

Evaluación del crecimiento y desarrollo vegetal del rábano a partir del aprovechamiento de los lodos en un sistema de tratamiento de agua residual

Evaluation of plant growth and development of radish from the use of sludge in a wastewater treatment system

Hernán Felipe Victoria-Villalba ¹
hernan.victoria00@usc.edu.co

José Luis Cárdenas-Talero, MS.c, ²
jose.cardenas03@usc.edu.co

Jorge Antonio Silva-Leal, Dr., ²
jorge.silva04@usc.edu.co

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

Resumen

En los últimos años, el crecimiento de la población ha aumentado significativamente la demanda de recursos naturales y la generación de aguas residuales. En este contexto, es esencial integrar las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTARs) en una economía circular. Las PTARs generan subproductos reutilizables como gas, agua residual tratada y lodo. Si el lodo es tratado, se obtienen lodos estabilizados (biosólidos), los cuales contienen nutrientes, que pueden mejorar el suelo y sustituir fertilizantes químicos en la agricultura. Este estudio evalúa la idoneidad de los lodos (secundarios y deshidratados) de una PTAR con sistema de lodos activados de aireación extendida para su uso en el cultivo de rábano. Se utilizaron macetas de 0.7 L, los tratamientos incluyeron un grupo control (suelo y fertilizante mineral) y un grupo experimental con aplicaciones de lodo a diferentes tasas, según los requerimientos de nitrógeno (N) y fósforo (P) para el cultivo de rábano. Los resultados mostraron que los lodos secundarios no lograron un desarrollo óptimo en el rábano comparado con los controles. Sin embargo, los lodos deshidratados demostraron efectos beneficiosos, con incrementos significativos en el área foliar y en la biomasa de la planta en comparación con los controles. El análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey mostraron diferencias significativas en las variables, destacando los lodos deshidratados en dosificación 2P como los más efectivos. Los lodos deshidratados mejoraron significativamente el crecimiento y desarrollo del rábano, sugiriendo que son una alternativa efectiva y sostenible, promoviendo prácticas agrícolas sostenibles y reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos; sin embargo, tanto los lodos secundarios y lodos deshidratados, presentar un riesgo por contenido de patógenos, lo que plasma la necesidad de implementar tratamientos de higienización para reducir este contenido de patógenos.

Palabras Clave: Estabilidad biológica, metales pesados, patógenos, lodos, biosólidos, aprovechamiento agrícola.

Abstract

In recent years, population growth has significantly increased the demand for natural resources and the generation of wastewater. In this context, it is essential to integrate Wastewater Treatment Plants (WWTPs) into a circular economy. WWTPs produce reusable by-products such as gas, treated wastewater, and sludge. Stabilized sludge (biosolids) contains nutrients that can improve soil and substitute chemical fertilizers in agriculture. This study evaluates the suitability of secondary sludge and drying sludge from a WWTP with an extended aeration activated sludge system for use in radish cultivation. Pots of 0.7 L were used, and the treatments included a control group (soil and mineral fertilizer) and an experimental group with sludge applications at different rates, according to the nitrogen (N) and phosphorus (P) requirements for radish cultivation. The results showed that secondary sludge did not achieve optimal radish development compared to the controls. However, dehydrated sludge demonstrated beneficial effects, with significant increases in leaf area and plant biomass compared to the controls. Analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test showed significant differences in the variables, highlighting dehydrated sludge at 2P dosage as the most effective. Dehydrated sludge significantly improved the growth and development of radishes, suggesting it as an effective and sustainable alternative, promoting sustainable agricultural practices and reducing dependence on chemical fertilizers. However, both secondary and dehydrated sludge present a risk due to pathogen content, underscoring the need to implement sanitization treatments to reduce this pathogen content.

Keywords: Biological stability, heavy metals, pathogens, sludge, biosolids.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el elevado crecimiento de la población y el desarrollo urbano han generado un aumento significativo en la demanda de recursos naturales y en consecuencia la generación de una gran cantidad de residuos (Fijalkowski et al., 2017; Collivignarelli et al., 2019). Se proyecta que, a nivel mundial, en los próximos 30 años el volumen generado de residuos aumente un 70% lo que sugiere una generación de 3400 millones de toneladas de residuos anualmente (Mantilla, 2015; Kaza et al., 2018).

Ante este panorama, es imprescindible abordar el desarrollo de una economía circular, lo que implica la integración de las Plantas de Tratamiento de Agua Residual (PTARs), debido a que en estas se generan subproductos (gas, agua residual tratada y lodo) (Munhoz & Berton, 2006; Díaz-Gómez et al., 2020); los cuales con una gestión de residuos y estrategias a largo o mediano plazo se podrán reutilizar y valorarse. Actualmente, autores como Martínez-Durán et al. (2020) y Kaszycki et al. (2021) sugieren que la vinculación de las PTARs en línea con el concepto de economía circular y la noción de “waste to product” evita los impactos ambientales y motiva el aprovechamiento en la agricultura.

Ahora bien, la producción mundial de los lodos se estima en 175 Mt para el 2050 (UN-Habitat, 2008); de manera que se deben definir alternativas de aprovechamiento para los lodos generados en las PTARs, debido a que su inadecuada eliminación es un riesgo para el ambiente, generando problemas de contaminación de aguas subterráneas o degradación de los suelos (Martínez-Durán et al., 2020). Entre las estrategias para la disposición segura de los lodos generados en las PTARs se encuentran los siguientes; la incineración (Impellitteri et al., 2013), su aplicación al suelo o uso como fertilizantes (Francisco-Atencio et al., 2011). Para su uso como fertilizantes en el sector agrícola, el lodo generado en las PTARs debe ser tratado mediante procesos de estabilización y/o higienización para obtener un producto denominado biosólido (Zuluaga, 2007).

