



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Estrategias de estabilización de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)
y su aplicación en el suelo**

Maria Camila Ochoa Cano

Artículo de revisión presentado para optar al título de Especialista en Gestión Ambiental

Asesor

Camilo César Castro Jiménez, Doctor (PhD) en Ingeniería Ambiental

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Especialización en Gestión Ambiental
Medellín, Antioquia, Colombia

2025



Cita

(Ochoa Cano, 2025)

Referencia

Ochoa Cano, MC. (2025). Estrategias de aprovechamiento de lodos provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) - 2025 [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Estilo APA 7 (2020)



Especialización en Gestión Ambiental , Cohorte XVII.

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Resumen

La estabilización y valorización de biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) constituye una estrategia ambientalmente sostenible para la gestión de estos subproductos. Este artículo de trabajo realiza un análisis bibliométrico para identificar las tendencias de investigación relacionadas con la estabilización y valorización de biosólidos, evaluando los principales métodos de tratamiento y su aplicación en suelos. Se revisaron estudios científicos que abordan el uso agrícola de biosólidos y su impacto en el suelo. Los resultados destacan a la digestión anaerobia como la técnica más empleada, debido a sus ventajas en la reducción de volumen, la obtención de biosólidos con características aptas para su uso y la generación de biogás como fuente de energía renovable. Los biosólidos demuestran un alto potencial para la rehabilitación de suelos degradados, como los infértiles y erosionados; sin embargo, su aplicación debe estar regulada para mitigar posibles riesgos ambientales. Se concluye que, a pesar de los beneficios evidentes, es imperativo robustecer las investigaciones en este campo, particularmente en países como Colombia, y desarrollar protocolos específicos de monitoreo y control para garantizar una aplicación segura y sostenible.

Palabras clave: Lodos de tratamiento de agua residual, biosólidos, aplicación en el suelo, agricultura, estabilización de lodos.

Abstract

The stabilization and valorization of sludge generated in wastewater treatment plants (WWTPs) represent an environmentally sustainable strategy for the efficient management of these byproducts. This study conducts a bibliometric analysis to identify research trends related to the stabilization and valorization of biosolids, evaluating the main treatment methods and their application in soils. Scientific studies addressing the agricultural use of biosolids and their impact on soil were reviewed. The results highlight anaerobic digestion as the most widely used technique due to its advantages in volume reduction, the production of biosolids with suitable characteristics for use, and the generation of biogas as a renewable energy source. Biosolids demonstrate significant potential for rehabilitating degraded soils, such as infertile and eroded ones; however, their application must be strictly regulated to mitigate potential environmental risks. It is concluded that, despite the evident benefits, it is imperative to strengthen research in this field, particularly in countries like Colombia, and to develop specific monitoring and control protocols to ensure safe and sustainable application.

Keywords: Sewage sludge, biosolids, land application, agriculture, sludge stabilization.

Introducción

A pesar de que la tasa de crecimiento anual de la población de la tierra ha disminuido en las últimas décadas, se prevé que la población mundial alcance los 9 billones de personas en 2037 y los 10 billones para 2060 (Martins et al., 2023; Wordometer, s. f.). La expansión demográfica, junto con la urbanización han incrementado la demanda de recursos limitados como el suelo, el agua, los alimentos y la energía. Además, ha aumentado las preocupaciones ambientales como la contaminación y la gestión de residuos (Mulopo, 2024).

Como consecuencia del crecimiento poblacional y la demanda de agua asociada se ha aumentado la generación de aguas residuales. En el mundo, se generan aproximadamente $3.59 \times 10^{11} \text{ m}^3$ / año de aguas residuales, de los cuales se recolecta el 63 %; y de este porcentaje se trata alrededor del 52 %, y por lo tanto alrededor de $1.08 \times 10^{11} \text{ m}^3$ / año de aguas residuales no recibe ningún tratamiento (Venegas et al., 2021).

En Colombia, la producción de agua residual doméstica e industrial ha ido creciendo junto con la población y el desarrollo económico, aumentando la cantidad de agua vertida a fuentes superficiales. No obstante, en el país solo entre el 5 % y el 10 % de los grandes municipios tienen algún tipo de tratamiento de aguas residuales, lo cual influye en la calidad del suministro de aguas superficiales. La infraestructura existente para el tratamiento de aguas residuales domésticas solo cubre el 7.72% de la población urbana (Leblanc et al., 2006).

Como resultado de los procesos de tratamiento de aguas residuales, se obtiene un subproducto conocido como lodo, en el que se concentran los compuestos removidos usualmente en las etapas de tratamiento primario y secundario. Los lodos consisten en una mezcla de agua, materia orgánica, nutrientes (derivados de desechos alimentarios y humanos) y microorganismos activos e inactivos, incluyendo contaminantes inorgánicos tales como metales pesados e Hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs) (Vannuccini et al., 2024). Los lodos se definen como un residuo semisólido que se acumula durante las etapas del tratamiento de aguas residuales, incluyendo procesos físicos, químicos y biológicos. Las características y composición del lodo varían dependiendo de la fuente de las aguas residuales y el proceso de tratamiento empleado (Ghangrekar, 2022; Zakaria et al., 2023).

Los lodos de plantas de tratamiento de agua residual municipal o doméstica, subproducto sólido del tratamiento de aguas residuales y pueden ser aprovechados para producir sólidos más

estables conocidos como biosólidos, mediante tratamientos como la digestión aerobia o anaerobia, la estabilización alcalina, el secado térmico, la desinfección y el compostaje (Collivignarelli et al., 2019).

Globalmente, se producen alrededor de 60 millones de toneladas de biosólidos secos al año, en su mayoría destinados para actividades agrícolas, siendo la opción más beneficiosa y económica comparado con otras formas de reciclado o disposición (Venegas et al., 2021). En Colombia, el uso de biosólidos se ha concentrado en actividades específicas como la restauración de suelos de canteras, mejoramiento de suelos degradados, estabilización de taludes y siembra de plantas ornamentales, mientras que su uso en agricultura es casi nulo a pesar de la existencia de normas que regulan esta actividad (Venegas et al., 2021).

Actualmente se investigan diferentes alternativas de uso de los biosólidos, con un enfoque de economía circular en el sector del agua. Este enfoque pretende que los desechos o residuos en el tratamiento de las aguas, en este caso los biosólidos, sean aprovechados como materia prima secundaria y sean reutilizados en diferentes aplicaciones, que pueden contribuir a la recuperación de nutrientes y energía (Obaideen et al., 2022). Estas alternativas de aprovechamiento de los biosólidos también contribuyen al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) relacionados con el agua potable y el saneamiento (ODS 6: Agua limpia y saneamiento), la salud humana (ODS 3: Salud y bienestar) y el impacto ambiental de las ciudades y comunidades (ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles y ODS 12: Consumo y producción responsable) (Obaideen et al., 2022).

Los biosólidos pueden usarse como enmiendas para el suelo y en la agricultura tienen el potencial para reemplazar los fertilizantes sintéticos. Además, pueden ayudar a restaurar la fertilidad de suelos agrícolas infértiles debido al uso prolongado e indiscriminado de fertilizantes inorgánicos sintéticos. Los biosólidos se utilizan en áreas como agricultura en plantas como albahaca (Reyes Araujo et al., 2020), maíz (Koyuncu, 2022), lechuga (Urionabarrenetxea et al., 2022), sorgo (Arlo et al., 2022), berro (Godlewska et al., 2022), arveja (Eid et al., 2020), entre otros. También se han aprovechado en la silvicultura, como forraje para animales (Balidakis et al., 2022; Cardoso et al., 2021), creación de césped (Samara et al., 2023), plantas ornamentales (Li et al., 2021; Ortega-Quispe et al., 2024), recuperación del suelo de características como estabilidad estructural (Zoghلامي et al., 2020a), parámetros indicadores de la calidad del suelo como pH, conductividad y contenido de N y P (Hechmi et al., 2022), y factores como la reserva de C y C

orgánico del suelo (Y. Villa & Ryals, 2021) y revegetación porque contienen materia orgánica y nutrientes esenciales para las plantas (como N y P) y otros elementos inorgánicos como K, Ca, S, y Mg (Collivignarelli et al., 2019). Estas características hacen de los biosólidos particularmente buenos para ser usado como enmiendas ya que pueden mejorar las características físicas y químicas de los suelos para reducir la necesidad de utilizar fertilizantes sintéticos. Estos beneficios dependen en gran medida de la cantidad y calidad del biosólido aplicado al suelo.

