

Artículo Original

EVALUACIÓN FÍSICOQUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DE LODOS RESIDUALES EN BÁVARO, REPÚBLICA DOMINICANA: VIABILIDAD PARA SU USO COMO ENMIENDA AGRÍCOLA

PHYSICOCHEMICAL AND MICROBIOLOGICAL EVALUATION OF SEWAGE SLUDGE IN BÁVARO, DOMINICAN REPUBLIC: VIABILITY FOR USE AS AGRICULTURAL AMENDMENT

Gabriel Emilio Reyes Cedeño^{1, 2*} <https://orcid.org/0009-0001-4095-3864>

Aris Mendis Gómez Pérez^{1, 2} <https://orcid.org/0000-0002-2154-7238>

Enmanuel Echavarría Lluberes^{1, 2} <https://orcid.org/0000-0002-3891-9456>

Saskia Santana Jiménez^{1, 2} <https://orcid.org/0009-0002-1412-4074>

¹ Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Santo Domingo, Santo Domingo, República Dominicana.

² Laboratorio de la Dirección General de Aduanas, Santo Domingo, República Dominicana.

Recibido: Mayo 18, 2026; Revisado: Julio 5, 2026; Aceptado: Agosto 17, 2026

RESUMEN

Introducción:

El manejo adecuado de los lodos residuales generados en plantas de tratamiento de aguas residuales es un reto ambiental y sanitario creciente, especialmente en sectores turísticos como Bávaro, Punta Cana, donde la actividad hotelera genera importantes volúmenes de aguas residuales domésticas.

Objetivo:

Determinar el potencial de uso agrícola del lodo residual producido por la planta de tratamiento de un complejo hotelero, mediante su caracterización físicoquímica y microbiológica.

Materiales y Métodos:

Se aplicó un enfoque cuantitativo con diseño descriptivo. Protocolos de muestreo y análisis de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Métodos de análisis gravimétricos. Espectroscopía de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente. Espectrofotometría ultravioleta-visible. Microscopía de barrido



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Gabriel Reyes, Email: gaboerc@gmail.com



electrónico con espectroscopía de rayos X de energía dispersiva.

Resultados y Discusión:

Los resultados indicaron que las concentraciones de metales pesados cumplieron con los límites USEPA 40 CFR Parte 503 y mostraron gran valor agronómico (MO 76,09%, N 2,26%, P 1,67%, K 0,73%). Sin embargo, se restringe su clasificación como biosólido Clase A por la alta carga microbiana que incluye 200 huevos de helminto/4g ST, así como el incumplimiento de la reducción de atracción de vectores (STV 88,13%, ST 11,97%).

Conclusiones:

Se concluye que el lodo residual posee inocuidad por metales y potencial agronómico, pero su uso directo está restringido por inestabilidad orgánica y riesgo sanitario. Es obligatorio aplicar procesos de estabilización e higienización como compostaje o la digestión anaerobia termofílica para su transformación en un biosólido seguro.

Palabras clave: agricultura sostenible; caracterización fisicoquímica; lodos de depuradora; metales pesados; uso agrícola.

ABSTRACT

Introduction:

The proper management of residual sludge generated in wastewater treatment plants is an increasing environmental and health challenge, especially in tourist areas like Bávaro, Punta Cana, where hotel activity generates significant volumes of domestic wastewater.

Objective:

To determine the agricultural use potential of the sewage sludge produced by a hotel complex treatment plant, through its physicochemical and microbiological characterization.

Materials and Methods:

A quantitative approach with descriptive design was applied. Sampling and analysis protocols from the United States Environmental Protection Agency (USEPA) were followed. Gravimetric analysis methods, inductively coupled plasma optical emission spectroscopy, ultraviolet-visible spectrophotometry, and scanning electron microscopy with energy-dispersive X-ray spectroscopy.

Results and Discussion:

The results indicated that heavy metal concentrations compiled with USEPA 40 CFR Part 503 limits and showed high agronomic value (OM 76,09%, N 2,26%, P 1,67%, K 0,73%). However, its classification as Class A biosolids is restricted due to the high microbial load, which includes 200 helminth eggs/4g TS, as well as the non-compliance with vector attraction reduction (TVS 88,13%, TS 11,97%).

Conclusions:

It is concluded that the residual sludge is safe regarding heavy metals and has agronomic potential, but its direct use is restricted due to organic instability and health risks. It is mandatory to apply stabilization and hygienization processes such as composting or thermophilic anaerobic digestion for its transformation into a safe biosolid.

Keywords: sustainable agriculture; physicochemical characterization; sewage sludge; heavy metals; agricultural use.

1. INTRODUCCIÓN

La generación y gestión de lodos residuales constituyen uno de los desafíos ambientales más relevantes a nivel mundial. El aumento de las cargas orgánicas debido a la urbanización acelerada y el incremento de la demanda hídrica han intensificado la necesidad de desarrollar estrategias sostenibles para su gestión.

