 50ml de muestra previamente agitada y depositarlo en la capsulas (w2), para luego introducir la capsula en el horno a 100°C durante 24 horas, llevarla al desecador por 30 minutos, transcurrido este tiempo se pesa la capsula nuevamente (w3) y se obtuvo los valores necesarios para determinar los sólidos totales, de acuerdo con APHA et al. (2012).

Se emplearon dos tipos de lodos (lodo secundario y lodo deshidratado) procedentes de la PTAR-Cachipay, y un suelo previamente caracterizado en términos de materia orgánica y nutrientes. Posteriormente, se realizó una dilución de 1:10 (p:v) a todas las muestras, mezclando 20 gramos de sustrato con 200 ml de agua destilada; posterior a esto con ayuda de unas pinzas se añadieron 10 semillas de Rábano dentro de cajas de Petri, siguiendo el método descrito por Fuentes et al. (2004). Las diluciones se agitaron durante una hora, pasado el tiempo de agitación se tomaron estas muestras para proceder en la separación de las dosis donde el volumen total suministrado en las cajas Petri fue de 5ml; las pruebas se realizaron por triplicado en cada condición, utilizando agua destilada como tratamiento de control, y con dosis en porcentaje (v/v) de lodo-suelo 0-100, 100-0, 75-25, 50-50 y 25-75 de cada tipo de lodo (lodo secundario y lodo deshidratado) diluido en agua destilada, siguiendo el protocolo establecido por Parra-Orobio et al. (2021).

Lo cual indica que en las muestras donde se usó un 100-0 de concentración se añadieron 5ml de la muestra de lodo y 0ml del suelo caracterizado, donde el porcentaje fue de 75-25 se añadió 3,8ml de la muestra y 1,2ml de suelo caracterizado, para el 50-50 de concentración se añadió 2,5ml de muestra y 2,5ml de suelo caracterizado, al final donde se usa un 25-75 se añaden 1,2ml de muestra y 3,8 de suelo, cada una de estas mezclas se realiza por triplicado para reducir el índice de error en el estudio.

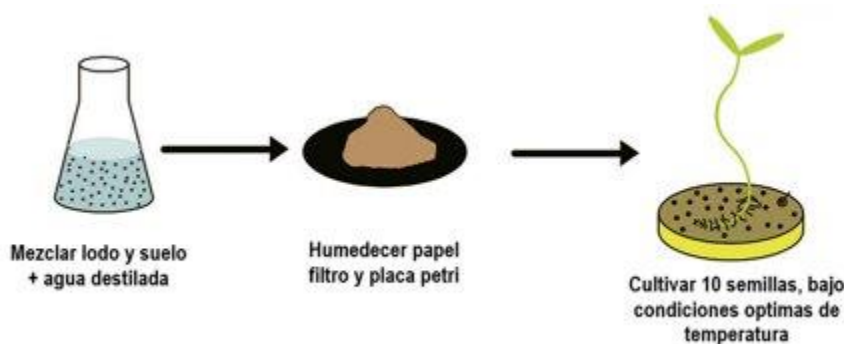


Figura 1. Descripción proceso experimental

Fuente: Adaptado de Kou et al. (2020)

Las cajas fueron tapadas y almacenadas en una nevera a una temperatura oscilatoria entre 25-27 °C para evitar la pérdida de humedad, lo anterior durante todo el periodo de ensayo para facilitar la germinación. Las muestras se incubaron por un periodo de 144 h, donde al cabo de las primeras 72 h se realiza un control de las semillas germinadas para evaluar su crecimiento a medida que transcurría el tiempo. Para cada condición a las 144 h, se registró el número de semillas que germinaron en comparación con el total de semillas germinadas en el control (agua destilada) del ensayo, y se midió cuidadosamente la longitud de las raíces siguiendo el procedimiento descrito por García-Alvear y Abad-Terán (2015). Según dicha metodología, el índice de germinación se calcula de la siguiente manera:

$$PGR = \frac{(No. de semillas germinadas en el tratamiento)}{(No. de semillas en el control)} * 100$$

$$CRR = \frac{(Longitud\ de\ raíces\ en\ el\ tratamiento)}{(Longitud\ de\ raíces\ en\ el\ testigo)} * 100$$

$$IG = (PGR * CRR)/100$$

Donde:

PGR: Porcentaje de germinación relativo

CRR: crecimiento de raíces relativo

IG: índice de germinación

Durante el proceso de evaluación de los niveles de fitotoxicidad se analizaron los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que cuando los valores del índice de germinación son menores o iguales al 50% ($IG \leq 50\%$) presentan una severa presencia de fitotoxicidad, cuando los valores del índice de germinación es 50% mayor o igual que el índice de germinación, o menor o igual que el 80% presentan sustancias fitotóxicas moderadas, y cuando el índice de germinación es mayor o igual al 80%, presentan una baja o nula presencia de sustancias fitotóxicas lo cual indica un resultado positivo. (Varnero et al., 2007; Siles et al., 2020).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Características físicas, químicas y microbiológicas de los lodos

Se tuvieron en cuenta ciertas características para evaluar dicha viabilidad como la caracterización fisicoquímica, microbiológica y valores de los diferentes estándares utilizados como punto de referencia (Tabla 1). En consideración al pH, los valores se mantienen dentro del rango establecido por la NTC 5167 (ICONTEC, 2022) para todas las muestras de lodos. Pues esto es de vital importancia ya que, en Colombia los suelos ácidos representan el 85% de todas las tierras agrícolas y esto indica una mayor probabilidad para el uso de lodos con características alcalinas.

Tabla 1. Características físicas, químicas y microbiológicas de los lodos analizados

Parámetro	Suelo	Lodo Secundario	Lodo Deshidratado	Valor de referencia NTC-5167
pH	6.95	7.33	7.15	Máx 8.5
Nitrógeno Kjeldahl (mg/kg)	10133.4	439	32468	-
Nitrógeno Amoniacal (mg/kg)	650.46	45.9	60	-
Fósforo Total (mg/kg)	271	81.10	24380	-
Potasio (mg/kg)	201.17	35.20	4284	-
Carbono Orgánico Total (%)	86.46	3.54	8.80	-
Arsénico (mg/kg)	-	<0,05	<0,05	41
Cadmio (mg/kg)	-	<0,01	0.05	39
Cromo (mg/kg)	-	<0,01	0.09	1200
Mercurio (mg/kg)	-	<0,01	<0,01	17
Plomo (mg/kg)	-	<0,01	<0,01	20
Coliformes totales (NMP/gr ST)	N.D	8,5,E+04	7,10,E+02	<1,0,E+03
E. Coli (NMP/gr ST)	N.D	8,1,E+04	3,23,E+02	Ausente

N.D: No detectada

Fuente: Elaboración propia

3.2 Estabilidad biológica de lodos

Para evaluar la estabilidad biológica de los lodos, se llevó a cabo la medición de los sólidos totales y los sólidos volátiles las cuales se realizaron por triplicados (Tabla 1); para hacer una relación entre estos ya que esta relación es considerada

como una variable indicadora de estabilidad biológica. Los resultados se evaluaron bajo dos rangos <65% y <60% para compararlos entre sí, ya que el valor permitido según la norma en Brasil es <65% y en Perú <60% (CONAMA, 2020; Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2017), de manera que esta relación entre sólidos indica que, si dicho porcentaje es muy alto, el lodo es muy activo y poco estable, si este porcentaje es bajo indica que es poco activo y mayor estabilidad.

Tabla 1. Pesos capsulas y muestras para el cálculo de sólidos totales y sólidos volátiles

Muestra	w1 (gr)	w2 (gr)	w3 (gr)	w4 (gr)
Suelo	71.4280	95.6993	71.8872	71.8489
Suelo	69.8535	94.2433	70.2736	70.2303
Suelo	65.3868	89.9736	65.8331	65.7907
Lodo secundario	61.8054	85.8165	61.8207	61.8108
Lodo secundario	46.8083	70.6920	46.8247	46.8146
Lodo secundario	68.2800	91.8416	68.2962	68.2865
Lodo deshidratado	69.1069	92.8814	69.1421	69.1216
Lodo deshidratado	39.4780	63.3736	39.5088	39.4910
Lodo deshidratado	78.0758	101.8938	78.1103	78.0916

Fuente: Elaboración propia

En un estudio realizado por Özdemir et al. (2014), se llevó a cabo un experimento a escala de laboratorio en un sistema LAAE con un TRC de 20 y una temperatura de 20 °C; los resultados mostraron una relación SV/ST del 68%. A continuación, en la Tabla 2 se presentan los resultados de la estabilidad biológica de lodos analizados mediante el indicador SV/ST. En este contexto, la estabilidad biológica sugiere que la proporción de materia orgánica ha disminuido lo suficiente y que los microorganismos presentes han alcanzado un estado de declive, sin posibilidad de recuperación (Tabla 2).