Los lodos estabilizados poseen características beneficiosas, como la cantidad de materia orgánica y nutrientes tales como nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), lo que resulta aprovechable para el mejoramiento del suelo y como sustituto parcial o total de fertilizantes químicos en cultivos agrícolas (Torres-Lozada et al., 2015). La demanda mundial de fertilizantes y la necesidad de alimentos seguirán aumentando; el uso de lodos como fuente de nutrientes ha demostrado ser beneficioso en actividades como la agricultura; además, existe preocupación por la disponibilidad a largo plazo de recursos minerales no renovables, especialmente el P (Marchuk et al., 2023). Es pertinente que el sector agrícola utilice los lodos generados en las PTARs como alternativa de fertilizante y/o abono en sus cultivos. Como lo menciona (Francisco-Atencio et al., 2011) la aplicación de los lodos estabilizados (biosólidos), resulta favorable para el crecimiento y desarrollo vegetal, crecimiento y desarrollo evaluado mediante variables como la biomasa, altura y área foliar de las plantas (Ramírez-Soler et al., 2018).

La aplicación de biosólidos al suelo se ha demostrado como una alternativa viable para su aprovechamiento en la agricultura, así como lo sugiere, el estudio de Silva-Leal et al. (2013) donde ha destacado la eficacia de los biosólidos en el crecimiento y desarrollo de diversos cultivos, como el rábano. En este contexto, el aprovechamiento de los biosólidos generados en las PTARs puede proporcionar una alternativa sostenible y rentable a los fertilizantes químicos convencionales (Torres-Lozada et al., 2015). Esto no solo beneficiaría la productividad agrícola, sino que también contribuiría a la reducción de los impactos ambientales asociados con la producción y el uso de fertilizantes químicos, siendo para nuestra región, con vocación agrícola una gran oportunidad para impulsar la agricultura sostenible (López, 2013; Badza et al., 2020).

Pese a los beneficios potenciales de los biosólidos en la agricultura, es necesario evaluar su idoneidad para el crecimiento y desarrollo del cultivo, se recomienda que los biosólidos se caractericen con relación a la estabilidad biológica, contenido de metales pesados y patógenos, ya que en general estos biosólidos deben ser sometidos a procesos de higienización como

sugiere Díaz-Gómez et al. (2020) y Martínez-Durán et al. (2020), de modo que no representen riesgos para la salud de la población y el ambiente.

En el presente estudio, se buscó evaluar la idoneidad de los lodos secundarios y deshidratados generados en un sistema de lodos activados con modalidad de aireación extendida para su potencial aprovechamiento en el cultivo de rábano. Además, se estimó el efecto que tiene el aprovechamiento de los lodos en el crecimiento y desarrollo vegetal del rábano. Los resultados obtenidos tuvieron un impacto significativo en la promoción de prácticas sostenibles de manejo de residuos, la reducción de la dependencia de los fertilizantes químicos convencionales y el fomento de una economía circular.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se empleó un diseño experimental completamente al azar y se realizaron un montaje a escala de laboratorio usando como unidad experimental materas de 0.7 L, en las instalaciones del vivero de la Universidad Santiago de Cali, donde se evaluaron los tratamientos por triplicado (control sin ningún tipo de aplicación, fertilizante mineral y aplicación de lodo). Para el caso del lodo se emplearon diferentes tasas de lodo, en función de los requerimientos de nitrógeno y fósforo para el cultivo de rábano (Silva-Leal et al., 2013).

2.1 Caracterización de los lodos generados en un sistema de lodos activados modalidad aireación extendida

Los lodos usados para este montaje provenían de la Planta de Tratamiento de Agua Residual Kachipay (PTAR-K) de la ciudad de Santiago de Cali, ubicada al sur de la ciudad. La PTAR-K está equipada con un sistema de lodos activados modalidad aireación extendida para el tratamiento de agua residual (S.O.S. AMBIENTAL INGENIERÍA S.A.S., 2020).

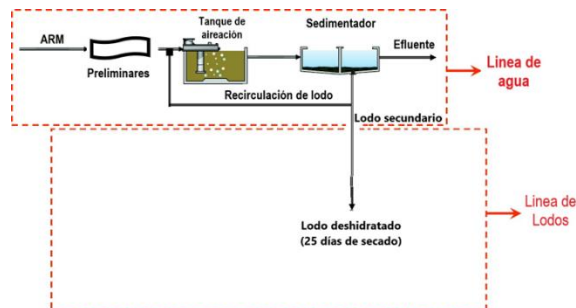


Figura 1. Ubicación de los puntos de recolección de lodos en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Kachipay (PTAR-K)

Fuente: Elaboración propia

Para iniciar la fase de experimentación en el aprovechamiento agrícola del lodo, se tomaron muestras puntuales del lodo secundario a la salida del sedimentador y del lodo deshidratado en los lechos de secado de la PTAR-K, se realizó el análisis físico, químico y microbiológico inicial, en términos de la materia orgánica y nutrientes, en el suelo (pH, humedad, N, P, CO y K) y de los lodos secundarios y lodos deshidratados (pH, Humedad, Sólidos Totales, Sólidos Volátiles, N, P, K, C, Ca y Mg, coliformes fecales, huevos de helmintos, salmonella, As, Cd, Cu, Cr, Hg, Mb, Ni, Pb, Se y Zinc), articulado con los parámetros establecidos en la reglamentación nacional (Decreto 1287 del 2014 y NTC-5167), además de seguir los protocolos definidos por APHA et al. (2017).