Diversos estudios han documentado que los lodos residuales pueden contribuir como un recurso valioso a la agricultura (Poornima et al., 2022; Chaturvedi et al., 2022; Sharma et al., 2022), estos autores coinciden en que luego de realizar una evaluación de las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas, los lodos residuales constituyen un importante recurso en la agricultura sostenible debido a su adición de materia orgánica, macro y micronutrientes en el suelo, reducción del daño ecológico y maximización de la productividad agrícola. En este contexto, su aplicación podría mejorar las propiedades fisicoquímicas del suelo y reducir o eliminar el uso de fertilizantes químicos (Martínez et al., 2020).

Sin embargo, los lodos residuales pueden contener altas concentraciones de metales pesados que restringen su aplicación en el suelo, dichos elementos no son biodegradables, pueden conducir a su acumulación y ser tóxicos para el ecosistema (Hui et al., 2020).

La buena gestión y manejo de los lodos residuales puede ser de gran provecho a nivel ambiental y económico, permitiendo la aplicación de la economía circular (Mabrouk et al., 2023). Los fertilizantes son imprescindibles para la producción de alimentos, de manera que es necesario buscar alternativas en recursos renovables para la elaboración de estos, proyectando así el crecimiento de la agricultura y el cuidado ambiental al mismo tiempo (Chojnaka et al., 2023).

La agricultura es una de las bases de la actividad económica en la República Dominicana. El suelo dominicano es un 12,2% árido, un 15,2% semiárido y un 42,2% subhúmedo seco, sin embargo, el 50% de éste es usado en actividades agrícolas (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

Cabe destacar, que la República Dominicana no cuenta con una regulación interna que promueva el uso de los lodos residuales domésticos. Debido a la ausencia de incentivos o regulaciones que promuevan su reutilización, los lodos residuales son dispuestos en rellenos sanitarios, lo que limita la transición a prácticas más sostenibles.

Considerando lo anterior, la presente investigación tuvo como propósito Determinar el potencial de uso agrícola del lodo residual producido por la planta de tratamiento de un complejo hotelero, mediante su caracterización fisicoquímica y microbiológica.

Con este fin, se identificaron metales pesados, nutrientes esenciales y parámetros microbiológicos y fisicoquímicos, y se compararon los resultados obtenidos con los criterios de la normativa USEPA 40 CFR Parte 503. Este enfoque permite determinar si los lodos residuales presentan las condiciones para ser usados como biosólidos en agricultura sostenible y proponer un estándar de referencia para el país. Este estudio genera una línea base para la gestión de residuos hoteleros en el país, siendo la primera evaluación reportada para la zona hotelera y turística de Bávaro, Punta Cana.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sitio de estudio y muestreo

La planta de tratamiento de aguas residuales del complejo hotelero está ubicada en la ciudad de Punta Cana, República Dominicana (Figura 1), y trata las aguas residuales provenientes de las cocinas, duchas y sanitarios de cinco hoteles y resorts del complejo.

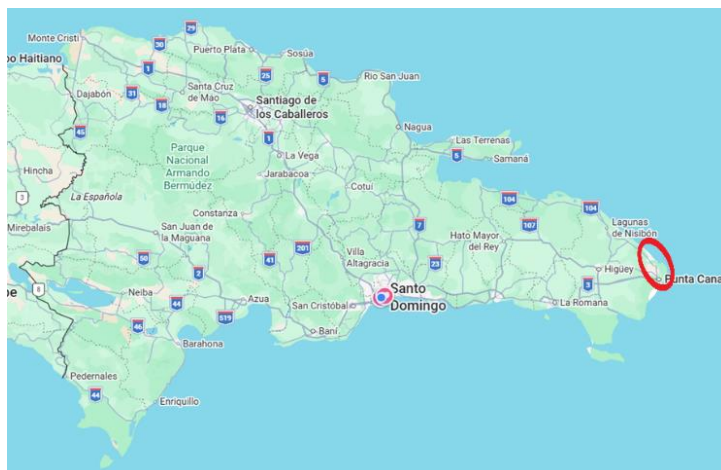


Figura 1. Ubicación macro-geográfica de la zona de estudio en la región turística de Bávaro-Punta Cana, provincia de La Altagracia, República Dominicana

Esta estructura cuenta con equipos de tamizado y regulación de caudal, reactores biológicos, sistemas de aireación, sistemas de recirculación, sistemas de filtración y un sistema de deshidratación de lodos con filtro prensa (Figura 2), dichas instalaciones tratan aproximadamente un caudal promedio diario de 5500 m³/día. Tras el tratamiento del agua residual se produce una carga de sólidos de aproximadamente 510 kg de lodo seco prensado promedio por día.