Tabla 2. Estabilidad Biológica de los lodos analizados

ST (mg/Kg)	SV (mg/Kg)	Muestra	SV/ST	< 65% *	<60 % **
18919.46	1578.00	Suelo	8.34%	N/A	N/A
17224.41	1775.33	Suelo	10.31%	N/A	N/A
18152.02	1724.50	Suelo	9.50%	N/A	N/A
637.21	412.31	Lodo secundario	64.71%	SI	NO
686.66	422.88	Lodo secundario	61.59%	SI	NO
687.56	411.69	Lodo secundario	59.88%	SI	SI
1480.58	862.27	Lodo deshidratado	58.24%	SI	SI
1288.94	744.91	Lodo deshidratado	57.79%	SI	SI
1448.48	785.12	Lodo deshidratado	54.20%	SI	SI

*CONAMA (2020); ** Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017)

Fuente: Elaboración propia

Si consideramos el umbral del 65% (Normatividad Brasil), podemos concluir que todo el lodo exhibe estabilidad, lo que implica que puede ser empleado con confianza en prácticas agrícolas. No obstante, si aplicamos el indicador del 60% (Normatividad Perú), se observa una diferencia entre el lodo secundario y el lodo deshidratado en términos de estabilidad. Mientras que el lodo deshidratado cumple con este criterio de estabilidad, el lodo secundario no logra alcanzarlo en su totalidad. La Figura 2 muestra el diagrama de cajas y bigotes, también conocido como boxplot.

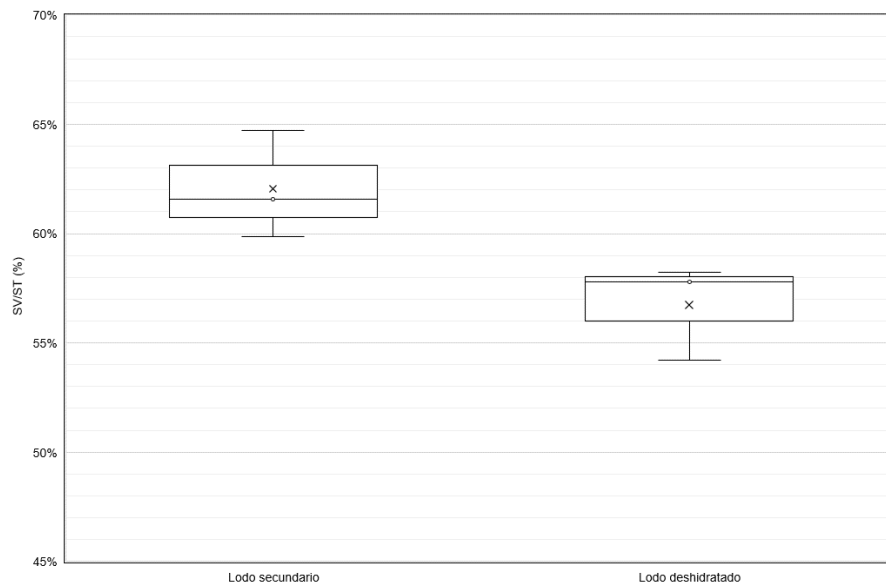


Figura 2. Diagrama de cajas para la estabilidad biológica de los lodos analizados

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el análisis de varianza- ANOVA y el método de Tukey, cuando se aplica a un conjunto de datos para realizar comparaciones múltiples, busca determinar si existen diferencias significativas entre las medias de varios grupos. El resultado se presenta en forma de letras que agrupan los grupos con medias que no son significativamente diferentes.