2.2 Ensayo de crecimiento y desarrollo vegetal del rábano

Para el seguimiento del ensayo experimental (duración 60 días), se midieron variables de crecimiento y desarrollo propias de la especie vegetal (*Raphanus sativus* L.) como número de hojas, número de semillas, biomasa de la planta y área foliar (Ramírez et al., 2014). Se utilizaron semillas de rábano, de acuerdo con las metodologías propuestas por OECD (2006), describen el rábano como una especie vegetal indicadora y de gran importancia por sus propiedades nutraceuticas y altos contenidos vitamínicos y de minerales (Pérez & Sandoval, 2014).



Figura 2. Montaje experimental para la evaluación del crecimiento y desarrollo vegetal del rábano

Fuente: Elaboración propia

La dosis de aplicación de los lodos fue calculada a partir de la caracterización inicial de N y P presente en el suelo, del requerimiento de N y P recomendados para el rábano y la concentración de N y P disponible en los lodos, como se indica en las Ecuaciones 1, 2, 3 y 4 (USEPA, 1993; CETESB, 1999; CONAGUA, 2015; Silva-Leal et al., 2021).

$$\text{Dosis de lodo en función del P} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ha}} \right) = \frac{\text{Fósforo recomendado para el cultivo} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{ha}} \right)}{\text{Fósforo disponible en el lodo} \left(\frac{\text{mg}}{\text{Kg}} \right) * 0.001}$$

Ec. 1

El Fósforo disponible se calculó con base en la Ecuación 2

$$PD = Sbp * PT * FcP$$

Ec. 2

Donde:

PD= Fósforo disponible en el lodo como P₂O₅ (mg P₂O₅/ kg).

Sbp= Solubilidad de Fósforo (valores entre 0.4 – 0.5).

PT= Fósforo total en lodo (mg PT/Kg del lodo, base seca).

FcP= Factor de conversión de asimilación. En este caso es 2,3 para convertir PT en P₂O₅.

0.001: factor de conversión de (mg/kg) a (kg/ton)

$$\text{Dosis de lodo en función del N} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ha}} \right) = \frac{\text{Nitrógeno recomendado para el cultivo} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{ha}} \right)}{\text{Nitrógeno disponible en el lodo} \left(\frac{\text{mg}}{\text{Kg}} \right) * 0.001}$$

Ec. 3

El nitrógeno disponible se calculó con base en la Ecuación 4 para una aplicación superficial

$$ND = \frac{K \min}{100} * (NTK - NH_4^+) + 0.5(NH_4^+) + (NO_3^- + NO_2^-)$$

Ec. 4

Donde:

ND: Nitrógeno disponible en el lodo (mg/kg)
 Kmin: constante de mineralización para cada lodo
 NKT: Nitrógeno Total Kjeldahl del lodo (mg/kg)
 NH₄⁺: Nitrógeno amoniacal en el lodo (mg/kg)
 NO₃⁻ y NO₂⁻: nitratos y nitritos en el lodo (mg/kg)
 0.001: factor de conversión de (mg/kg) a (kg/ton)

En cada una de las materas con suelo y diferentes dosis de lodos secundarios y deshidratados, se sembraron 5 semillas. El diseño experimental utilizado implicó la consideración de dos factores principales: tipo de lodo (secundario y deshidratado) y dosis aplicada, para un total de 11 grupos experimentales, de los cuales se hicieron replicas triples para los controles y replicas dobles para los experimentales para un total de 25 unidades experimentales. Los grupos control fueron tres: Control 0 (solo suelo), Control 1 (fertilización con una vez el requerimiento de nitrógeno por el cultivo) y Control 2 (fertilización con dos veces el requerimiento de nitrógeno por el cultivo).

En el ensayo de crecimiento y desarrollo vegetal, luego de 60 días de la siembra de las semillas, las materas se recolectaron y se llevaron a laboratorio, donde se hizo el conteo final de las semillas germinadas, hojas, medición de área foliar y biomasa de la planta (sin materia), el área foliar se determinó utilizando la aplicación PetiolePro (versión 2.0.15)(Singer et al., 2022), ver Figura 3.



Figura 3. Fotografías sobre el proceso experimental en la medición de área foliar
 Fuente: Elaboración propia

Con base en los resultados obtenidos, se realizó el análisis estadístico de los datos empleando herramientas de la estadística descriptiva y análisis de varianza ANOVA, empleando la prueba de Tukey con $p < 0.05$ para identificar diferencias estadísticas significativas. Los análisis se desarrollaron en el programa libre estadístico software R versión 4.3.1® (R Core Team, 2023).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el ensayo en el vivero de la Universidad Santiago de Cali, las condiciones experimentales se mantuvieron con una temperatura promedio de $22.90 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.56 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de $61.57 \% \pm 10.02 \%$.

3.1 Caracterización de los lodos generados en un sistema de lodos activados modalidad aireación extendida

La Tabla 1 presenta las características químicas, microbiológicas y parasitológicas tanto del lodo secundario como del lodo deshidratado de la PTAR-K. además se hace un contraste/comparación con los valores máximos permisibles por el Decreto 1287 del 2014 para la clasificación de los lodos como Clase A y Clase B

Tabla 1. Caracterización del lodo de acuerdo con el Decreto 1287 (Minvivienda, 2014)