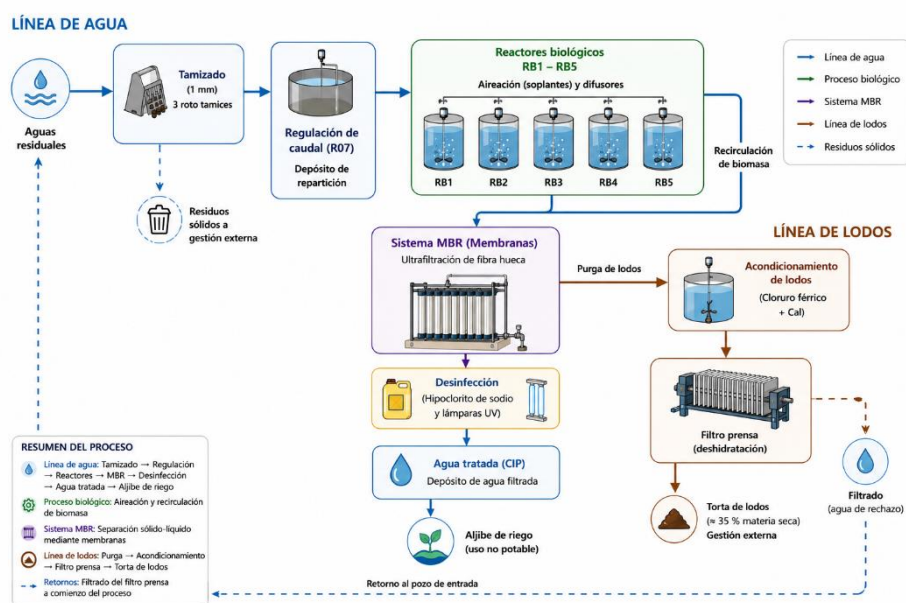


Figura 2. Esquema del proceso de la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas del complejo hotelero

El complejo cuenta con tres tanques contenedores de lodo residual, uno es usado para el desarenador, y los dos restantes se usan de manera intermitente para la recolección del lodo generado en el proceso de tratamiento. El procedimiento de muestreo fue adaptado de la guía EPA 833-B-89-100 (USEPA, 1989; USEPA, 1994) para muestreo y análisis de lodos residuales, tomando en cuenta la cantidad, profundidad y área superficial del contenedor.

Para garantizar la representatividad espacial, el contenedor fue dividido en cuatro cuadrantes homogéneos y se tomó una muestra del centro de cada uno desde la superficie hasta el fondo, evitando tomar la fase acuosa de percolación, siendo cuatro muestras tomadas de aprox. 300 g cada una. La homogenización de las cuatro submuestras dio como resultado una muestra compuesta de aproximadamente 1200 g (Figura 3). Ya que el contenedor almacena el lodo generado de manera acumulativa siguiendo el régimen operativo estable del complejo, la muestra representa la carga compuesta del periodo.

Este método es no probabilístico intencional, representa condiciones específicas como la composición y estado del lodo presente en el contenedor. A partir de esta muestra compuesta se realizaron las pruebas de salmonela (*Salmonella sp.*), coliformes fecales (*E. coli*), huevos de helminto, pH, materia orgánica (MO), sólidos totales (ST), sólidos totales volátiles (STV), arsénico, cobre, cadmio, plomo, selenio, zinc, molibdeno, níquel, magnesio, potasio, fósforo, calcio y nitrógeno.



Figura 3. Aspecto físico de la muestra compuesta integrada de lodo residual

2.2. Análisis de parámetros microbiológicos

Las determinaciones microbiológicas fueron realizadas utilizando los métodos selectivos CHROMagar™ NT-EXT-004 (2024a) para salmonela (*Salmonella sp.*) y CHROMagar™ NT-EXT-016 (2024b) para coliformes fecales (*E. coli*), complementados con tinción de Gram como prueba bioquímica. Para estos estudios se empleó una cabina de flujo laminar marca LABCONCO, modelo 3980303, una incubadora marca Yamato, modelo IC103C(W) y un microscopio óptico marca Zeiss, modelo Lab.A1. Asimismo, la determinación parasitológica para huevos de helminto se efectuó usando el método de flotación y conteo, utilizando el mismo microscopio óptico para la observación y cuantificación.

2.3. Análisis de parámetros fisicoquímicos

Los ST (105 °C) y los STV (550 °C) fueron cuantificados con determinaciones gravimétricas de acuerdo con el método EPA 1684 (USEPA, 2001). Para ello se empleó un horno de convección natural marca Thermo Scientific modelo Heratherm OGS100, una mufla marca Thermo Scientific, modelo PCQMC-1 y una balanza analítica marca Ohaus, modelo Discovery DV215CD.