Tabla 3. Estabilidad Biológica de los lodos analizados

Análisis de varianza-ANOVA			
Fuente		Valor F	Valor p
Muestra		7.77	0.049
Método de comparación Tukey			
Muestra	N	Media	Agrupación
Lodo secundario	3	0.6206	A
Lodo deshidratado	3	0.5674	B

Fuente: Elaboración propia

Las medias de estos dos grupos son significativamente diferentes, como indicado por las letras A y B. Esto significa que hay evidencia estadística para afirmar que las medias del grupo del lodo secundario y el lodo deshidratado son diferentes entre sí con un nivel de confianza del 95%, en comparación con ambos criterios normativos.

3.3 Fitotoxicidad del suelo, lodo secundario y lodo deshidratado

El índice de germinación (fitotoxicidad) se basa en la observación del porcentaje de germinación de las semillas en comparación con el total de semillas implantadas en el grupo de control, el cual utiliza agua destilada. Esto se lleva a cabo con el propósito fundamental de determinar la viabilidad de los nutrientes presentes en los lodos para el fortalecimiento del crecimiento de las plantas. La Tabla 4 muestra los resultados de los dos ensayos realizados.

Tabla 4. Índice de Germinación.

Índice de Germinación (%) ENSAYO 1				Índice de Germinación (%) ENSAYO 2			
Mezcla lodo-suelo	Suelo	Lodo secundario	Lodo deshidratado	Mezcla lodo-suelo	Suelo	Lodo secundario	Lodo deshidratado
0-100	129.51%			0-100	140.63%		
0-100	98.33%			0-100	72.56%		
0-100	87.63%			0-100	67.75%		
100-0		44.68%	44.68%	100-0		81.98%	58.65%
100-0		40.56%	55.77%	100-0		65.87%	85.01%
100-0		37.75%	42.77%	100-0		59.87%	69.27%
75-25		104.58%	67.92%	75-25		140.36%	78.57%
75-25		67.92%	100.91%	75-25		80.13%	40.51%
75-25		61.64%	83.38%	75-25		89.91%	72.52%
50-50		129.74%	166.62%	50-50		157.97%	225.49%
50-50		119.67%	132.44%	50-50		114.42%	148.33%
50-50		96.91%	118.22%	50-50		93.18%	80.86%
25-75		218.08%	189.90%	25-75		244.59%	222.09%
25-75		173.91%	151.46%	25-75		144.70%	159.92%
25-75		204.99%	122.52%	25-75		135.61%	130.88%

Fuente: Elaboración propia

Se pudo observar como resultado el comportamiento del suelo en diversas proporciones de mezcla de lodo-suelo, incluyeron muestras de suelo puro, lodo secundario y lodo deshidratado. Se destacó que las mezclas con porcentaje de lodo inferior al 50% exhibieron una notable fitotoxicidad. Esto sugiere que el uso de lodo con un 100% de contenido, resulta altamente fitotóxico para la germinación de semilla de Rábano. Por otro lado, cuando se empleó una proporción de 75% de lodo y 25% de suelo, la fitotoxicidad disminuyó, reflejando un índice de germinación que osciló entre el 50% y el 80%.