Tipo de lodo	Variable	Unidad	Lodos PTAR-K	Clase A ¹	Clase B ¹
Lodo secundario	Arsénico Total	mg/Kg	<0.05	20	40
	Cadmio Total	mg/Kg	<0.01	8	40
	Cobre Total	mg/Kg	<0.01	1000	1750
	Cromo Total	mg/Kg	<0.01	1000	1500
	Mercurio Total	mg/Kg	<0.01	10	20
	Molibdeno Total	mg/Kg	0.06	18	75
	Níquel Total	mg/Kg	0.01	80	420
	Plomo Total	mg/Kg	0.01	300	400
	Selenio Total	mg/Kg	0.01	36	100
	Zinc Total	mg/Kg	<0.05	2000	2800
	Coliformes Fecales ¹	UFC/g ST	8.5 E+06	<1.0 E+3	<2.0 E+6
	Huevos de Helmintos Viables ¹	HHV/4g ST	4.03	<1.0	<10.0
	Salmonella Sp. ¹	NMP/4g ST	20.14	Ausencia	<1.0 E+3
	E. Coli ²	NMP/G ST	8.1 E+06	<1.0 E+3	<1.0 E+6
Lodo deshidratado	Arsénico Total	mg/Kg	<0.05	20	40
	Cadmio Total	mg/Kg	0.05	8	40
	Cobre Total	mg/Kg	0.09	1000	1750
	Cromo Total	mg/Kg	<0.01	1000	1500
	Mercurio Total	mg/Kg	<0.01	10	20
	Molibdeno Total	mg/Kg	<0.06	18	75
	Níquel Total	mg/Kg	<0.01	80	420
	Plomo Total	mg/Kg	0.15	300	400
	Selenio Total	mg/Kg	<0.01	36	100
	Zinc Total	mg/Kg	0.43	2000	2800
	Coliformes Fecales ¹	UFC/g ST	5.5 E+03	<1.0 E+3	<2.0 E+6
	Huevos de Helmintos Viables ¹	HHV/4g ST	0	<1.0	<10.0
	<i>Salmonella</i> Spp. ¹	NMP/4g ST	< 0.0006473	Ausencia	<1.0 E+3
	E. Coli ²	NMP/G ST	5.2 E+03	<1.0 E+3	<1.0 E+6

Fuente: Elaboración propia. ¹Minvivienda (2014); ² CONAMA (2020).

Singh y Agrawal (2010) señalan el riesgo de acumulación de metales pesados en la agricultura debido al uso repetido de lodos de PTARs, sin embargo, en este estudio se encontró que tanto los lodos secundarios como los deshidratados no presan riesgo por metales pesados para su aplicación en actividades agrícolas. Por otra parte, la composición microbiológica del lodo secundario generado en la PTAR-K indica que no es adecuada para su uso en la agricultura, ya que los valores de coliformes fecales, *Salmonella* spp y *E. coli* están por encima de los límites máximos permisibles. En cuanto a los metales pesados, los lodos secundarios tienden a mantenerse por debajo de los límites reglamentarios. Este comportamiento es similar a lo encontrado por Badza et al. (2020), quienes advierten sobre los efectos perjudiciales de la aplicación de lodos líquidos (lodos secundarios) para el crecimiento y desarrollo de las plantas.

En contraste, el lodo deshidratado en la PTAR-K cumple con los requisitos para ser clasificado como lodo Clase B según la normatividad colombiana, lo que lo hace apto para su uso en la agricultura, pero con restricciones. El proceso de

deshidratación reduce significativamente la materia orgánica biodegradable, la concentración de patógenos y la humedad, resultando en un material sólido, estable y seguro para la salud ambiental. Como señalan Santos et al. (2016), las concentraciones finales de estos lodos son adecuados en cuanto a contenido de nutrientes y metales pesados, haciendo del lodo deshidratado un insumo viable y beneficioso para fines agrícolas.

Además, los resultados obtenidos en una investigación realizada por Santos et al. (2022) muestran el bajo riesgo de toxicidad por presencia de metales pesados, exceptuando Zn y Cu. Sin embargo, el tratamiento térmico, aunque eliminó patógenos como *E. coli* y *Salmonella* spp, no fue suficiente para alcanzar el límite establecido para un fertilizante estable biológicamente (25 mmol O₂/Kg MO.h).

La deshidratación de los lodos generados en la PTAR-K permite transformar este residuo en un recurso que resulta ser una fuente beneficiosa de nutrientes para el suelo en aplicaciones agrícolas, siempre y cuando se cumplan las regulaciones y normativas vigentes en cuanto a la calidad del lodo (Sava et al., 2024). De acuerdo con Minvivienda (2014), las concentraciones de metales pesados (Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, Cr, Hg y As) en el lodo seco están por debajo de los límites establecidos para su uso en agricultura. Mtshali et al. (2014) sugieren que la caracterización del lodo de PTARs antes de su aplicación en la agricultura es crucial para determinar su potencial nutricional para las plantas, establecer tasas de aplicación adecuadas y evaluar los riesgos de contaminación.

La caracterización en función de la materia orgánica y nutrientes de los lodos (Tabla 2), inicialmente presenta tres parámetros de interés: pH, humedad, SV y ST, la relación SV/ST que comúnmente se usa como indicador indirecto de la actividad biológica (Cárdenas-Talero et al., 2022). Para este estudio y similar a lo que señala Santos et al. (2016) una relación SV/ST alta, sugiere disminución de los nutrientes provechosos para el desarrollo vegetal, debido a que serán los microorganismos presentes en el lodo secundario los primeros en consumirlos y solo se tendrá un remanente para la planta.

Tabla 2. Caracterización inicial del suelo, lodo secundario y lodo deshidratado

Parámetros	Suelo	Lodo secundario	Lodo deshidratado
pH	6.95	7.33	7.15
Humedad (%)	-	87.7	18.79
Sólidos Totales- ST (%)	-	12.3	81.21
Sólidos Totales Volátiles-SV (%)	-	8.78	24.71
Relación SV/ST (%)	-	71.38	30.43
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg/kg)	10133.4	10621	42525
Nitrógeno Amoniacal (mg/kg)	650.46	20.6	60
Nitratos (mg NO ₃ /kg)	-	5.20	370.44
Nitritos (mg NO ₂ /kg)	-	0.002	0.13
Fósforo Total (mg/kg)	271	2060	26427
Potasio (mg/kg)	201.17	105.2	2377
Carbono Orgánico Total (%)	86.46	3.1	10.8

Fuente: Elaboración propia

Se encontraron hallazgos similares a los de Santos et al. (2022), en cuanto a los lodos, quienes evaluaron el potencial del secado térmico para lograr saneamiento y estabilidad biológica, encontrando que las muestras poseen niveles de materia orgánica, nitrógeno (N) y fósforo (P) dentro del rango de interés para la valorización agronómica.