Para la cuantificación de metales pesados (As, Cu, Cd, Pb, Se, Zn, Mo y Ni,) y nutrientes esenciales (Mg, K, P y Ca) la muestra fue sometida a digestión ácida siguiendo el método EPA 3051A (USEPA, 1996). La digestión se llevó a cabo empleando ácido nítrico concentrado Trace Metal Fisher Chemical y en un digestor de microondas marca Milestone, modelo ETHOS UP. La muestra digestada fue analizada mediante el método EPA 6010C SW-846 (USEPA, 2007), para el cual se empleó un espectrómetro de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) marca PerkinElmer, modelo Optima 800, junto con estándares elementales PerkinElmer Pure (Figura 4).

El contenido de nitrógeno se determinó mediante microscopía electrónica de barrido con espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (SEM-EDX), utilizando un instrumento marca FEI, modelo Quanta FEG-650 (Figura 4). El pH se midió utilizando el método EPA 9045D (USEPA, 2004), empleando un pH-metro marca HACH, modelo HQ411d Benchtop Meter. Finalmente, la MO se analizó utilizando el método revisado de Walkley & Black basado en la determinación de carbono oxidable presente en el lodo, para este análisis se utilizó un espectrofotómetro UV/vis marca HACH modelo DR3900.

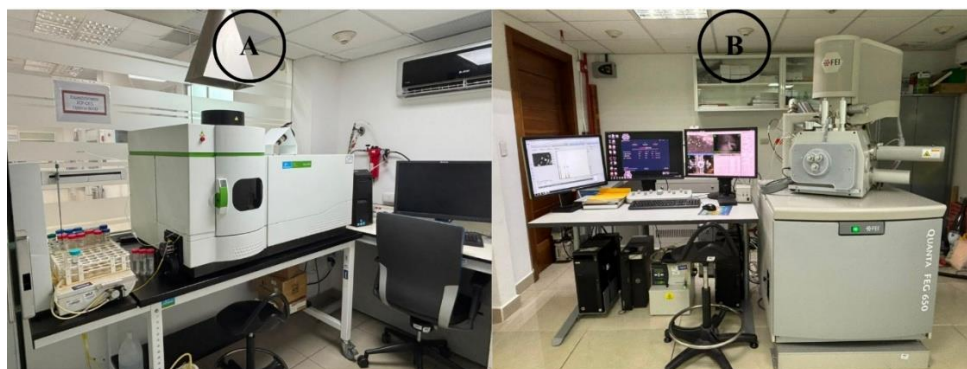


Figura 4. Infraestructura analítica utilizada en la caracterización de los lodos residuales. A) Espectrómetro de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) para el análisis de metales pesados y nutrientes. B) Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) empleada para el análisis de nitrógeno

2.4. Análisis y procesamiento de los datos

Los datos generados durante la investigación fueron procesados con la técnica matemática de estadística descriptiva, con un enfoque descriptivo-comparativo, es decir, caracterizando y describiendo el comportamiento de las variables del estudio. Se utilizaron hojas de cálculo en Microsoft Excel para la tabulación inicial y el análisis descriptivo, aquí se calcularon medidas de tendencia central como la media aritmética y se utilizaron rangos mínimos y máximos permisibles.

Los resultados obtenidos del estudio y el análisis de los datos se compararon con los límites establecidos por la USEPA para determinar el grado de cumplimiento con la normativa 40 CFR Parte 503 para la disposición de lodos residuales en suelos agrícolas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Atendiendo a los resultados obtenidos del análisis microbiológico y parasitológico, en la tabla 1 se observa que se obtuvo un valor de $1,4 \times 10^6$ NMP/g ST para coliformes fecales y $2,0 \times 10^4$ NMP/4g ST para *Salmonella sp.*, estos resultados se encuentran significativamente por encima de los límites de la norma 40 CFR parte 503 (USEPA, 1993) para biosólidos Clase A. En términos de coliformes fecales, el lodo residual en estudio aplicaría a la Clase B, debido a que su densidad es menor a $2,0 \times 10^6$ NMP/g ST. Por su parte, la concentración de *Salmonella sp.* no interfiere con una posible clasificación en la Clase B, ya que la normativa no establece límites para este patógeno bajo dicha categoría.

Tabla 1. Resultados microbiológicos y parasitológicos de los lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas en Bávaro, República Dominicana

<i>Microorganismo</i>	<i>Resultado</i>	<i>Límite USEPA 503 (Clase A)</i>	<i>Límite USEPA 503 (Clase B)</i>	<i>Unidad de medida</i>
Coliformes fecales	$1,4 \times 10^6$	< 1000	< 2000000	NMP/g ST
<i>Salmonella sp.</i>	$2,0 \times 10^4$	< 3	N/A	NMP/4g ST
Huevos de helminto	200	< 1	N/A	Unid/4g ST

Nota. Resultados expresados en base a peso seco. N/A indica que no aplica para esta categoría. Los valores con '<' indican valor máximo aceptable. Los límites de referencia provienen de la USEPA 40 CFR Parte 503 para lodos residuales Clase A y B. NMP = número más probable. ST = sólidos totales.