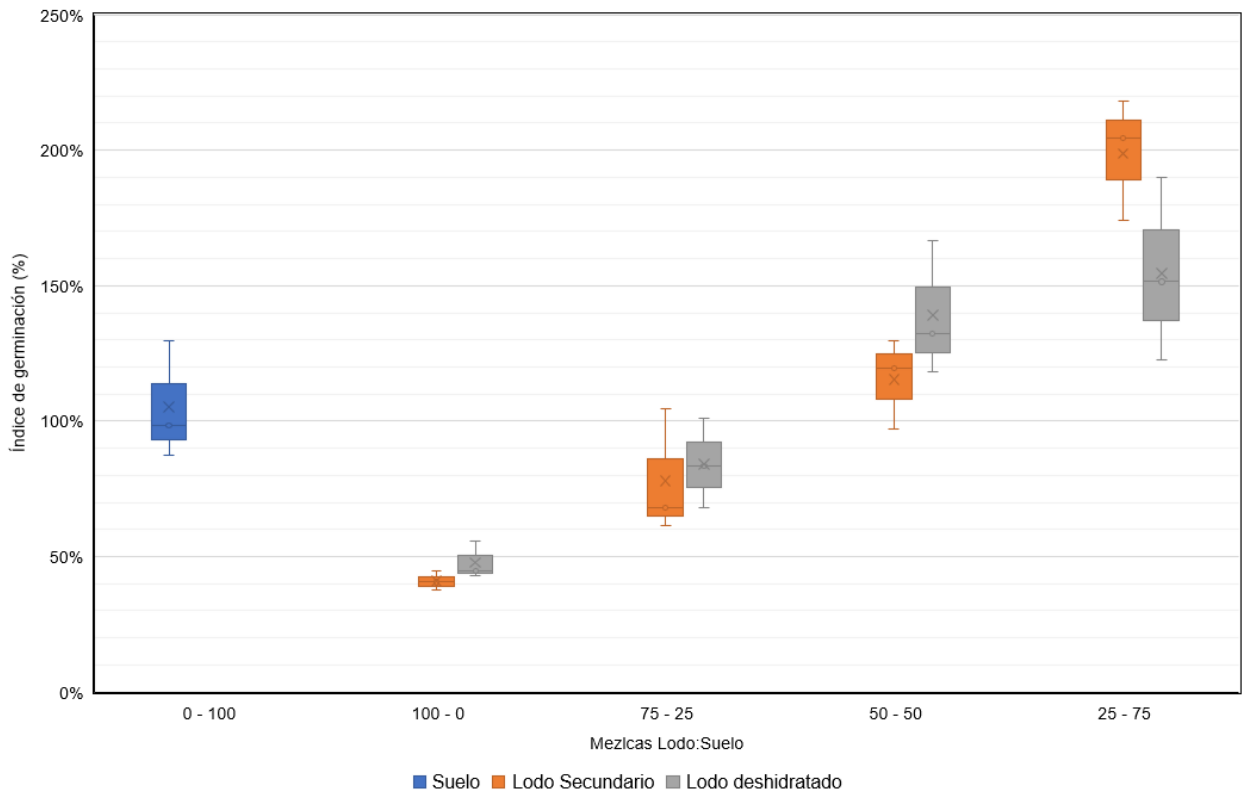


Figura 3. Fitotoxicidad de los lodos a partir del índice de germinación

Fuente: Elaboración propia

Así mismo, al utilizar una proporción de 50% de lodo y 50% de suelo, se observó una mejora significativa, ya que el lodo dejó de manifestar fitotoxicidad y se volvió propicio para la germinación de las semillas de Rábano. En el caso de una combinación de 25% de lodo y 75% de suelo, se observó que el índice de germinación superó el 150%, lo que indica que esta mezcla es altamente beneficiosa para el proceso de germinación. Por lo tanto, se sugiere la posibilidad de considerar el lodo como un potencial fertilizante.

Con respecto al estudio de Venegas et al. (2019), el ensayo de fitotoxicidad evaluó los efectos de distintos tratamientos sobre la germinación de semillas, la longitud de raíces de tres especies vegetales (*Triticum aestivum*, *Lactuca sativa* y *Raphanus sativus*); los porcentajes de inhibición de la germinación variaron entre el 50% y el 100% cuando las plantas fueron tratadas con biosólidos a una concentración de 250 g/kg. La aplicación de 100 g/kg de biosólidos mostró efectos beneficiosos ($IG \geq 100$) o nula presencia de fitotoxicidad ($100 > IG \geq 80$). Los valores medios de EC50 obtenidos para las plantas tratadas con biosólidos tras digestión anaerobia convencional y digestión anaerobia avanzada fueron de 164 g/kg y 159 g/kg, respectivamente; los resultados indican que la fitotoxicidad de los biosólidos puede verse influida por el proceso de digestión anaerobia y la concentración de biosólidos aplicados al suelo. En comparación con los resultados del presente estudio, para los lodos de a PTAR-Cachipay, no se registraron índices inferiores a 80% al utilizar proporciones de 50-50 (lodo-suelo).

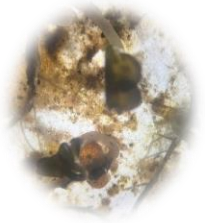

Parra-Orobio et al. (2021) reportaron que la estabilidad del digestato generado en el proceso de digestión anaerobia de residuos de alimentos se determina en función de parámetros como la DQO total, la DQO soluble, los ST (sólidos totales) y los SV (sólidos volátiles). La fitotoxicidad del digestato la evaluaron mediante pruebas de germinación utilizando semillas de rábano (*Raphanus sativus*) como especie indicadora; el estudio concluyó que los digestatos pueden ser muy viables para uso agrícola.