3.2 Ensayo de crecimiento y desarrollo vegetal del rábano

El lodo deshidratado presenta mayor disponibilidad de nitrógeno (en todas sus formas) y de fósforo, componentes que son clave de la clorofila, las proteínas y otras biomoléculas esenciales para promover el crecimiento vegetativo y mejorar el desarrollo de las hojas (Krouk y Kiba, 2020). La Tabla 3 muestra la dosificación necesaria para el cultivo de rábano y la dosis disponible.

Tabla 3. Necesidades de fósforo y nitrógeno para el cultivo de rábano

Nutriente	Dosis recomendada (Kg/ha) ¹	Dosis disponible (mg/Kg)
Fósforo	120	5575.2
Nitrógeno	80	4255.66

Fuente: Elaboración propia. ¹CETESB, (1999); Silva-Leal et al. (2013)

La cantidad adecuada de nitrógeno y fósforo recomendada para cultivos de hortalizas puede variar dependiendo del tipo de suelo, las especies de cultivos y las condiciones ambientales. Según Bouizgarne et al. (2023), la investigación indica que los cultivos de hortalizas suelen beneficiarse con aplicaciones de 100-150 Kg/ha de nitrógeno y 50-100 Kg/ha de fósforo. Estos hallazgos coinciden con los estudios de Toor (2021) y Alori et al. (2017). La Tabla 4 muestra la dosificación aplicada en el ensayo de crecimiento y desarrollo vegetal del rábano.

Tabla 4. Dosis aplicada en el cultivo de rábano por tipo de lodo

Dosificación en gramos por materia		
Dosis	Lodo secundario	Lodo deshidratado
1N	23.1	5.6
2N	46.2	11.2
1P	26.4	6.1
2P	52.8	12.2

Dosificación en ton/ha		
Dosis	Lodo secundario	Lodo deshidratado
1N	18.8	4.6
2N	37.6	9.2
1P	21.5	4.9
2P	43.0	9.9

Fuente: Elaboración propia

El rábano es una planta de rápido crecimiento que se cultiva ampliamente por sus raíces, su desarrollo y crecimiento dependen de varios factores que pueden ser medidos para evaluar la salud y productividad de las plantas (Pérez & Sandoval, 2014; Silva-Leal et al., 2013). La Figura 4 muestra el resultado final del cultivo de rábano.



LS: Lodo Secundario. LD: Lodo Deshidratado

Figura 4. Resultado gráfico de los grupos control y grupos experimentales
Fuente: Elaboración propia

La aplicación de la dosis 2P de lodo deshidratado tuvo un efecto significativo en cuanto a la germinación de las semillas (Figura 3), se observó que el uso del fertilizante con una vez el requerimiento de Nitrógeno por el cultivo es el que obtiene un promedio estable de semillas germinadas, no obstante, se observaron diferencias entre tipos de lodos, presentando menor germinación los lodos secundarios y la mayor germinación los deshidratados.

Los resultados obtenidos demuestran que la aplicación de lodos tuvo un efecto beneficioso en las variables del crecimiento y desarrollo del rábano. En primer lugar, se observó un aumento notable en el área foliar. Los ensayos dosificados con lodos deshidratados mostraron una mayor superficie de hojas en comparación con los controles, lo que indica una mayor capacidad fotosintética y un mejor desarrollo vegetativo (Liu et al., 2010; Kang et al., 2024).