El resultado de huevos de helminto fue de 200 unid/4g ST, este resultado es superior a los reportados en otras investigaciones (Sabbahi et al., 2022; Díaz et al., 2024). La elevada concentración de huevos de helmintos presenta un riesgo crítico de salud pública en países en desarrollo, estos pueden permanecer en el suelo por largos periodos de tiempo debido a sus cubiertas estructurales resistentes, lo que favorece la transferencia de contaminantes en agroecosistemas (Gyawali, 2018).

Los resultados obtenidos indican una elevada carga parasitaria y reafirman la necesidad de aplicar tratamientos de higienización previo a su reutilización en el suelo. La digestión anaerobia, el compostaje y los pretratamientos físicos, como los tratamientos térmicos, representan rutas potenciales para la higienización de lodos residuales. Su eficacia depende de las características del material y los parámetros operativos. La selección debe considerar la carga microbiana inicial, el contenido de sólidos totales, el volumen generado y la demanda energética y económica del proceso (Machnicka & Grübel, 2023; Zhou et al. 2024, Kowsari et al., 2025).

Los resultados obtenidos del análisis de metales pesados en las muestras de lodo residual se observan en la tabla 2, estos valores se contrastan con los límites máximos permitidos por la norma (USEPA, 1993). El orden ascendente de concentraciones es como sigue $Mo < Ni < Pb < Cu < Zn$, lo que demuestra una predominancia de cobre y zinc en los lodos. En el análisis de selenio, arsénico y cadmio se obtuvieron valores por debajo de los límites de cuantificación del instrumento, 0,01 mg/kg, (para Se y As) y 0,0001 mg/kg (para Cd). De manera general los valores se encuentran por debajo de los límites máximos establecidos por la USEPA.

Tabla 2. Resultados de metales pesados en los lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas en Bávaro, República Dominicana

Metales	Concentración	Limite USEPA 503	Unidad de medida
Arsénico	< 0,01	75	mg/kg
Cadmio	< 0,0001	85	mg/kg
Cobre	170,13 ± 18,56	4300	mg/kg
Plomo	12,28 ± 0,39	840	mg/kg
Selenio	< 0,01	100	mg/kg
Molibdeno	1,42 ± 0,21	75	mg/kg
Níquel	11,18 ± 0,75	420	mg/kg
Zinc	492,01 ± 12,89	7500	mg/kg

Nota. Resultados expresados en base a peso seco. Todos los análisis se realizaron por triplicado y los resultados se expresaron como el valor promedio ± la desviación estándar. Los valores con ‘<’ indican concentraciones por debajo del límite de cuantificación del instrumento. Los límites de referencia provienen de la USEPA 40 CFR Parte 503.

Estos resultados son comparables con los informados en otros estudios en matrices similares (Martínez et al., 2020; Díaz et al., 2024). Asimismo, poseen gran importancia puesto que, a pesar de las ventajas que ofrece el uso de biosólidos en agricultura, también puede representar una amenaza cuando nos referimos a las concentraciones de metales pesados (Achkir et al. 2023). Los metales pesados en altas concentraciones pueden dañar la salud humana y de los cultivos, afectando diferentes órganos, las plantas y la cadena trófica (Angon et al., 2024). No obstante, los lodos residuales provenientes de plantas de tratamiento que reciben aguas residuales domésticas, como las plantas rurales, tienden a ser los más apropiados para uso en agricultura, esto debido a su baja concentración de metales tóxicos (Olejnik, 2024).

En la tabla 3 se presentan los resultados correspondientes al contenido de nutrientes y a los parámetros fisicoquímicos de las muestras analizadas, estos permiten evaluar su valor agronómico y su comportamiento potencial en el suelo. El orden ascendente de concentración porcentual de nutrientes se presenta de la siguiente forma Mg < K < P < N < Ca, lo que indica mayor abundancia de nitrógeno y calcio en los lodos residuales.

Tabla 3. Resultados de nutrientes y parámetros fisicoquímicos de los lodos de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas en Bávaro, República Dominicana

Parámetros	Resultados	Unidad de medida
Nitrógeno	2,26 ± 0,36	%
Fósforo	1,67 ± 0,04	%
Calcio	2,29 ± 0,07	%
Magnesio	0,47 ± 0,01	%
Potasio	0,73 ± 0,01	%
MO	76,09 ± 1,93	%
pH	7,55 ± 0,33	---
ST	11,97 ± 0,12	%
STV	88,13 ± 0,23	%

Nota. Resultados expresados en base a peso seco. Todos los análisis a excepción del N se

realizaron por triplicado, la medición del nitrógeno se realizó en diez áreas más una, los resultados se expresaron como el valor promedio $\pm$ la desviación estándar

El contenido de macronutrientes (N, P, K, Ca y Mg) en el lodo residual resultaron superiores o comparables a los reportados en investigaciones previas para subproductos similares (Martínez et al., 2020; Candela et al., 2024; Díaz et al., 2024). La abundancia de nutrientes se encuentra asociada al perfil domestico de los lodos residuales, ya que se vierten aguas grises y negras, residuos de alimentos y elevadas cargas de materia orgánica fecal (Sharma et al., 2022; Mesbah et al., 2024).