El uso de biosólidos en agricultura permite la restauración estructural del suelo, el mejoramiento de la fertilidad, incremento del contenido de materia orgánica y la mejora en el rendimiento de la productividad de cultivos, entre otros, convirtiéndose en una práctica agrícola efectiva cuando se aplica de manera adecuada. A pesar de las numerosas ventajas que presenta la aplicación de biosólidos al suelo, este tiene sus restricciones debido a la presencia de ciertos componentes que pueden poner en peligro la salud humana o del ecosistema, estos componentes son principalmente metales, compuestos orgánicos, patógenos y debido al potencial de salinización y acidificación del suelo (Martins et al., 2023).

Con el fin de destinar estos biosólidos a cultivos, es necesario que se tenga la certeza de que dichos biosólidos cumplen con parámetros de sanidad establecidos por las normas de cada país para evitar repercusiones en la salud. La normatividad sobre biosólidos en general establece los límites permisibles de microorganismos indicadores de contaminación fecal y las concentraciones de metales pesados que debe tener el biosólido con el fin de determinar su uso. Las normas establecen la necesidad de realizar un tratamiento posterior a los lodos, para poder ser reutilizados como biosólidos (Manjarrés-Hernández et al., 2021). Se debe evaluar el contenido de metales pesados como Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Mercurio (Hg), Plomo (Pb), así como el contenido de microorganismos patógenos como Salmonella y Escherichia coli porque constituyen un riesgo para la salud humana.

En varios países, se han implementado normas con el objetivo de minimizar los riesgos asociados con el uso de los biosólidos. La norma 40 CFR parte 503 de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (Environmental Protection Agency, 2025), la Directiva 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986 del Parlamento Europeo (Parlamento Europeo, 1984), la Resolución CONAMA de Brasil (BRASIL, 2006); y el Decreto Colombiano 1287 de 2014 (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2014) son algunos de las normativas que se han expedido en relación con la aplicación de biosólidos al suelo y su uso en agricultura. La norma

colombiana establece un precedente importante en cuanto a manejo de lodos y biosólidos, fijando límites de metales pesados y su calidad microbiológica, además de recomendar tratamientos para su estabilización, y en general, clasifica los biosólidos de acuerdo con el contenido de indicadores de contaminación fecal en dos categorías clase A y clase B. Los biosólidos categoría A se destinan a zonas verdes, jardines y agricultura. Los de categoría B se usan en recuperación de suelos, fertilizantes, construcción y re-vegetalización. Existen restricciones: no se permiten en playas, páramos, cuerpos de agua, zonas inundables o cercanas a captaciones subterráneas, ni en suelos con especies amenazadas o próximos a viviendas rurales (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio, 2014).

Este trabajo busca analizar por medio de una revisión bibliográfica las estrategias de estabilización de lodos generados en las PTAR, identificando los avances en la investigación, las metodologías de estabilización, los beneficios ambientales, su aplicación al suelo y su uso en la agricultura.

Metodología

El estudio se llevó a cabo utilizando la herramienta Knowledge Development Process-Constructivist (ProKnow-C) (Ensslin et al., 2010), cuyo propósito es generar conocimiento sobre un tema determinado a través de un proceso estructurado y sistemático que selecciona y revisa críticamente la literatura de acuerdo con las percepciones y delimitaciones del investigador.

Para alcanzar el objetivo de la investigación, se aplicaron 2 de las 4 etapas principales del proceso ProKnow-C para luego, construir parte del conocimiento necesario sobre el tema planteado. Es decir, los artículos que componen el Portafolio Bibliográfico (PB) fueron seleccionados con base en los intereses y las delimitaciones del investigador, y después se realizó el análisis bibliométrico, en el cual se destacaron los artículos, autores, revistas y las palabras clave del PB y sus referencias.

A continuación, se describen las etapas del proceso ProKnow-C que se aplicaron:

1. Selección del Portafolio Bibliográfico: consistió en la búsqueda de material científico en bases de datos de manera sistematizada. Inicialmente, se definieron las palabras clave sobre el tema de investigación en inglés. A continuación, se seleccionaron las bases de datos más relacionadas con el tema de investigación, de acuerdo con los conceptos del autor.

La selección del PB puede resumirse en tres sub-etapas principales: selección de la base de datos de artículos en bruto; filtrado; y la prueba de representatividad. La primera subetapa se realizó en las bases de datos ScienceDirect, Scopus y SpringerLink. En primer lugar, se definieron las palabras claves que constituyeron los comandos de búsqueda. Se aplicaron límites temporales y de acceso a la búsqueda de artículos: publicados entre 2020 y 2024 y de acceso proporcionado por el repositorio institucional de la Universidad de Antioquia.

La subetapa de filtrado de la base de datos de artículos se realizó con el uso del programa Mendeley, que ayudó a excluir los artículos repetidos y los que no se clasificaban como investigaciones científicas publicadas en revistas. Adicionalmente se realizó el filtrado por la alineación por título y resumen. La segunda etapa del filtrado consistió en leer los títulos de los artículos, a partir de los cuales se descartaron algunos artículos que se encuentran en la base de datos. Este paso se justifica por el hecho de que la búsqueda

de palabras clave a menudo se realiza no sólo en los títulos y palabras clave de los artículos, sino también en los resúmenes, lo que hace posible que se incorporen al portafolio bibliográfico artículos que, a pesar de la presencia de las palabras clave buscadas, no tratan específicamente del tema de investigación.

La tercera etapa del filtrado consistió en comprobar la pertinencia científica de los artículos seleccionados como criterio para mantenerlos en el portafolio bibliográfico. Esta evaluación implicó varios pasos y un análisis crítico por parte del investigador de los artículos recopilados hasta el momento.

Como resultado, se obtuvieron 64 artículos con representatividad, alineados con el tema y que cumplen con las condiciones establecidas que conforman el portafolio bibliográfico.

2. Análisis bibliométrico: los datos estadísticos del portafolio bibliográfico obtenidos en la etapa 1 se analizaron cuantitativamente mediante el recuento de parámetros como publicaciones, autores, revistas y palabras clave. Mediante el análisis de los datos numéricos de los artículos seleccionados, se pretendió evaluarlos en función de la pertinencia de sus revistas, las palabras clave más utilizadas y el análisis por ubicación geográfica. También se buscó discutir sobre la aplicación de los biosólidos y los efectos que causa en las características físicas, químicas y biológicas del suelo, así como los efectos sobre las plantas y los organismos edáficos. Y por último se exploraron las experiencias de co-aplicación de los biosólidos con material orgánico externo.

La literatura obtenida para el portafolio bibliográfico fue separada en 4 periodos: (2020-2021), (2021-2022), (2022-2023), (2023-2024) y fue utilizada para la construcción de diagramas estratégicos mediante las medidas de centralidad y densidad, utilizando la metodología propuesta por (Cobo et al., 2012). Los diagramas estratégicos representan el periodo analizado como una red temática dividida en cuatro categorías: temas motores: temas desarrollados e importantes para la construcción del campo científico; temas periféricos: desarrollados pero aislados y con rol marginal; temas emergentes o en declive: pocos desarrollados y temas básicos o transversales: relevantes pero que cuentan con escaso desarrollo. Esta clasificación permite entender la dinámica y evolución temática del campo científico estudiado (López-Robles et al., 2019).

Por otra parte, se utilizó el software VOSviewer para la construcción del mapa basado en la matriz de coocurrencia utilizando la técnica VOS propuesta por (van Eck & Waltman, 2010), la cual implementa la medida de similitud conocida como índice de proximidad (Eck et al., 2006). El mapa muestra colores que indican el grupo asignado, mientras las líneas entre elemento señalan la relación de los ejes temáticos.