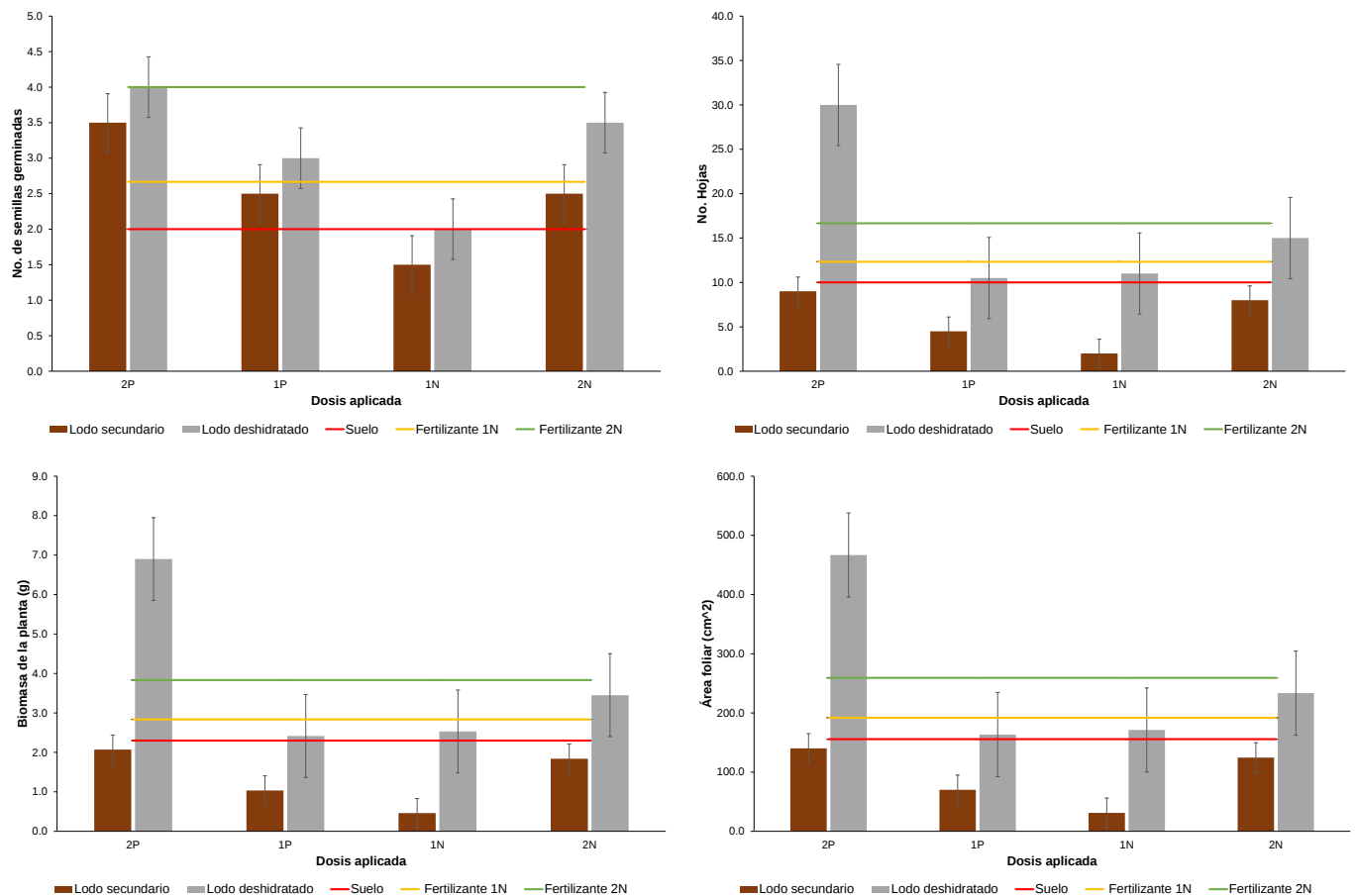


Figura 5. Comparación de variables de crecimiento y desarrollo en el cultivo de rábano bajo las diferentes dosis aplicadas de los lodos
Fuente: Elaboración propia

Es visible que el uso de lodos secundarios no logra en el cultivo del rábano un desarrollo vegetal óptimo respecto a los controles ya que no logra superar los valores promedios alcanzados por los ensayos que usaron fertilizantes químicos convencionales como catalizadores en el desarrollo del cultivo del rábano. Por otro lado, son los lodos deshidratados los que demuestran efectos benéficos para el desarrollo vegetal del rábano. Para el área foliar, las materas dosificadas con dos veces el requerimiento de fósforo por el cultivo (2P) y dos veces el requerimiento de nitrógeno por el cultivo (2N) presentan un incremento, respecto al Control 1, del 143.2% y 21.6% respectivamente. Del mismo modo, el grupo tratado con dos veces el requerimiento de fósforo (2P) es el único grupo que supera en un 80.02% al Control 2.

En cuanto al número de hojas, se observa un comportamiento similar, en las materas dosificadas con los lodos deshidratados. El máximo número promedio de hojas alcanzado (30 hojas) lo muestra el grupo con dos veces el requerimiento de fósforo (2P), además en estos grupos se obtuvieron hojas más regulares y de color intenso comparadas con las de los grupos tratados con lodos secundarios, donde el máximo número promedio de hojas, para un total de 9, fue alcanzado por el grupo dosificado con el doble de requerimiento de fósforo (2P).

La biomasa de la planta se vio beneficiada de manera positiva por la aplicación de los lodos. No obstante, se observaron variaciones entre los tipos de lodos, siendo los lodos secundarios los menos efectivos y los lodos deshidratados los más efectivos. Esta variación se atribuye al proceso de secado térmico, el cual incrementa el contenido de nitrógeno mineralizado en los lodos, convirtiéndolos en una fuente eficiente y rápida de N para las plantas. (Silva-Leal et al., 2013). La Tabla 5 muestra los resultados el análisis de varianza ANOVA y prueba de Tukey.

Tabla 5. Análisis de varianza ANOVA y prueba Tukey de los diferentes tratamientos experimentales

Análisis de Varianza para No. de semillas germinadas					
Tipo de Lodo	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
	10	16,193	16,193	2,47	0,059
Análisis de Varianza para No. de hojas					
Tipo de Lodo	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
	10	1112,3	111,23	4,83	0,004
Análisis de Varianza para biomasa de la planta					
Tipo de Lodo	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
	10	58,84	5,884	4,83	0,004
Análisis de Varianza para el área foliar					
Tipo de Lodo	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
	10	269305	26930	4,83	0,004
Información utilizando el método de Tukey y una confianza de 95%*					
Tipo de tratamiento	No. Semillas Agrupación	No. Hojas Agrupación	Biomasa Agrupación	Área foliar Agrupación	
Suelo	A	A	A	A	
Fertilizante 1N	A	A	A	A	
Fertilizante 2N	A	A-B	A-B	A-B	
Lodo secundario - 1N	A	A	A	A	
Lodo secundario - 1P	A	A	A	A	
Lodo secundario - 2N	A	A	A	A	
Lodo secundario - 2P	A	A	A	A	
Lodo deshidratado - 2N	A	A-B	A-B	A-B	
Lodo deshidratado - 1N	A	A	A	A	
Lodo deshidratado - 1P	A	A	A	A	
Lodo deshidratado - 2P	A	B	B	B	

*Los tratamientos que no comparten una letra son estadísticamente diferentes. Gracias de libertad (GL)

El valor $p < 0.05$ en cada una de las variables respuesta indica que existen diferencias significativas entre tratamientos que no comparten una letra, particularmente los lodos deshidratados - 2P muestran un desempeño superior sobre las variables número de hojas, biomasa de la planta y área foliar, lo que es acorde con las necesidades para el crecimiento del rábano, es decir el rábano requiere más fosforo disponible a comparación con el nitrógeno disponible en los lodos para su adecuado crecimiento.