Fuentes et al. (2004) realizaron pruebas de fitotoxicidad en diferentes tipos de lodos estabilizados para evaluar su idoneidad para la aplicación en tierra; se comprobó que los extractos de lodos no tenían un efecto adverso significativo sobre la germinación relativa de semillas de cebada. Sin embargo, la reducción del índice de germinación indicaba que algunas características de los lodos tenían un efecto adverso sobre el crecimiento de las raíces.

Oleszczuk (2008), determino la influencia del compostaje en la fitotoxicidad de los lodos mediante el análisis de sus propiedades fisicoquímicas, metales pesados y contenido en hidrocarburos aromáticos policíclicos; los resultados mostraron que los lodos presentaban una toxicidad variada hacia las plantas analizadas, pero el compostaje redujo su impacto negativo en la mayoría de los parámetros de fitotoxicidad, excepto en la concentración de clorofila.

Teniendo en cuenta que los lodos deshidratados de la PTAR-Cachipay fueron los considerados estabilizados biológicamente y presentaron menores efectos en la fitotoxicidad de las semillas de Rábano, en la Tabla 5 se muestra el registro fotográfico a través de microscopio.

Tabla 5. Registro fotográfico de índice de Germinación para los lodos deshidratados.

Dosis Lodo-Suelo	Fotografía
0-100	
100-0	
75-25	
50:50	
25-75	

Fuente: Elaboración propia

En las imágenes, se puede apreciar de manera descriptiva el efecto de la fitotoxicidad en la germinación de las semillas de Rábano. Se observa claramente que la magnitud del efecto es significativa en las dosis de 100-0 y 75-25 de lodo residual y suelo. Estas dosis parecen tener un impacto negativo en el crecimiento y desarrollo vegetal, ya que las áreas de germinación son limitadas y menos vigorosas en comparación con las muestras de control. En las imágenes correspondientes a las dosis de 100-0 y 75-25, se evidencia una reducción considerable en el número de semillas germinadas y en la longitud de raíces. Además, se observan áreas donde las plántulas presentan deformidades, lo que indica un deterioro en la vitalidad y desarrollo de las plantas de Rábano. Por otro lado, en las dosis de 50-50, aunque se aprecia una mejora en comparación con las dosis anteriores, aún se detecta un efecto negativo en la germinación. Las áreas de germinación son más extensas que en las dosis de 100-0, pero todavía muestran signos de fitotoxicidad, como plántulas más débiles y áreas de brote menos densas en comparación con las muestras de control.

Estas observaciones sugieren que las dosis de lodo deshidratado y suelo en las proporciones 100-0 y 75-25 pueden no ser adecuadas para el óptimo desarrollo de las plantas de Rábano. Es esencial considerar estos hallazgos al evaluar la viabilidad de utilizar lodo como fertilizante en la siembra de Rábano, ya que un efecto fitotóxico puede tener implicaciones en la productividad agrícola y la salud de las plantas.

4. CONCLUSIONES

Considerando los indicadores y criterios analizados, el lodo secundario de la PTAR-Cachipay operado bajo el sistema de lodos activados modalidad aireación extendida no puede ser considerado estabilizado. En cuanto a los lodos deshidratados, puesto que el proceso de secado de los lodos en lechos de secado puede considerarse una extensión del proceso de estabilización, ya que las células vivas, sin un sustrato externo, se consumen a sí mismas. Por lo tanto, el lodo deshidratado de la PTAR-Cachipay, con un tiempo de secado de 25 días, podría considerarse estabilizado biológicamente.

De acuerdo con las características físicas, químicas y microbiológicas, los lodos secundarios presentan un alto riesgo microbiológico en cuanto a presencia de Coliformes totales y E. Coli, lo cual limita su potencial aprovechamiento en actividades como la agricultura.

El lodo secundario (no estabilizado) y lodo deshidratado (estabilizado) muestran una fitotoxicidad severa cuando se aplica en dosis lodo-suelo de 100-0, para las dosis 75-255 se evidencia una fitotoxicidad moderada para los dos tipos de lodos analizados; los tratamientos de solo suelo dosis 0-100 y dosis 50-50 reportaron una baja o nula fitotoxicidad, mientras que la dosis 25-75 mostro un positivo efecto de bioestimulación para la germinación de semillas de Rábano.