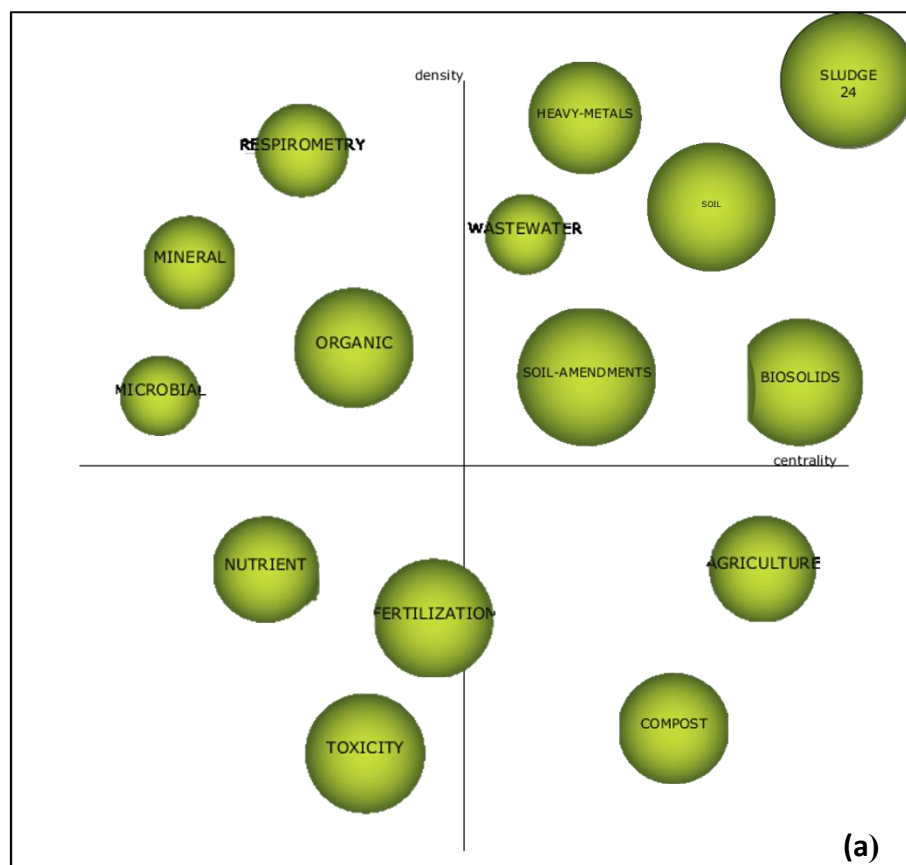
Resultados y discusión

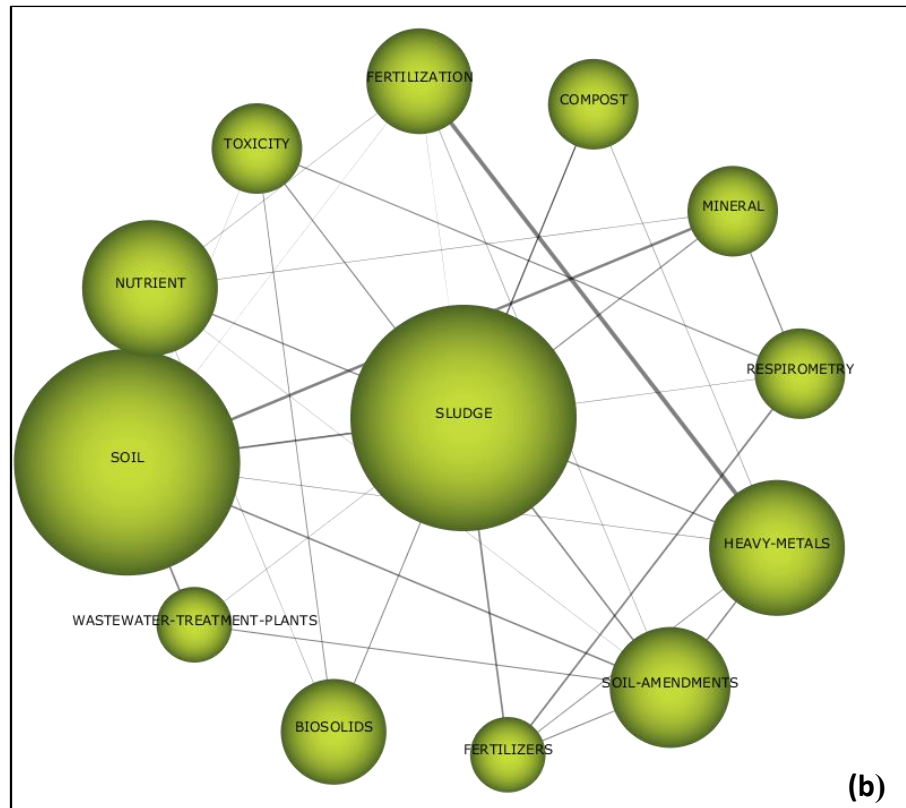
Análisis bibliométrico

Los diagramas estratégicos muestran cómo los temas relevantes para el desarrollo de la temática analizada en el campo científico, tales como los suelos, aguas residuales, enmienda del suelo, fertilización del suelo y toxicidad están asociados con la evaluación de los impactos ambientales generados por la aplicación de los lodos de PTAR o biosólidos (Figura 1.a). También los temas transversales dejan ver como los lodos están relacionados con las plantas de tratamiento aguas residuales, las propiedades del suelo como los nutrientes y los fertilizantes y temas como el compost y la toxicidad. De igual manera, los lodos se relacionan estrechamente con los metales pesados, las concentraciones de sustancias minerales y las enmiendas al suelo (Figura 1.b).

Figura 1.

Diagramas estratégicos





En el mapa de coocurrencia (Figura 2) se pueden apreciar cinco ejes temáticos o clústers: soil (suelo), sewage sludge (lodo de tratamiento de agua residual), treatment (tratamiento), heavy metals (metales pesados) and amendment (enmienda), representados por los colores: púrpura, verde, rojo, azul y amarillo, respectivamente. Esto permite apreciar los nexos de unos conceptos con otros, puesto que estas son las temáticas con mayor estudio u ocurrencia. De igual manera, se puede notar que el primer eje temático se centró en el suelo, particularmente sus propiedades y los efectos de la aplicación de los biosólidos. Este eje incluyó palabras como compost, enmienda del suelo y tratamiento.

El segundo eje temático se relaciona con la generación de lodos de agua residual y sus efectos. Este grupo reunió palabras claves como las siguientes: digestato, planta de tratamiento de agua residual, metales pesados, entre otras. El tercer eje temático aglutina diferentes aspectos relacionados con la aplicación de biosólidos, con términos como concentración, dosis y captura de nutrientes. Asimismo, el conjunto de temas del cuarto eje temático se vinculó con trabajos sobre agricultura, el crecimiento y el incremento de nutrientes en las plantas, y características como la proporción de biosólido utilizada. Por último, el quinto eje temático principalmente se centró en

Tabla 1

Países con mayor número de publicaciones sobre el tema.

No. Documentos	País
10	Brasil
4	Grecia
4	Turquía
4	Polonia
4	China
4	EE. UU.
3	Arabia Saudita
3	Italia
2	Colombia

En este mismo sentido, la Tabla 2 muestra las principales revistas que poseen mayor número de artículos científicos sobre la aplicación de lodos residuales y biosólidos. De acuerdo con esto, la revista que más publicaciones recibió sobre el tema es Journal of Soil Science and Plant Nutrition con 5 artículos, seguida por Heliyon con 4 artículos y por Sustainability (Switzerland) con 3 publicaciones. En general, se observa que las revistas que más publican sobre la temática están estrechamente relacionadas con los ejes temáticos de la presente revisión bibliográfica.

Tabla 2

Revistas más productivas sobre el tema

Revista	No. Documentos	País
Journal of Soil Science and Plant Nutrition	5	Alemania
Heliyon	4	Reino Unido
Sustainability (Switzerland)	3	Suiza
Agriculture (Switzerland)	2	Suiza
Desalination and Water Treatment	2	EE. UU.
Environmental Pollution	2	Reino Unido
International Journal of Environmental Science and Technology	2	Alemania
Journal of Environmental Management	2	EE. UU.
Science of the Total Environment	2	Países Bajos

Experiencias del uso de biosólidos en suelos y agricultura

Desde un punto de vista agronómico, los biosólidos contienen nutrientes esenciales para las plantas, y la presencia de estos en los biosólidos depende de la calidad de las aguas residuales del

afluente de la planta de tratamiento y de los procesos de estabilización utilizados para el tratamiento de los lodos producidos. Las estrategias de estabilización de los lodos residuales son un punto intenso en la posibilidad del aprovechamiento o reutilización de estos residuos, ya que las normativas son restrictivas respecto a la carga de microorganismos y a la concentración de metales pesados que se permite para su aprovechamiento.