En cuanto al pH, el valor medido fue 7,55, lo que indica un pH ligeramente alcalino. Los lodos residuales con pH neutro a ligeramente alcalino poseen la capacidad de corregir la acidez del suelo y aumentar la disponibilidad de calcio y magnesio (Bai et al., 2022). Por otro lado, en el análisis de ST se obtuvo un resultado de 11,97%, esto señala un alto contenido de humedad en la muestra de lodo a pesar del secado por prensado.

Finalmente, el contenido de MO y SVT fue de 76,09% y 88,13%, respectivamente. La elevada cantidad de MO aumenta la capacidad de intercambio catiónico del suelo, además de facilitar el control y la movilidad de los nutrientes (Candela et al., 2024). Sin embargo, un valor elevado de SVT indica una fracción altamente biodegradable, el lodo crudo puede liberar metabolitos de descomposición y ácidos orgánicos que producen fitotoxicidad, alteran el desarrollo radicular e inhiben la germinación; asimismo, su alta demanda biológica de oxígeno puede producir anoxia en la rizosfera. Además, al tratarse de un lodo residual no estabilizado, favorece la atracción de vectores y aumenta el riesgo sanitario asociado a los microorganismos patógenos (Sillero et al., 2024). Esta situación indica que la degradación biológica en el sistema de tratamiento no se completa.

Para el uso agrícola de lodos residuales la norma 40 CFR parte 503 (USEPA, 1993) exige el cumplimiento de reducción de patógenos, límites de metales pesados y reducción de la atracción de vectores (RAV). En este estudio, el lodo residual no satisface los requisitos microbiológicos de la Clase A por la carga microbiológica y parasitaria, aunque podría ser clasificado como Clase B. No obstante, cumple con el segundo fundamento al registrar bajas concentraciones de metales pesados. Sin embargo, el lodo residual incumple los criterios de la RAV (USEPA, 2023), dado que el elevado contenido de SVT (88,13%) demuestra que no se logró la reducción de la fracción volátil a 38% (Opción b1).

Además, el porcentaje de ST (11,97%) es significativamente inferior al 75% requerido para lodos que no contienen sólidos no estabilizados (Opción b7). De manera que, es preciso implementar una digestión secundaria o tratamiento de compostaje para la reducción de la atracción vectorial, la estabilización y la higienización del lodo residual. Algunas alternativas convencionales de estabilización presentan desventajas por pérdida de nitrógeno como amoníaco, por lo que pueden ser consideradas alternativas modernas como el compostaje con madera de pino modificada o la electrodeshidratación (Cárdenas & Molina, 2022).

Las limitaciones experimentales de esta investigación consisten en el uso de una única muestra compuesta, lo que restringe la evaluación a gran escala de la variabilidad temporal. Los resultados deben interpretarse como un diagnóstico preliminar del sistema de tratamiento del complejo hotelero. Estudios futuros deberán incorporar muestreos sistemáticos y longitudinales en el tiempo para caracterizar la variación estacional de

estos biosólidos. Además, la cuantificación de N mediante SEM-EDX es complementaria por lo que preferiblemente debe validarse con métodos de referencia como Kjeldahl o análisis elemental CHNSO.

4. CONCLUSIONES

1. Este estudio proporciona un diagnóstico preliminar de los lodos residuales generados en una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas de Bávaro-Punta Cana. Los resultados evidenciaron potencial agronómico, asociado con su contenido de nutrientes, materia orgánica (76,09%), y pH ligeramente alcalino (7,55).
2. Las concentraciones de metales pesados fueron inferiores a los límites de referencia de la USEPA 40 CFR Parte 503, destacando el zinc (492,01 mg/kg) y el cobre (170,13 mg/kg) como los elementos más abundantes. Bajo las condiciones evaluadas, estos contaminantes no representaron la principal limitación para la posible valorización agrícola del lodo residual.
3. El material no es apto para aplicación agrícola directa debido a su calidad microbiológica y parasitológica. Las concentraciones de coliformes fecales, *Salmonella sp.* y huevos de helmintos superaron los valores de referencia para biosólidos Clase A. También, el elevado contenido de sólidos totales volátiles (88,13%) evidencia una alta fracción biodegradable y sugiere una estabilización insuficiente.
4. De modo que, para considerarse como insumo agrícola los lodos deben someterse previamente a tratamientos de higienización y estabilización. El compostaje con agentes estructurantes o residuos lignocelulósicos y la digestión anaerobia constituyen alternativas que pueden evaluarse experimentalmente.
5. Debido a que el estudio se basó en una única muestra compuesta, estos resultados deben interpretarse como línea base o diagnóstico preliminar y no permiten establecer la variabilidad temporal del material.