Se sugiere seguir avanzando en futuras investigaciones dirigidas al análisis de la normativa colombiana sobre el manejo de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales, además de llevar a cabo ensayos con diversos tipos de suelos, lodos y productos orgánicos. Esto contribuirá al impulso de prácticas relacionadas con la economía circular.

REFERENCIAS

- American Public Health Association, APHA., American Water Works Association, AWWA., Water Environment Federation, WEF., (2012). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22 Ed. APHA, AWWA, WEF, United States.
- Appels L, Baeyens J, Degreve J, Dewil R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*. 34:755-81.
- Cárdenas-Talero, J. L., Silva-Leal, J. A., Pérez-Vidal, A., & Torres-Lozada, P. (2022). The Influence of Municipal Wastewater Treatment Technologies on the Biological Stabilization of Sewage Sludge: A Systematic Review. *Sustainability*, 14(10), 5910.
- Charles, J., Sancey, B., Crini, M.N., Badot, P., Degiorgi, F., Trunfio, G., Crini, G. (2011). Evaluation of the phytotoxicity of polycontaminated industrial effluents using the lettuce plant (*Lactuca sativa*) as a bioindicator. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 74, 2057–2064. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.07.025>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL. (2013). Conferencia sobre el Desarrollo Sostenible en América Latina y el Caribe: seguimiento de la agenda para el desarrollo post-2015 y Río+20. CEPAL. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. <https://doi.org/Naciones unidas>
- Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. (2020). Resolução N° 498, de 19 de agosto de 2020. Define critérios e procedimentos para produção e aplicação de bio sólido em solos, e dá outras providências. Brasil. 21p.
- Daguer. G. (2003). Biosólidos y su gestión en Colombia, artículo revista ACODAL, 202
- Drechel, P., Qadir, M., & Wichelns, D. (2015). Wastewater: An economic asset in an urbanizing world. Springer.