A propósito de las estrategias de estabilización, la digestión anaerobia es el principal proceso de estabilización de lodos utilizado en todo el mundo. Esta consiste en la estabilización de la materia orgánica mediante la acción de bacterias en contacto con los lodos, en condiciones de ausencia de oxígeno y favorables para su crecimiento y reproducción (Tambo et al., 1982). Además de producir biosólidos aptos para el aprovechamiento en agricultura (Huezo & Shah, 2023; Koyuncu, 2022; Silva-Leal et al., 2021) y en remediación de suelos (Catalina Iticescu et al., 2021; Halecki et al., 2022; Vannuccini et al., 2024), la digestión anaerobia también genera subproductos aprovechables en la producción de energía como el biogás, gas rico en compuestos como metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y ácido sulfhídrico (H_2S) (Mabrouk et al., 2023).

Por otro lado, la digestión aerobia consiste en un proceso biológico donde los microorganismos descomponen la materia orgánica en presencia de oxígeno, reduciendo la carga orgánica, los sólidos volátiles en suspensión y produciendo dióxido de carbono, agua y biomasa (Tambo et al., 1982). Biomasa que puede ser aprovechada en áreas como agricultura en plantas como arveja (Eid et al., 2020) y tomate (Eid et al., 2021), silvicultura o remediación de suelos por las características que presenta (Zoghلامي et al., 2020a).

El compostaje es otra alternativa de estabilización habitual en las plantas de tratamiento de residuos sólidos urbanos, y también se utiliza en un número limitado de pequeñas plantas de tratamiento de aguas residuales. Como producto de este proceso se obtiene un sólido con características similares a los abonos orgánicos que puede ser aprovechado en procesos como silvicultura o paisajismo (Ortega-Quispe et al., 2024).

El tratamiento alcalino y el secado térmico también son procesos de estabilización de lodos utilizados en menor medida como estrategias de estabilización debido a la cantidad de reactivos químicos que se requiere para estabilizar las grandes cargas de materia orgánica que ingresa diariamente a las plantas de tratamiento de agua residual y a la cantidad de energía que se requiere para secar las cantidades de lodos que se generan diariamente en las PTAR, respectivamente. Sin embargo, su aplicación también presenta beneficios para los suelos aplicados y las plantas

cultivadas en los lugares tratados con los biosólidos producto de estas estrategias de estabilización. Por ejemplo, la aplicación de cal (CaO o Ca(OH)_2) a los lodos residuales genera que los lodos estabilizados provoquen un aumento en la producción de biomasa de plantas como maíz y sorgo, aumento de macronutrientes y mejora de la actividad microbiana del suelo, así como el aumento del Carbono orgánico total (COT) y la biodisponibilidad de N y P (Arlo et al., 2022; da Silva et al., 2021, 2022).

Además de las estrategias mencionadas anteriormente, han surgido nuevas alternativas de estabilización de lodos que presentan propiedades novedosas y han abierto el camino a diferentes aplicaciones de los biosólidos. Entre estas alternativas se tienen:

(a) El compostaje con material vegetal adicionado (co-compostaje) entrega biosólidos con propiedades diferentes a los biosólidos producidos por el compostaje tradicional, produciendo efectos como el aumento del pH del suelo, aumento de la materia orgánica del suelo y el aumento de la producción de biomasa en plantas como el maíz, además de aumento de macronutrientes (N, P, K, Mg) y micronutrientes (Zn y Cu) (da Silva et al., 2021). Entre los efectos de estos biosólidos al suelo agrícola se encuentran el aumento de la captura de carbono y el aumento del Nitrógeno total y mineral del suelo (Lin et al., 2024a).

(b) Se han realizado investigaciones sobre los efectos de la aplicación del vermicompost en los suelos y plantas, encontrando efectos positivos sobre las plantas evaluadas. Por ejemplo, la aplicación de biosólidos al cultivo de albahaca resultó en un aumento en la tasa del crecimiento de la planta sin afectar su capacidad antioxidante (Reyes Araujo et al., 2020) y en un incremento de la producción de biomasa total, la tasa de crecimiento del frijol y en un aumento de la producción de clorofila (Belmeskine et al., 2020). En cuanto al suelo, se evidencia un aumento del Nitrógeno, el Fósforo y el Carbono orgánico total (COT), características indicadoras de la buena calidad del suelo, mientras que los metales pesados tóxicos para la salud del suelo se mantuvieron en niveles por debajo de la normativa europea, demostrando que la aplicación de biosólidos al suelo posee efectos beneficiosos (Boruszko, 2020).

En la **Tabla 3** se presenta un resumen de las estrategias más comunes de estabilización de lodos residuales y sus opciones para su aprovechamiento.

Tabla 3*Estrategias de estabilización de lodos y opciones de aprovechamiento*

Estrategia de estabilización	Método final de aprovechamiento	Referencias
Digestión anaerobia	Biosólidos aptos para uso restringido en agricultura como condicionador de suelo y fertilizante orgánico. Tratamiento usualmente seguido por procesos de deshidratación, requiere también de tratamientos de desinfección para su uso sin restricciones.	(Catalina Iticescu et al., 2021; Halecki et al., 2022; Huevo & Shah, 2023; Koyuncu, 2022; Silva-Leal et al., 2021; Vannuccini et al., 2024)
Digestión aerobia	Producto apto para la aplicación sin restricción en suelos agrícolas que proporciona nutrientes necesarios y mejora la calidad y fertilidad del suelo. Tratamiento seguido de un proceso de deshidratación antes de su aplicación.	(Eid et al., 2020, 2021; Zoghalmi et al., 2020b)
Tratamiento químico (estabilización alcalina con Cal)	Comúnmente utilizado en agricultura o como coberturas de rellenos sanitarios.	(Arlo et al., 2022; da Silva et al., 2021, 2022)
Compostaje	Material similar al abono vegetal apto para viveros, horticultura y paisajismo. Utiliza lodos deshidratados.	(Ortega-Quispe et al., 2024)
Pirólisis	Material apto para aplicación en suelos como fertilizante inorgánico y para co-aplicación con otros biosólidos.	(Fachini et al., 2021; Frimpong et al., 2021; Frišták et al., 2023; Xie et al., 2021)
Co-compost	Posee características mejoradas del compost tradicional. Aporta nutrientes y mejora la estructura y la fertilidad del suelo agrícola, de jardinería y silvicultura.	(da Silva et al., 2021; Lin et al., 2024b)
Vermicompost	Biosólidos con características mejoradas de un abono vegetal. Aumenta el crecimiento de las plantas proporcionando nutrientes esenciales y mejora las funciones biológicas del suelo. Aplicaciones comunes en suelos agrícolas.	(Belmeskine et al., 2020; Boruszko, 2020, 2023; Reyes Araujo et al., 2020)

Efectos ambientales de la aplicación de biosólidos*Efectos sobre el suelo:*

El aprovechamiento agrícola de los biosólidos es una práctica establecida y aceptada en muchos países del mundo, entre ellos Estados Unidos, México, Brasil y la Comunidad Europea, reflejado en las normativas y las investigaciones que se llevan a cabo sobre el tema. Sin embargo, los efectos de la aplicación de estos biosólidos, aunque ha sido estudiado en gran medida, todavía presenta vacíos de información como los efectos a largo plazo, la escorrentía de metales pesados y contaminación de fuentes hídricas subterráneas sigue siendo tema de intensa investigación.

La lixiviación de nutrientes es un problema notable en el sector agrícola. Las prácticas agrícolas convencionales y la agricultura intensiva provocan la pérdida de nutrientes esenciales y

de carbono atrapado en el suelo, lo que lo vuelve flácido y no apto para nuevos cultivos (Adur et al., 2024).