4. CONCLUSIONES

La caracterización de los lodos generados en la PTAR-K muestra que el lodo deshidratado cumplió con los estándares para ser clasificado como lodo Clase B, adecuado para su uso en agricultura, pero con restricciones. En contraste, el lodo secundario mostró niveles superiores a los límites permisibles de coliformes fecales y otros microorganismos, haciendo inapropiado su uso directo en actividades agrícolas, por lo cual tanto al lodo secundario como al lodo deshidratado se les deben aplicar procesos de higienización para reducir o eliminar patógenos.

La aplicación de lodos demostró tener efectos positivos significativos en variables clave del crecimiento del rábano, se observó un incremento en el número de hojas, biomasa de la planta y área foliar y en las materas dosificadas con lodos deshidratados, especialmente aquellos dosificados con una o dos veces el requerimiento de fósforo. Este incremento fue notablemente superior al observado en los grupos tratados con lodos secundarios o los grupos tratados

con fertilizante convencional.

Los resultados muestran que los lodos deshidratados, especialmente cuando se aplicaron dos veces el requerimiento de fósforo, superaron en promedio el desarrollo vegetal alcanzado por los controles que utilizaron fertilizantes químicos convencionales. Esto sugiere que los lodos deshidratados pueden ser una alternativa efectiva y sostenible para mejorar el crecimiento del rábano, reduciendo la dependencia de fertilizantes químicos y promoviendo prácticas agrícolas más sostenibles.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación ha sido financiada por la Dirección General de Investigaciones de la Universidad Santiago de Cali bajo el proyecto de investigación No. 820-621120-1647.

REFERENCIAS

- Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture. *Frontiers In Microbiology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- American Public Health Association, APHA., American Water Works Association, AWWA., Water Environment Federation, WEF., (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22 Ed. APHA, AWWA, WEF, United States.
- Badza, T., Tesfamariam, E. H., & Cogger, C. G. (2020). Agricultural use suitability assessment and characterization of municipal liquid sludge: Based on South Africa survey. *Science of the total environment*, 721, 137658.
- Bouizgarne, B., Bakki, M., Boutasknit, A., Banane, B., Ouarrat, H. E., Maalem, S. A. E., Amenzou, A., Ghousmi, A., & Meddich, A. (2023). Phosphate and potash solubilizing bacteria from Moroccan phosphate mine showing antagonism to bacterial canker agent and inducing effective tomato growth promotion. *Frontiers In Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.970382>
- 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*, 5910.
- Collivignarelli, M. C., Canato, M., Abba, A., & Miño, M. C. (2019). Biosolids: What are the different types of reuse? *Journal of Cleaner Production*, 117844.
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA., & Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT. (2015). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Tratamiento y Disposición de Lodos*. México. <https://www.gob.mx/conagua>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, CETESB. (1999). Norma Técnica P4.230. Aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação. Manual. São Paulo, Brasil, 33p. <Http://www.cetesb.sp.gov.br/servicos/normas-tecnicas-cetesb/normas-tecnicas-vigentes/> (Accessed 30 July 2019).
- 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 biossólido em solos, e dá outras providências. Brasil. 21p.
- Díaz Gómez, J., Cifuentes Osorio, G. R., Sierra Cárdenas, E., Villalobos Enciso, J. É., Lara Mendoza, C. R., Silva Leal, J. A., . . . Souza Teixeira, R. (2020). De la generación al aprovechamiento sostenible de lodos y biosólidos de tratamiento de aguas y aguas residuales. Tunja - Boyacá: Ediciones Universidad de Boyacá.
- Fijalkowski, K., Rorat, A., Grobelak, A., & Kacprzak, M. J. (2017). The presence of contaminations in sewage sludge – The current situation. *Journal of Environmental Management*, 203(November), 1126–1136. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.05.068>
- Francisco Atencio, J., Ramos Matías, P., & Aguirre Yato, G. (2011). Aprovechamiento agrícola del lodo generado en la PTAR de Puente Piedra - Lima. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 66-74.
- Impellitteri, C. A., Harmon, S., Silva, R. G., Miller, B. W., Scheckel, K. G., Luxton, T. P., ... & Panguluri, S. (2013). Transformation of silver nanoparticles in fresh, aged, and incinerated biosolids. *Water research*, 47(12), 3878-3886.