REFERENCIAS

- Angon, P., Islam, M., KC, S., Das, A., Anjum, N., Poudel, A. & Akter, S. (2024). Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. *Heliyon*, 10(7), e28357. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28357>
- Achkir, A., Aouragh, A., El Mahi, M., Lotfi, E. M., Labjar, N., El Bouch, M., Ouahidi, M. L., Badza, T., Farhane, H. & El Moussaoui, T. (2023). Implication of sewage sludge increased application rates on soil fertility and heavy metals contamination risk. *Emerging Contaminants*, 9(1), 100200. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2022.100200>
- Bai, J., Sun, X., Xu, C., Ma, X., Huang, Y., Fan, Z. & Cao, X. (2022). Effects of sewage sludge application on plant growth and soil characteristics at a pinus sylvestris var. Mongolica plantation in Horqin Sandy Land. *Forests*, 13(7), 984. <https://doi.org/10.3390/f13070984>

- Candela, G., Miglio, R., Vela, R. & Cadillo, E. (2024). Caracterización fisicoquímica y microbiológica de lodos de PTAR y BES bajo un enfoque de reaprovechamiento agronómico. *Ecología Aplicada*, 23(2), 151-164. <http://dx.doi.org/10.21704/rea.v23i2.2219>
- Cárdenas, G. & Molina, F. J. (2022). Alternativas para tratar lodos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales: Una revisión. *Ingeniería* 27(3), e17945. <https://doi.org/10.14483/23448393.17945>
- Chaturvedi, A., Saraswat, P., Gupta, A., Prasad, M. & Ranjan, R. (2022). Detoxification of sewage sludge by natural attenuation and application as a fertilizer. In R. Vishnu D., Y. Ajar Nath, J. Hanuman Singh, S. Satish Kumar & M. Tatiana (Eds.), Springer Publishing. *Sustainable Management and Utilization of Sewage Sludge*, 263-280. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85226-9_13
- CHROMagar. (2024a). CHROMagar™ Salmonella NT-EXT-004. CHROMagar Microbiology. Recuperado de: <https://www.chromagar.com/wp-content/uploads/2021/11/NT-EXT-004-V9.1.pdf>
- CHROMagar. (2024b). CHROMagar™ ECC NT-EXT-016. CHROMagar Microbiology. Recuperado de: <https://www.chromagar.com/wp-content/uploads/2021/11/NT-EXT-016-NOTICE-EF-V8.1.pdf>
- Chojnaka, K., Skrzypczak, D., Szopa, D., Izydorczyk, G., Moustakas K. & Witek-Krowiak, A. (2023). Management of biological sewage sludge: fertilizer nitrogen recovery as solution to fertilizer crisis. *Journal of environmental management*. 326 (Part A), 116602. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116602>
- Díaz, J., Chávez, G., Quipuscoa, L., Rabanal, J., & Pereyra, T. (2024). Evaluación del contenido de metales pesados y parámetros físico-químicos en lodos de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Celendín-Cajamarca. *Caxamarca*, 23(1-2), 14-32. <https://revistas.unc.edu.pe/index.php/caxamarcae/article/view/118>
- Gyawali, P. (2018). Infectious helminth ova in wastewater and sludge: A review on public health issues and current quantification practices. *Water Science & Technology*, 77(4), 1048-1061. <https://doi.org/10.2166/wst.2017.619>
- Hui, G., Ying, X., Linke, Z., Hui, G., Lingling, D. & Xiaohu, D. (2020). An overview of removing heavy metals from sewage sludge: Achievements and perspectives. *Environmental pollution*. 266 (Part 2), 115375. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115375>
- Kowsari, M. H., Yeganeh, M., Ansari, M., Abdolahi Nejad, B., Hasham Firooz, M. & Farzadkia, M. (2025). Comparative efficiency of mesophilic anaerobic digestion and aerated static pile composting in the stabilization of municipal wastewater sludge. *J Environ Health Sustain Dev*, 10(4), 2843-2858. <http://dx.doi.org/10.18502/jehsd.v10i4.20657>
- Mabrouk, O., Hamdi, H., Sayadi, S., Al-Ghouti, M., Abu-Dieyeh, M. & Zouari, N. (2023). Reuse of sludge as organic soil amendment: Insight into the current situation and potential challenges. *Sustainability*, 15(8), 67-73. <http://dx.doi.org/10.3390/su15086773>
- Machnicka, A. & Grübel K. (2023). The effect of pre-treatment and anaerobic digestion for pathogens reduction in agricultural utilization of sewage sludge. *Environmental*

Science and Pollution Research, 30, 13801-13810. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23164-9>