Las plantas requieren diecisiete nutrientes esenciales que absorben del aire, el agua y el suelo. Los macronutrientes, como el N, P, K, S, Ca y Mg y micronutrientes, como el Manganeseo (Mn), el Hierro (Fe), el Cobre (Cu), el Boro (B), el Molibdeno (Mo), el Níquel (Ni) y el Zinc (Zn), se absorben del suelo. Además, algunos elementos no esenciales, como el Selenio (Se), el Cobalto (Co), el Silicio (Si) y el Sodio (Na), favorecen el crecimiento de las plantas. Por otro lado, metales traza incluyendo el Arsénico (As), el Aluminio (Al), Cromo (Cr), Plomo (Pb) y Cadmio (Cd) tienen efectos adversos sobre las plantas (Adur et al., 2024).

La aplicación de biosólidos a los suelos agrícolas o usados para forraje como fuente de nutrientes ayuda a suplir los requerimientos de macronutrientes (N, P, Ca y Mg) y algunos micronutrientes (Mn, Fe, Ni, y Zn) del suelo (Amorim Júnior et al., 2021), disminuyendo la necesidad de depender en fertilizantes sintéticos, reduciendo la presión sobre la explotación de los recursos naturales y permitiendo el reciclaje de nutrientes, llevando a una solución a largo plazo para el problema de la disposición de lodos residuales.

La degradación física de los suelos agrícolas, dada principalmente por prácticas agrícolas intensivas, se monitorea principalmente por medio de parámetros como el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico y la mineralización de nutrientes (Clapp et al., 1986). La materia orgánica proveniente de los lodos residuales tiene una influencia significativa en las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos. La materia orgánica en general contribuye en gran medida a la capacidad productiva del suelo. Al incorporarse a la superficie del suelo puede afectar la estructura, en términos de porosidad, agregación y densidad aparente, también en términos de propiedades hidrodinámicas y resistencia del suelo, mejorando las características de calidad del suelo enmendado (Badaou & Sahin, 2022; Ippolito et al., 2024).

En la **Tabla 4** se presenta un resumen de los efectos ambientales de la aplicación de biosólidos.

Tabla 4*Efectos en suelo de la aplicación de biosólidos*

Uso del biosólido	Acción en el suelo	Efecto en el suelo	Efectos ambientales	Referencias
Fuente de materia orgánica	Mejora de la capacidad de intercambio catiónico	Mejora la infiltración del agua Reduce lixiviación de nutrientes	Reduce la lixiviación superficial Reduce la contaminación de fuentes hídricas superficiales	(Badaou & Sahin, 2022; Gonçalves et al., 2022; Hechmi et al., 2022; Ippolito et al., 2024)
	Agregación de las partículas del suelo	Mejora la fertilidad del suelo	Reduce la filtración de nutrientes y la contaminación de fuentes de agua subterráneas	
Fuente de nutrientes	Nutrición de las plantas	Favorece el crecimiento de las plantas Aumenta la biomasa microbiana	Mejora la agregación de las partículas del suelo Aumenta la cobertura vegetal del suelo	(Amorim Júnior et al., 2021; Gutiérrez-Ginés et al., 2023; Tepecik et al., 2022; Y. B. Villa & Ryals, 2021)
	Reducción de la erosión	Aumenta el crecimiento de la planta	Reduce la necesidad de aplicar fertilizantes sintéticos	

Efectos sobre las plantas:

La aplicación de biosólidos en tierras agrícolas no solo genera impactos en el suelo sino también en los cultivos que allí crecen. Las plantas toman del suelo todos los nutrientes necesarios para su germinación, crecimiento y desarrollo, y al realizar esto también pueden captar metales pesados y compuestos tóxicos que puedan afectar negativamente cualquier etapa del desarrollo de las plantas (Ali et al., 2021).

En general, se ha demostrado que la mejora de las propiedades del suelo luego de la aplicación del biosólido influye positivamente en el crecimiento y la producción de plantas. El efecto del biosólido sobre las plantas puede observarse desde la germinación de las semillas y las primeras etapas del crecimiento de estas debido a las nuevas condiciones de materia orgánica, nutrientes y humedad que introduce la aplicación de estos materiales (Balidakis et al., 2022; Eid et al., 2022). En algunos casos, se observó una tasa de germinación menor en los suelos enmendados con biosólidos en comparación con los aplicados con fertilizantes químicos o no enmendados (de Freitas et al., 2023; Eid et al., 2020; Urionabarrenetxea et al., 2022), pero el crecimiento de las plantas y la producción total de biomasa (raíces, tallos, hojas, floraciones o frutos) pudo verse significativamente favorecido en etapas posteriores del desarrollo de las plantas (Corrêa et al., 2023; Fei-Baffoe et al., 2021; Neczaj et al., 2021; Samara et al., 2023).

En términos de riesgos de contaminación, muchos estudios se han enfocado en la acumulación de metales pesados en el suelo y en los cultivos, y generalmente han encontrado concentraciones de estos en niveles por debajo de los límites que establecen las normativas sobre el tema (Castellanos-Rozo et al., 2020; Fei-Baffoe et al., 2021; Onchoke & Fateru, 2024; Ragonezi et al., 2022). Sin embargo, la contaminación por metales pesados o patógenos es un tema difícil de evaluar, pues depende de varios parámetros simultáneamente, por ejemplo: calidad del biosólido, cantidad aplicada, frecuencia de aplicación, especies de cultivo, prácticas agrícolas y condiciones iniciales del suelo enmendado. Es por esto por lo que se requiere de más investigación por parte de los entes reguladores para desarrollar guías específicas tomando en cuenta los parámetros mencionados anteriormente.

Efecto sobre los organismos (toxicidad):

Dentro de los efectos de la aplicación de biosólidos al suelo para su aprovechamiento, no sólo se evalúan los cambios en las características físicas y químicas del suelo, también se estudia el efecto sobre los organismos presentes en el terreno enmendado. Sobre este asunto se han realizado investigaciones con organismos invertebrados (*Daphnia*) y también sobre lombrices (*Eisenia foetida*) los cuales entran en contacto con los biosólidos por medio de la lixiviación de sus componentes o directamente. La evaluación del crecimiento, desarrollo o muerte de estos organismos en suelos enmendados con biosólidos brinda información sobre la toxicidad que podría tener la aplicación de este tipo de material sobre la vida acuática y edáfica respectivamente.

Las investigaciones llevadas a cabo en diferentes partes del mundo, con diferentes cantidades de biosólidos y diferentes estrategias de estabilización han encontrado que no se presenta toxicidad para organismos acuáticos como la especie *Daphnia* (de França et al., 2021; Frišták et al., 2023). Por otro lado, los estudios sobre organismos como las lombrices han hallado resultados diversos, algunos investigadores concluyen que la aplicación de biosólidos afecta negativamente a estas especies (Godlewska et al., 2022; Urionabarrenetxea et al., 2022; Vannuccini et al., 2024), mientras que otros deducen que no existe toxicidad asociada al aprovechamiento de biosólidos como enmiendas del suelo (Frišták et al., 2023; Martins et al., 2023; Moinard et al., 2021). Por lo tanto, se hace necesario mayor investigación sobre el tema para lograr un consenso de opiniones.

Conclusiones

El análisis bibliométrico permitió conocer que países como Brasil, Grecia, Polonia, China y EE. UU. lideran la investigación científica sobre el tema de estabilización de lodos y su aprovechamiento, mientras que Colombia presenta poca producción científica, con estudios limitados y pequeña escala sobre la aplicación agrícola de biosólidos. Asimismo, las revistas más publicadas son revistas específicas en ciencias del suelo, plantas y agronomía y ciencias de los cultivos como *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, y *Agriculture (Switzerland)*, también en revistas interdisciplinarias como *Heliyon* y *Sustainability (Switzerland)* se encuentra una gran producción de publicaciones sobre este tema.

La estrategia de estabilización de lodos más empleada es la digestión anaerobia, ya que presenta ventajas importantes como la reducción de sólidos volátiles, disminuyendo el volumen final del biosólido producido, la reducción de patógenos, la estabilización de materia orgánica y la producción de biogás que puede ser usado como fuente de energía para la propia PTAR o para la venta. A estas ventajas se suma el hecho de que requiere menor consumo energético en comparación con técnicas como la digestión aerobia o la estabilización térmica y que, dependiendo de la calidad del afluente de agua residual y de la efectividad del tratamiento, el biosólido puede ser aprovechado sin restricciones.