- Kang, Y., Wu, Q., Pan, G., Yang, H., Li, J., Yang, X., & Zhong, M. (2024b). High daily light integral positively regulate photosynthetic capacity through mediating nitrogen partitioning and leaf anatomical characteristic in flowering Chinese cabbage. *Scientia Horticulturae*, 326, 112715.
- Kaszycki, P., Glodniok, M., & Petryszak, P. (2021). Towards a bio-based circular economy in organic waste management and wastewater treatment – The Polish perspective. *New Biotechnology*, 80-89.
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications.
- Krouk, G., & Kiba, T. (2020). Nitrogen and Phosphorus interactions in plants: from agronomic to physiological and molecular insights. *Current Opinion In Plant Biology*, 57
- Liu, F., Yang, W., Wang, Z., Xu, Z., Liu, H., Zhang, M., Liu, Y., An, S., & Sun, S. (2010). Plant size effects on the relationships among specific leaf area, leaf nutrient content, and photosynthetic capacity in tropical woody species. *Acta Oecologica*, 36(2).
- López, A. (2013). Restauración de suelos degradados mediante la aplicación de biosólido producido en la planta de tratamiento de aguas residuales El Salitre en Bogotá D.C. Universidad Libre.
- 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. *Revista ESAICA*, 1(1), 18. <https://doi.org/10.15649/24225126.267>
- Marchuk, S., Tait, S., Sinha, P., Harris, P., Antille, D. L., & McCabe, B. K. (2023). Biosolids-derived fertilisers: A review of challenges and opportunities. *Science of the Total Environment*, 875, 162555.
- Martínez Durán, A. d., Castillo Jáquez, J. d., Rodríguez Núñez, V. A., & Orgaz Agüera, F. (2020). Aprovechamiento de los biosólidos procedentes de plantas de tratamiento de aguas urbanas en agricultura. Estudio de caso en República Dominicana. *Revista DELOS*, 12.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Minvivienda. (2014). Decreto 1287 del 10 de Julio de 2014. [http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/JULIO/10/DECRETO 1287 DEL 10 DE JULIO DE 2014.pdf](http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/JULIO/10/DECRETO%201287%20DEL%2010%20DE%20JULIO%20DE%202014.pdf)
- Mtshali, J. S., Tiruneh, A. T., & Fadiran, A. O. (2014). Characterization of sewage sludge generated from wastewater treatment plants in Swaziland in relation to agricultural uses. *Resources and Environment*, 4(4), 190-199.
- Munhoz, O., & Berton, S. (2006). Disponibilidade de Fósforo para o milho em solo que recebeu lodo de esgoto. En W. Bettiol & O. Camargo (Ed.), *Lodo de esgoto: impactos ambientais na agricultura* (pp. 91-124). Jaguariúna: Embrapa meio
- 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.
- Peréz, K. L. A., & Sandoval, E. H. P. (2014). Comportamiento fisiológico de plantas de rábano (*Raphanus sativus* L.) sometidas a estrés por salinidad. *Conexión agropecuaria JDC*, 4(2), 11-22.
- R Core Team (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
- Ramírez, J., Insuasty, O., & Viveros, C. (2014). Comportamiento agroindustrial de diez variedades de caña de azúcar para la producción de panela en Santander, Colombia. *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.* 15(2) 183-195
- Ramírez-Soler, C. H., Magnitskiy, S., Melo, S. E., & Melgarejo, L. M. (2018). Efecto de dosis de nitrógeno, fósforo y potasio sobre el crecimiento del tomate de árbol (*Solanum betaceum* Cav.) en etapa vegetativa. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 12(1), 31-40.
- S.O.S. AMBIENTAL INGENIERÍA S.A.S. (2020). Manual de operación y mantenimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales Kachipay. Cali, Colombia.
- Santos, A. F., Alvarenga, P., Gando-Ferreira, L. M., & Quina, M. J. (2022). Agronomic valorization of sewage sludge: The potential of thermal drying to achieve sanitation and biological stability. *Sustainable Chemistry And Pharmacy*, 27, 100646.
- Santos, D. S., Teshima, E., Dias, S. M. F., Araújo, R. A., & Silva, C. M. R. D. (2016). Efeito da secagem em leito nas características físico-químicas e microbiológicas de lodo de reator anaeróbico de fluxo ascendente usado no tratamento de esgoto sanitário. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22, 341-349.
- Sava, C., Sava, C., Sava, C., Sava, C., Sava, C., Sava, C., & Sava, C. (2024). Physico-chemical characterization and possible

- uses of sludge processed from an urban sewage treatment plant. *Heliyon*, 10(8), e29576
- Silva-Leal, J. A., Fernando Bedoya, D., & Torres-Lozada, P. (2013). Evaluación del Potencial de Aplicación de Biosólidos Higienizados en el Cultivo de Rábano. *Acta Agronómica*, 155-164.
- Silva-Leal, J., Pérez-Vidal, A., & Torres-Lozada, P. (2021). Effect of biosolids on the nitrogen and phosphorus contents of soil used for sugarcane cultivation. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06360>
- Singer, S. D., Burton Hughes, K., Subedi, U., Dhariwal, G. K., Kader, K., Acharya, S., ... & Hannoufa, A. (2022). The CRISPR/Cas9-mediated modulation of SQUAMOSA PROMOTER-BINDING PROTEIN-LIKE 8 in alfalfa leads to distinct phenotypic outcomes. *Frontiers in Plant Science*, 12, 774146.
- Singh, R. P., & Agrawal, M. (2010). Variations in heavy metal accumulation, growth and yield of rice plants grown at different sewage sludge amendment rates. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 73(4), 632-641.
- Toor, M. D., Adnan, M., Rehman, F. U., Tahir, R., Saeed, M. S., Khan, A. U., & Pareek, V. (2021). Nutrients and their importance in agriculture crop production; A review. *Ind. J. Pure App. Biosci*, 9(1), 1-6.
- Torres-Lozada, P., Silva-Leal, J. A., Parra-Orobio, B. A., Cerón-Castro, V., & Madera-Parra, C. A. (2015). Influencia de la Aplicación de Biosólidos sobre el suelo, la morfología y productividad del cultivo de caña de azúcar. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 69-79.
- United Nations Human Settlements Programme, UN-Habitat. (2008). Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource. (R. J. Leblanc, P. Matthews, & R. P. Richard, Eds.). Nairobi. Retrieved from <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/cdlodos/pdf/wastewatersludge117.pdf>
- United States Environmental Protection Agency, USEPA. (1993). Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. 40 CFR Part 503. EPA, 348.
- Zuluaga, J. (2007). Los biosólidos: ¿una solución o un problema? *Producción Más Limpia*, 57-71.