- Martínez, A., Castillo, J., Rodríguez, V. & Orgaz, F. (2020). Aprovechamiento de los biosólidos procedentes de plantas de tratamiento de aguas urbanas en agricultura. Estudio de caso en República Dominicana. *DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, 13(37), 192-214. <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/689/679>
- Mesbah, N., Rezki Bekki, M. A., Aouad, L., Rouane Hacene, O., Durand, G. & Bekki, A. (2024). Analysis of the fertilizing potential of sewage sludge and its impact on agriculture and the environment. *International Journal of Recycling Organic Waste in Agriculture (IJROWA)*, 14(2), 1-12. <https://doi.org/10.57647/ijrowa-sfzz-1f78>
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). Plan nacional de lucha contra la desertificación y los efectos de las sequías. PAN-LCD 2018-2030. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/dom215194.pdf>
- Olejnik, D. (2024). Evaluation of the heavy metals content in sewage sludge from selected rural and urban wastewater treatment plants in Poland in terms of its suitability for agricultural use. *Sustainability*, 16(12), 5198. <https://doi.org/10.3390/su16125198>
- Poornima, R., Suganya, K. & Sebastian, S. P. (2022). Biosolids towards Back-To-Earth alternative concept (BEA) for environmental sustainability: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 3246-3287. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16639-8>
- Sabbahi, S., Ayed, L., Trad, M., Berndtsson, R. & Karanis, P. (2022). Parasitological assessment of sewage sludge samples for potential agricultural reuse in Tunisia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1657. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031657>
- Sharma, L.D., Sarangthem, I., Thangjam, R., Sadhukhan, R., Oinam, N., Yangle, B., Banarjee, L., Anal, H. J. & Jatav, H. S. (2022). Sewage sludge and its health risk assessment: Opportunities and challenges. In R. Vishnu D., Y. Ajar Nath, J. Hanuman Singh, S. Satish Kumar & M. Tatiana (Eds.), Springer Publishing. *Sustainable Management and Utilization of Sewage Sludge*, 205-225. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85226-9_13
- Sillero, L., Solera, R. & Perez, M. (2024). Agronomic and phytotoxicity test with biosolids from anaerobic CO-DIGESTION with temperature and micro-organism phase separation, based on sewage sludge, vinasse and poultry manure. *Journal of Environmental Management*, 354, 120146. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120146>
- USEPA, (1989). U.S. Environmental Protection Agency. POTW Sludge Sampling and Analysis Guidance Document (EPA 833-B-89-100). <https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-11/documents/potw-sludge-sampling-guidance-document.pdf>
- USEPA, (1993). U.S. Environmental Protection Agency. (1993). 40 CFR Part 503—Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-O/part-503>
-

- USEPA, (1994). U.S. Environmental Protection Agency. Test methods for evaluating solid waste: Physical/chemical methods (SW-846). <https://www.epa.gov/biosolids/sewage-sludge-analytical-methods-and-sampling-procedures>
- USEPA, (1996). U.S. Environmental Protection Agency. Method 3051A: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. Washington, D.C.: U.S. EPA. <https://www.epa.gov/esam/epa-method-3051a-microwave-assisted-acid-digestion-sediments-sludges-soils-and-oils>
- USEPA, (2001). U.S. Environmental Protection Agency. Method 1684: Total, Fixed, and Volatile Solids in Water, Solids, and Biosolids. Washington, D.C.: U.S. EPA. <https://www.epa.gov/esam/epa-method-1684-total-fixed-and-volatile-solids-water-solids-and-biosolids>
- USEPA, (2004). U.S. Environmental Protection Agency. Method 9045D: Soil and Waste pH. Washington, D.C.: U.S. EPA. <https://www.epa.gov/esam/epa-method-9045d-soil-and-waste-ph>
- USEPA, (2007). U.S. Environmental Protection Agency. Method 6010C: Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry (ICP-AES). Washington, D.C.: U.S. EPA. <https://www.epa.gov/esam/method-6010c-inductively-coupled-plasma-atomic-emission-spectrometry>
- USEPA, (2023). U.S. Environmental Protection Agency. Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge. EPA/600/R-22/194. <https://www.epa.gov/biosolids/pathogens-and-vector-attraction-sewage-sludge>
- Zhou, P., Li, D., Zhang, C., Ping, Q., Wang, L. & Li, Y. (2024). Comparison of different sewage sludge pretreatment technologies for improving sludge solubilization and anaerobic digestion efficiency: A comprehensive review. *Science of the Total Environment*, 921, 171175. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.171175>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- M.Sc. Gabriel Emilio Reyes Cedeño. Gestión de proyecto, recursos, conceptualización, investigación, análisis formal, visualización, redacción – primera redacción.
 - M.Sc. Aris Mendis Gómez Pérez. Supervisión, conceptualización, recursos, metodología, redacción - revisión y edición.
 - M.Sc. Enmanuel Echavarría Llubes. Metodología, software, conservación de datos, redacción - revisión y edición.
 - M.Sc. Saskia Santana Jiménez. Investigación, validación, análisis formal, redacción - revisión y edición.
-