Los biosólidos son una buena opción para mejorar suelos infértiles, ya que aportan materia orgánica que mejora sus propiedades físicas, químicas y biológicas, favoreciendo su salud y calidad. También aumentan la estructura, la retención de agua, la actividad microbiana y la capacidad de intercambio catiónico. Incluso tras un tratamiento alcalino, pueden mejorar el pH del suelo, reducir metales tóxicos y aportar nutrientes como calcio y magnesio. No obstante, deben usarse con precaución, pues pueden elevar la salinidad, desbalancear nutrientes y afectar el crecimiento de los cultivos.

La aplicación al suelo de los biosólidos es una alternativa que relaciona impactos ambientales positivos con un bajo coste, cuando se realiza adecuadamente. Sin embargo, el éxito de esto depende de la planificación basada en información confiable de las características y volúmenes de las aguas residuales recibidas en las PTAR, zonas de aplicación aptas y a distancias que no impliquen un costo adicional y un monitoreo de las propiedades de calidad de los lodos adecuado. El suministro de biosólidos para su aprovechamiento debe garantizar un producto de calidad, salvaguardando la salud pública y minimizando los impactos ambientales.

En Colombia, son pocos los estudios donde se evidencia la aplicación de biosólidos a nivel agrícola, demostrando la poca investigación que se ha realizado sobre el tema. Estos estudios se han hecho a pequeña escala y han encontrado que la utilización de los biosólidos en la agricultura puede ser viable si se realiza un correcto tratamiento de las aguas residuales que los producen, se utilizan estrategias de estabilización adecuadas para su aprovechamiento y más importante, si los lugares para la aplicación de los biosólidos se encuentran a distancias que no representen un costo adicional para las PTAR o para los agricultores que se beneficiarían de estos biosólidos.

Aunque se hace referencia a los efectos potenciales que pueda tener la aplicación de biosólidos al suelo sobre la calidad del recurso hídrico, principalmente las fuentes de agua superficiales y subterráneas, es importante desarrollar investigaciones rigurosas que permitan caracterizar de manera detallada los mecanismos de transporte y transformación de los contaminantes presentes en los biosólidos, como metales pesados, patógenos y compuestos orgánicos persistentes, así como su potencial lixiviación y escorrentía hacia cuerpos de agua superficiales y acuíferos. Asimismo, se requiere establecer modelos predictivos y protocolos de monitoreo que respalden una gestión basada en criterios de riesgo y sostenibilidad ambiental.

La literatura utilizada en el presente artículo de revisión resalta que la aplicación de biosólidos como enmienda para el suelo puede convertirse en una práctica útil de aprovechamiento de residuos, pues podría ser de bajo impacto ambiental y rentable si se gestiona adecuadamente. Los datos disponibles provienen en su mayoría de estudios experimentales que utilizan los biosólidos como subproducto del tratamiento de aguas residuales para ser aplicados a cultivos, por lo que es necesario todavía mayor investigación y aplicación a gran escala para obtener datos de mejor calidad.

Referencias

- Adur, A. J., Narendra, K., & Devarajan, R. (2024). *Plant Soil Nutrition and Carbon Sequestration*. November. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-53590-1>
- Ali, M., Ahmed, T., Abu-Dieyeh, M., & Al-Ghouti, M. (2021). Environmental impacts of using municipal biosolids on soil, plant and groundwater qualities. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(15), 1-25. <https://doi.org/10.3390/su13158368>
- Amorim Júnior, S. S. de, Pereira, M. A. de S., Lima, P. de M., Marishigue, M., Guilherme, D. de O., & Magalhães Filho, F. J. C. (2021). Evidences on the application of biosolids and the effects on chemical characteristics in infertile tropical sandy soils. *Cleaner Engineering and Technology*, *4*. <https://doi.org/10.1016/J.CLET.2021.100245>
- Arlo, L., Beretta, A., Szogi, A. A., & del Pino, A. (2022). Biomass production, metal and nutrient content in sorghum plants grown on soils amended with sewage sludge. *Heliyon*, *8*(1). <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E08658>
- Badaou, A. N. A. D., & Sahin, U. (2022). Effects of sewage sludge amendment and wetting–drying cycles of wastewater irrigation on structural improvement of clay soil. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19*(7), 6453-6466. <https://doi.org/10.1007/S13762-021-03585-8>
- Balidakis, A., Matsi, T., Karagianni, A.-G., & Ipsilantis, I. (2022). Soil Application of Sewage Sludge Treated with Clay Minerals or Biochar and Its Effect on Soil Properties and White Clover's (*Trifolium repens* L.) Growth and Arbuscular Mycorrhizal Fungal Root Colonization. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(22). <https://doi.org/10.3390/app122211382>
- Belmeskine, H., Ouameur, W. A., Dilmi, N., & Aouabed, A. (2020). The vermicomposting for agricultural valorization of sludge from Algerian wastewater treatment plant: impact on growth of snap bean *Phaseolus vulgaris* L. *Heliyon*, *6*(8). <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2020.E04679>
- Boruszko, D. (2020). Influence of sonication on changes in micro-and macro-elements content and availability of organic matter in stabilized sewage sludge used for agricultural purposes. *Desalination and Water Treatment*, *199*, 57-65. <https://doi.org/10.5004/DWT.2020.25848>

- Boruszko, D. (2023). Impact of effective microorganisms on the vermicomposting of sewage sludge. *Desalination and Water Treatment*, 288, 273-282. <https://doi.org/10.5004/DWT.2023.29322>
- BRASIL. (2006). Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, Resolução CONAMA n° 375. *Resolução CONAMA n° 375, 1*, 32.
- Cardoso, P. H. S., Gonçalves, P. W. B., Alves, G. D. O., Pegoraro, R. F., & Sampaio, R. A. (2021). Production of organic fertilizer based on sewage sludge cultivated with grass under an aeration system1. *Revista Ceres*, 68(5), 471-483. <https://doi.org/10.1590/0034-737X202168050012>
- Castellanos-Rozo, J., Galvis-López, J. A., Merchán-Castellanos, N. A., Manjarres-Hernández, E. H., & Rojas, A. L. (2020). Assessment of two sludge stabilization methods in a wastewater treatment plant in Sotaquira, Colombia. *Universitas Scientiarum*, 25(1), 17-36. <https://doi.org/10.11144/JAVERIANA.SC25-1.AOTS>
- Catalina Iticescu, Georgescu, P.-L., Arseni, M., Cioca, L.-I., Rosu, A., Timofti, M., & Gabriel Carp. (2021). Optimal Solutions for the use of sewage sludge on agricultural lands. *Water*, 1-15.
- Clapp, C. E., Stark, S. A., Clay, D. E., & Larson, W. E. (1986). *Sewage sludge organic matter and soil properties BT - The Role of Organic Matter in Modern Agriculture* (Y. Chen & Y. Avnimelech, Eds.; pp. 209-253). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4426-8_10
- Cobo, M. J., López-Herrera, A. G., Herrera-Viedma, E., & Herrera, F. (2012). SciMAT: A new science mapping analysis software tool. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 63(8), 1609-1630. <https://doi.org/10.1002/asi.22688>
- Collivignarelli, M. C., Canato, M., Abbà, A., & Carnevale Miino, M. (2019). Biosolids: What are the different types of reuse? *Journal of Cleaner Production*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117844>
- Corrêa, R. S., Barbosa, J. Z., Poggere, G. C., Magri, E., & de Oliveira, S. A. (2023). Grain and Foliar Nutritional Responses of Corn (*Zea mays* L.) to Sewage Sludge Soil Application. *Waste and Biomass Valorization*, 14(8), 2629-2641. <https://doi.org/10.1007/s12649-023-02037-3>
- da Silva, W. R., do Nascimento, C. W. A., da Silva, F. B. V., de Souza, A. A. B., Fracetto, G. G. M., & de Sá Veloso Ximenes, D. H. (2021). Effects of Sewage Sludge Stabilization Processes on Soil Fertility, Mineral Composition, and Grain Yield of Maize in Successive Cropping.

- Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(2), 1076-1088.
<https://doi.org/10.1007/s42729-021-00423-1>
- da Silva, W. R., Fracetto, G. G. M., Fracetto, F. J. C., da Silva, Y. J. A. V., de Souza, A. A. B., & do Nascimento, C. W. A. (2022). The Stabilization Method of Sewage Sludge Affects Soil Microbial Attributes and Boosts Soil P Content and Maize Yield in a Sludge-Amended Soil in the Field. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(2), 1267-1276.
<https://doi.org/10.1007/S42729-021-00729-0>
- de França, M., Emmerich, M., de Oliveira, T. M. N., Franczack, P., & de Oliveira Maia, B. G. (2021). Toxicity Study of the Sanitary Wastewater Treatment Plant Sludge Aiming Its Reuse in Agriculture. *Water, Air, and Soil Pollution*, 232(6). <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05192-2>
- de Freitas, A. R., Fávaris, N. A. B., Alexandre, R. S., da Silva Souza, T., Galter, I. N., Baptista, J. O., de Lima, P. A. M., de Mello, T., Otoni, W. C., & Lopes, J. C. (2023). Germination, cytotoxicity, and mutagenicity in *Lactuca sativa* L. and *Passiflora alata* Curtis in response to sewage sludge application. *Ecotoxicology*, 32(5), 628-637. <https://doi.org/10.1007/s10646-023-02673-4>
- Eck, N. J. van, Waltman, L., Berg, J. van den, & Kaymak, U. (2006). Visualizing the computational intelligence field [Application Notes]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 1(4), 6-10. <https://doi.org/10.1109/MCI.2006.329702>
- Eid, E. M., El-Bebany, A. F., Taher, M. A., Alrumman, S. A., Galal, T. M., Shaltout, K. H., Sewelam, N. A., & Ahmed, M. T. (2020). Heavy metal bioaccumulation, growth characteristics, and yield of *pisum sativum* l. Grown in agricultural soil-sewage sludge mixtures. *Plants*, 9(10), 1-15. <https://doi.org/10.3390/plants9101300>
- Eid, E. M., Shaltout, K. H., Alamri, S. A. M., Alrumman, S. A., Hussain, A. A., Sewelam, N., El-Bebany, A. F., Alfarhan, A. H., Picó, Y., & Barcelo, D. (2021). Prediction models based on soil properties for evaluating the uptake of eight heavy metals by tomato plant (*Lycopersicon esculentum* Mill.) grown in agricultural soils amended with sewage sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105977>
- Eid, E. M., Shaltout, K. H., Alamri, S. A. M., Alrumman, S. A., Taher, M. A., El-bebany, A. F., Hashem, M., Galal, T. M., Mostafa, Y. S., Ahmed, M. T., Sewelam, N., & Nessem, A. A. (2022). Planned Application of Sewage Sludge Recirculates Nutrients to Agricultural Soil and

- Improves Growth of Okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) Plants. *Sustainability (Switzerland)*, 14(2), 1-13. <https://doi.org/10.3390/su14020740>
- Ensslin, L., Ensslin, S. R., Lacerda, R. T. de O., & Tasca, J. E. (2010). ProKnow-C, Knowledge Development Process—Constructivist: processo técnico com patente de registro pendente junto ao INPI. *Brasil: [sn]*.
- Environmental Protection Agency. (2025). 40 CFR Part 503 (up to date as of 4/11/2025) Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge This. *40 CFR Part 503*.
- Fachini, J., Coser, T. R., de Araujo, A. S., Vale, A. T. Do, Jindo, K., & de Figueiredo, C. C. (2021). One year residual effect of sewage sludge biochar as a soil amendment for maize in a Brazilian oxisol. *Sustainability (Switzerland)*, 13(4), 1-14. <https://doi.org/10.3390/su13042226>
- Fei-Baffoe, B., Amo-Asare, J., Sulemana, A., & Miezah, K. (2021). Levels of lead, copper, and zinc in cabbage (*Brassica oleracea* sp.) and lettuce (*Lactuca sativa* sp.) grown on soil amended with sewage sludge. *Journal of Environmental and Public Health*, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/8386218>
- Frimpong, K. A., Abban-Baidoo, E., & Marschner, B. (2021). Can combined compost and biochar application improve the quality of a highly weathered coastal savanna soil? *Heliyon*, 7(5), e07089. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07089>
- Frišták, V., Bošanská, D., Turčan, V., Pipiška, M., Pfeifer, C., & Soja, G. (2023). Relevance of Pyrolysis Products Derived from Sewage Sludge for Soil Applications. *Agriculture (Switzerland)*, 13(1), 1-14. <https://doi.org/10.3390/agriculture13010089>
- Ghangrekar, M. (2022). *Sludge Management* (pp. 619-691). https://doi.org/10.1007/978-981-19-4048-4_15
- Godlewska, P., Kończak, M., & Oleszczuk, P. (2022). Effect of carrier gas change during sewage sludge or sewage sludge and willow pyrolysis on ecotoxicity of biochar-amended soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 247. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2022.114224>
- Gonçalves, P. W. B., da Costa, C. A., Cardoso, P. H. S., Pegoraro, R. F., Cardoso, G. R., & Versiani, L. C. F. (2022). Bioaccumulation of Potentially Toxic Elements in Lettuce and Soil Fertility Treated with Biosolid. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 22(1), 815-823. <https://doi.org/10.1007/S42729-021-00693-9>

- Gutiérrez-Ginés, M. J., Lehto, N. J., Madejón, E., & Robinson, B. H. (2023). The effect of contrasting biosolids application strategies on soil quality. *Plant and Soil*, 489(1-2), 423-438. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06029-z>
- Halecki, W., López-Hernández, N. A., Koźmińska, A., Ciarkowska, K., & Klatka, S. (2022). A Circular Economy Approach to Restoring Soil Substrate Ameliorated by Sewage Sludge with Amendments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9). <https://doi.org/10.3390/ijerph19095296>
- Hechmi, S., Zoghlami, R. I., Khelil, M. N., Mokni-Tlili, S., Kallel, A., Trabelsi, I., & Jedidi, N. (2022). Cumulative effect of sewage sludge application on soil adsorption complex and nutrient balance: a field study in semi-arid region (Oued Souhil, Tunisia). *Arabian Journal of Geosciences*, 15(1). <https://doi.org/10.1007/S12517-021-09369-1>
- Huezo, L., & Shah, A. (2023). Effect of Hydrochar from Anaerobically Digested Sewage Sludge and Manure as a Soil Amendment on Soil Properties and Plant Responses. *Bioenergy Research*, 16(2), 1195-1204. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10479-1>
- Ippolito, J. A., Li, L., Banet, T., Brummer, J. E., Buchanan, C., Betts, A. R., Scheckel, K., Basta, N., & Brown, S. L. (2024). Soil health as a proxy for long-term reclamation success of metal-contaminated mine tailings using lime and biosolids. *Soil and Environmental Health*, 2(3). <https://doi.org/10.1016/J.SEH.2024.100096>
- Koyuncu, S. (2022). Occurrence of organic micropollutants and heavy metals in the soil after the application of stabilized sewage sludge. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 20(1), 385-394. <https://doi.org/10.1007/S40201-022-00785-3>
- Leblanc, R. J., Mattews, P., Richard, R. P., Leblanc, R. J., Mattews, P., & Richard, R. P. (2006). Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management. En *Proceedings of IWA Conference—Moving forward Wastewater biosolids sustainability technical managerial and public synergy June*. <http://www.bvsde.paho.org/bvsaar/cdlodos/pdf/wastewatersludge117.pdf>
- Li, Y., Sun, B., Deng, T., Lian, P., Chen, J., & Peng, X. (2021). Safety and efficiency of sewage sludge and garden waste compost as a soil amendment based on the field application in woodland. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 222(December 2020), 112497. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112497>