- Empresas Municipales de Cali, EMCALI. (2006). Informes ejecutivos de operación años (2003 – 2006). Gerencia de acueducto y alcantarillado. Santiago de Cali.
- Fuentes, A., Lloréns, M., Sáez, J., Aguilar, M. I., Ortuño, J. F., & Meseguer, V. F. (2004). Phytotoxicity and heavy metals speciation of stabilised sewage sludges. *Journal of hazardous materials*, 108(3), 161-169.
- García-Alvear & Abad-Terán. (2015). Análisis preliminar de la fitotoxicidad del material particulado sedimentable de la zona urbana de Cuca. 10.18537/mskn.06.01.08
- Ghosh, P., Gupta, A., & Thakur, I. S. (2015). Combined chemical and toxicological evaluation of leachate from municipal solid waste landfill sites of Delhi, India. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 9148-9158.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC. (2022). Norma Técnica Colombiana NTC 5167. Productos para la industria agrícola y materiales usados como fertilizantes y acondicionadores. Colombia. ISO (International Organization for Standardization) 10705–1. Preview Water quality.
- Kou, Y., Zhao, Q., Cheng, Y., Wu, Y., Dou, W., & Ren, X. (2020). Removal of heavy metals in sludge via joint EDTA-acid treatment: effects on seed germination. *Science of the Total Environment*, 707, 135866.
- Leiva, A. M., Albarrán, A., López, D., & Vidal, G. (2019). Evaluation of phytotoxicity of effluents from activated sludge and constructed wetland system for wastewater reuse. *Water Science and Technology*, 79(4), 656-667.
- Mendes, P. M., Becker, R., Corrêa, L. B., Bianchi, I., Dai Prá, M. A., Lucia Jr, T., & Corrêa, E. K. (2016). Phytotoxicity as an indicator of stability of broiler production residues. *Journal of environmental management*, 167, 156-159.
- Mendes, P.M., Neto, J.C.P., Gonçalves, L.B., Macedo, S.C., Araujo, T.R., Rodrigues, A.L., Correa, L.B., Corrêa, E.K. (2020). Improvement of the phytotoxicological test with lettuce seed germination: reliability and accuracy of the method. *Braz. J. Dev.* 6, 18178–18184. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n4>.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017). Decreto Supremo N° 015–2017–Vivienda. Perú.
- Neumann, P., González, Z., Vidal, G., 2017. Sequential ultrasound and low-temperature thermal pretreatment: Process optimization and influence on sewage sludge solubilization, enzyme activity and anaerobic digestion. *Bioresour. Technol.* 234, 178–187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.029>.
- Ning, C. C., Gao, P. D., Wang, B. Q., Lin, W. P., Jiang, N. H., & Cai, K. Z. (2017). Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content. *Journal of Integrative Agriculture*, 16(8), 1819-1831.
- Noyola, A., Padilla-Rivera, A., Morgan-Sagastume, J. M., Güereca, L. P., & Hernández-Padilla, F. (2012). Typology of municipal wastewater treatment technologies in Latin America. *Clean–Soil, Air, Water*, 40(9), 926-932.
- Oleszczuk, P. (2008). Phytotoxicity of municipal sewage sludge composts related to physico-chemical properties, PAHs and heavy metals. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 69(3), 496-505.
- Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD. (2006). Test No. 208: Terrestrial Plant Test: Seedling Emergence and Seedling Growth Test, OECD Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. OECD Publishing, Paris, France. doi: 10.1787/9789264070066-en.
- Parra-Orobio, B. A., Rotavisky-Sinisterra, M. P., Pérez-Vidal, A., Marmolejo-Rebellón, L. F., & Torres-Lozada, P. (2021). Physicochemical, microbiological characterization and phytotoxicity of digestates produced on single-stage and two-stage anaerobic digestion of food waste. *Sustainable Environment Research*, 31(1), 1-10.
- Sierra, A., Simonne, E., & Treadwell, D. (2007). Principios y prácticas para el manejo de nutrientes en la producción de Hortalizas: HS1102/HS356, 7/2007. *EDIS*, 2007(17).
- Stevens, J.L., Stern, G.A., Tomy, G.T., Jones, K.C., (2003). PAHs, PCBs, PCNs, organochlorine pesticides, synthetic musks and polychlorinated n-alkanes in UK sewage sludge, survey results and implications. *Environ. Sci. Technol.* 37, 462–467.
- United Nations World Water Development, UNWWAP. (2017). The United Nations World Water Development Report 2017. Wastewater: The Untapped Resource, Paris, France
- Vargas, A. K., Calderón, J., Velásquez, D., Castro, M., & Núñez, D. A. (2020). Análisis de los principales sistemas biológicos de tratamiento de aguas residuales domésticas en Colombia. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 28(2),

315-322.

Vélez J. (2007). Los biosólidos: ¿una solución o un problema? *Producción + Limpia*, 2, 57–71.

Venegas, M., Leiva, A. M., Bay-Schmith, E., Silva, J., & Vidal, G. (2019). Phytotoxicity of biosolids for soil application: Influence of conventional and advanced anaerobic digestion with sequential pre-treatment. *Environmental Technology & Innovation*, 16, 100445.

Wijesekara, H., Bolan, N.S., Thangavel, R., Seshadri, B., Surapaneni, A., Saint, C., Hetherington, C., Matthews, P., Vithanage, M. (2017). The impact of biosolids application on organic carbon and carbon dioxide fluxes in soil. *Chemosphere* 189, 565-573. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.090>

Wilson, S.C., Duarte-Davidson, R., Jones, K.C. (1996). Screening the environmental fate of organic contaminants in sewage sludges applied to agricultural soils. 1. The potential for downward movement to groundwaters. *Sci. Total Environ.* 185, 45–57.

World Health Organization, WHO. (2017). *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una oportunidad para América Latina y El Caribe. “Patrimonio”: Economía Cultural Y Educación Para La Paz (Mec-Edupaz)*, 1(11).

Young, B.J., Riera, N.I., Beily, M.E., Bres, P.A., Crespo, D.C. (2012). Toxicity of the effluent from an anaerobic bioreactor treating cereal residues on *Lactuca sativa*. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 76, 182–186. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.09.019>.

Zhang, Q., Hu, J., Lee, D. J., Chang, Y., & Lee, Y. J. (2017). Sludge treatment: Current research trends. *Bioresource Technology*, 243, 1159–1172. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.070>