- Lin, Z., Price, G. W., Liang, C., Burton, D. L., & Lynch, D. H. (2024a). Effects on soil carbon storage from municipal biosolids application to agricultural fields. *Journal of Environmental Management*, 361. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2024.121249>
- Lin, Z., Price, G. W., Liang, C., Burton, D. L., & Lynch, D. H. (2024b). Effects on soil carbon storage from municipal biosolids application to agricultural fields. *Journal of Environmental Management*, 361. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121249>
- López-Robles, J.-R., Guallar, J., Gamboa-Rosales, N.-K., Otegi-Olaso, J. R., & Cobo, M. J. (2019). Mapa de la estructura intelectual de El profesional de la información de 2014 a 2018. *Hipertext.net*, 19, 115-125. <https://doi.org/10.31009/hipertext.net.2019.i19.09>
- Mabrouk, O., Hamdi, H., Sayadi, S., Al-Ghouti, M. A., Abu-Dieyeh, M. H., & Zouari, N. (2023). Reuse of Sludge as Organic Soil Amendment: Insights into the Current Situation and Potential Challenges. *Sustainability (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/su15086773>
- Manjarrés-Hernández, E. H., Castellanos-Rozo, J. M., Galvis-López, J. A., & Merchán-Castellanos, N. A. (2021). Uso de biosólidos en Colombia: métodos de estabilización y aplicaciones a nivel agrícola. *I3+*, 4(1), 9-27. <https://doi.org/10.24267/23462329.792>
- Martins, M. R., Zanatta, M. C. K., Ferreira, W. G., Poletti, E. C. C., & Pires, M. S. G. (2023). Ecotoxicological assessment of natural soil amended with sewage sludge: the impacts on soil edaphic organisms and microbial community. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(11). <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11953-9>
- Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2014). Decreto 1287 Del 10 de Julio De 2014 «Por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales». *10-Julio-2014*, 1-15. http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Decretos/2014/Documents/JULIO/10/DECRETO_1287_DEL_10_DE_JULIO_DE_2014.pdf
- Moinard, V., Redondi, C., Etiévant, V., Savoie, A., Duchene, D., Pelosi, C., Houot, S., & Capowiez, Y. (2021). Short- and long-term impacts of anaerobic digestate spreading on earthworms in cropped soils. *Applied Soil Ecology*, 168(July). <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104149>
- Mulopo, J. (2024). A systematic overview of current advancements for chemical, material, and energy production using sewage sludge for industrial ecology and sustainability transition. *Environmental Sustainability*, 7(1), 5-29. <https://doi.org/10.1007/S42398-023-00301-9>

- Neczaj, E., Grosser, A., Grobelak, A., Celary, P., & Singh, B. R. (2021). Conversion of sewage sludge and other biodegradable waste into high-value soil amendment within a circular bioeconomy perspective. *Energies*, *14*(21). <https://doi.org/10.3390/en14216953>
- Obaideen, K., Shehata, N., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Mahmoud, M. S., & Olabi, A. G. (2022). The role of wastewater treatment in achieving sustainable development goals (SDGs) and sustainability guideline. *Energy Nexus*, *7*. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100112>
- Onchoke, K. K., & Fateru, O. O. (2024). Influence of perlite/biosolid composition on growth and uptake of Cd and Mn by radish (*Raphanus sativus* L.) under greenhouse conditions. *Applied Water Science*, *14*(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s13201-023-02059-1>
- Ortega-Quispe, K., Ccopi-Trucios, D., Lozano-Povis, A., Llanos-Del-pino, A., Gabriel-Campos, E., & Cordova-Buiza, F. (2024). Sustainable Management of Wastewater Sludge Through Composting with Effective Microorganisms: Enhancing the Growth of Tecoma stans. *Organic Farming*, *10*(2), 108-119. <https://doi.org/10.56578/of100202>
- Parlamento Europeo. (1984). Directiva 86/278/CEE del Consejo de 12 de junio de 1986 relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura. *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, *L 181*, 6-12.
- Ragonezi, C., Nunes, N., Oliveira, M. C. O., de Freitas, J. G. R., Ganança, J. F. T., & de Carvalho, M. Â. A. P. (2022). Sewage Sludge Fertilization—A Case Study of Sweet Potato Yield and Heavy Metal Accumulation. *Agronomy*, *12*(8), 1-18. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081902>
- Reyes Araujo, D. Y., Mora Herrera, M. E., Lugo, J., & Del Águila, P. (2020). Stabilization of sewage sludge by vermicomposting applied in the productivity of basil. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, *36*(2), 371-381. <https://doi.org/10.20937/RICA.53537>
- Samara, E., Matsi, T., Ipsilantis, I., & Barbayiannis, N. (2023). Sewage Sludge Stabilized with Clay Minerals: Its Impact on Soil Properties and Ryegrass Growth. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, *23*(1), 556-568. <https://doi.org/10.1007/S42729-022-01065-7>
- Silva-Leal, J. A., Pérez-Vidal, A., & Torres-Lozada, P. (2021). Effect of biosolids on the nitrogen and phosphorus contents of soil used for sugarcane cultivation. *Heliyon*, *7*(3). <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E06360>
- Tambo, N., Kobayashi, M., Thebault, P., & Haubry, A. (1982). Sludge Treatment and Disposal. En *Water Supply* (Vol. 1, Número 2 /3). <https://doi.org/10.2166/9781780402130>

- Tepecik, M., Ongun, A. R., Kayikcioglu, H. H., Delibacak, S., Elmaci, O. L., Celen, A. E., & İlker, E. (2022). Change in cotton plant quality in response to application of anaerobically digested sewage sludge. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29(1), 615-621. <https://doi.org/10.1016/J.SJBS.2021.09.016>
- Urionabarrenetxea, E., Garcia-Velasco, N., Zaldibar, B., & Soto, M. (2022). Impacts of sewage sludges deposition on agricultural soils: Effects upon model soil organisms. *Comparative Biochemistry and Physiology Part - C: Toxicology and Pharmacology*, 255. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2022.109276>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Vannuccini, M. L., Assenza, R., Sturba, L., Faleri, C., & Corsi, I. (2024). Ecological risk assessment of sewage sludge as soil amendment: lethal and sublethal effects in *Eisenia fetida*. *Environmental Science and Pollution Research*, 963-975. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35757-7>
- Venegas, C., Sánchez-Alfonso, A. C., Celis, C., Vesga, F. J., & Mendez, M. G. (2021). Management strategies and stakeholders analysis to strengthen the management and use of biosolids in a colombian municipality. *Sustainability (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/su132112180>
- Villa, Y. B., & Ryals, R. (2021). Soil carbon response to long-term biosolids application. *Journal of Environmental Quality*, 50(5), 1084-1096. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20270>
- Villa, Y., & Ryals, R. (2021). Soil carbon response to long-term biosolids application. *Journal of Environmental Quality*, 50. <https://doi.org/10.1002/jeq2.20270>
- Wordometer. (s. f.). *World population projections*. Recuperado 18 de marzo de 2025, de <https://www.worldometers.info/>
- Xie, S., Yu, G., Jiang, R., Ma, J., Shang, X., Wang, G., Wang, Y., Yang, Y., & Li, C. (2021). Moderate sewage sludge biochar application on alkaline soil for corn growth: a field study. *Biochar*, 3(2), 135-147. <https://doi.org/10.1007/S42773-021-00085-3>
- Zakaria, S. N. F., Aziz, H. A., Hung, Y.-T., Wang, M.-H. S., & Wang, L. K. (2023). *Treatment of Hazardous Sludge from Water and Wastewater Treatment Plants BT - Industrial Waste*

Engineering (L. K. Wang, M.-H. S. Wang, & Y.-T. Hung, Eds.; pp. 1-41). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46747-9_1

Zoghlami, R. I., Hamdi, H., Mokni-Tlili, S., Hechmi, S., Khelil, M. N., Ben Aissa, N., Moussa, M., Bousnina, H., Benzarti, S., & Jedidi, N. (2020a). Monitoring the variation of soil quality with sewage sludge application rates in absence of rhizosphere effect. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(3), 245-252. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2020.07.007>

Zoghlami, R. I., Hamdi, H., Mokni-Tlili, S., Hechmi, S., Khelil, M. N., Ben Aissa, N., Moussa, M., Bousnina, H., Benzarti, S., & Jedidi, N. (2020b). Monitoring the variation of soil quality with sewage sludge application rates in absence of rhizosphere effect. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(3), 245-252. <https://doi.org/10.1016/J.ISWCR.2020.07.007>