

Digestate: a systematic review of its sources, treatments and industrial applications

Carla Jesus, Fernández-Ventura¹; Nayeli Grisseth, Tacuri-Chino²; Gerby Giovanna, Rondán -Sanabria³
^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U17302295@utp.edu.pe, U21300989@utp.edu.pe, c16238@utp.edu.pe

Abstract– *Digestate, a byproduct generated from anaerobic digestion, is presented as an input with potential for industrial use from organic waste and industrial waste; however, its use still faces limitations due to the variability of its quality in terms of its composition. From this, we sought to identify and analyse the most effective treatments applied to digestate in order to recognize its properties and applications in the industry, considering the source from which they come. To do this, the PICO strategy was used, with which the search equation was obtained, obtaining 1,366 documents in the Scopus database from the last 5 years. For screening, the PRISMA methodology was applied, where the necessary inclusion and exclusion criteria were used. Then, 51 open-access articles were selected, which were used for this systematic literature review. The results showed that the most used treatments were solid-liquid separation, hydrothermal carbonization, and membrane treatment. Regarding the most commonly used waste types, these were pig and cattle manure, agricultural waste, and sewage sludge, all of which are used primarily in the agricultural sector as fertilizer, and some in the energy sector due to their high carbon content. Likewise, it is concluded that digestate, when properly treated, can become a key resource for promoting the circular economy in industries, as well as for sustainability, since the use of waste represents an opportunity to reduce negative environmental impacts.*

Keywords - *Digestate, waste treatment, industrial applications, sustainability, circular economy.*

Digestato: una revisión sistemática sobre sus fuentes, tratamientos y aplicaciones industriales

Carla Jesus, Fernández-Ventura¹; Nayeli Grisseth, Tacuri-Chino²; Rondán -Sanabria, Gerby Giovanna³
^{1,2,3}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U17302295@utp.edu.pe, U21300989@utp.edu.pe, c16238@utp.edu.pe

Resumen– *El digestato como subproducto generado a partir de la digestión anaeróbica, se presenta como un insumo con potencial, para uso industrial a partir de residuos orgánicos y desechos industriales; no obstante, su uso aún enfrenta limitaciones por la variabilidad de su calidad en cuanto a su composición. A partir de ello, se buscó identificar y analizar los tratamientos más eficaces aplicados al digestato con el fin de reconocer sus propiedades y aplicaciones en la industria considerando la fuente de la cual provienen. Para ello, se empleó la estrategia PICO con la cual se obtuvo la ecuación de búsqueda obteniendo 1366 documentos en la base de datos Scopus de los últimos 5 años, para el cribado se aplicó la metodología PRISMA donde se utilizaron los criterios de inclusión y exclusión necesarios, seguidamente se seleccionaron 51 artículos de libre acceso, los cuales se utilizaron para esta revisión sistemática de literatura. Los resultados mostraron que los tratamientos más usados fueron la separación sólido líquido, la carbonización hidrotermal y el tratamiento con membranas; en cuanto a los tipos de residuos más empleados fueron el estiércol de cerdo, ganado vacuno, residuos agrícolas y lodos de depuradora, todos ellos aplicados en su mayoría en el sector agrícola como fertilizante y algunos en el sector energético debido a su alto contenido de carbono. Así mismo, se concluye que el digestato al ser tratado adecuadamente, puede convertirse en un recurso clave para fomentar la economía circular en las industrias además de la sostenibilidad puesto que la utilización de residuos representa una oportunidad de reducir los impactos ambientales negativos.*

Palabras clave - *digestato, tratamiento de residuos, aplicaciones industriales, sostenibilidad, economía circular.*

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad la digestión anaeróbica se plantea como una alternativa para convertir residuos orgánicos en digestato, el cual no se considera únicamente un subproducto sino un recurso renovable con varias aplicaciones [1]. La calidad del digestato está influenciada principalmente por la composición de los materiales utilizados y por las condiciones en las que se realiza la digestión anaerobia, empleándose para su producción una amplia variedad de material orgánico como cultivos energéticos, residuos agrícolas como estiércol y restos de cosechas, además de desechos provenientes de la industria alimentaria y agroindustrial, desechos urbanos y lodos procedentes de tratamiento de aguas [2]. Es por ello que el digestato se caracteriza por contener altos niveles de materia orgánica de difícil degradación ya que conserva casi todos los residuos orgánicos originales [3]. Hasta el momento se han empleado una serie de tratamientos aplicados al digestato como microfiltración, ultrafiltración, ósmosis inversa, electrodiálisis selectiva entre otros, que buscan mejorar en lo posible la calidad de este para su posterior reutilización [4].

Por otra parte, las industrias producen elevados volúmenes de desechos y aguas residuales cargadas de contaminantes que

generan impactos negativos en el ecosistema, en el rendimiento agrícola y en la salud pública [5]. Así también, la expansión poblacional ha provocado un notable incremento en la cantidad de desechos producidos y el uso intensivo de materias primas está reduciendo rápidamente las reservas disponibles a nivel global, mientras que simultáneamente se eleva la generación de contaminantes y la cantidad de desechos liberados al medio ambiente [6]. Es así que los desafíos ambientales asociados con la eliminación de residuos orgánicos agrícolas y la creciente demanda de energías renovables enfatizan la importancia del digestato como un producto rico en nutrientes, ofreciendo una solución sostenible para la gestión de desechos y transformación de energía [7].

Dado que el contenido del digestato puede variar considerablemente, resulta fundamental desarrollar investigaciones sobre alternativas mejoradas que permitan su utilización eficiente, lo cual requiere comprender a fondo las interacciones entre los compuestos bioactivos presentes y métodos de extracción uniformes que faciliten su uso en diferentes sectores industriales [8]. La aplicación de diferentes métodos en el tratamiento del digestato busca principalmente mejorar su composición y elevar su nivel de calidad, ya que el manejo de este subproducto representa un aspecto fundamental principalmente orientado a la fertilización agrícola, sin embargo, antes de aplicarlo en los cultivos, es indispensable verificar los niveles de compuestos potencialmente peligrosos, debido a que cuando el digestato obtenido a partir de la digestión anaeróbica presenta baja calidad, puede representar un riesgo ambiental por la posible presencia de metales pesados, agentes patógenos y otras sustancias contaminantes [9]. Por las razones antes mencionadas, es necesario analizar cómo la calidad final del digestato y los diversos usos que se le pueda dar en la industria influyen en una visión enfocada a minimizar el impacto ambiental, el aprovechamiento sostenible de recursos y la generación de beneficios a las empresas industriales mediante la reutilización de sus desechos [10].

De este modo, en la presente revisión se pretende identificar y analizar los tratamientos más eficaces para el digestato a partir de la fuente de la cual provienen; con el propósito de mejorar su calidad y potenciar su aprovechamiento en aplicaciones industriales, permitiendo además reconocer oportunidades para el desarrollo de nuevos tratamientos que aún no han sido ampliamente estudiados o que requieren mayor investigación, a fin de impulsar soluciones innovadoras en el marco de una economía circular que promueva la reutilización sostenible de desechos, la reducción del impacto ambiental y el fortalecimiento de procesos productivos más eficientes y respetuosos con la salud pública.

II. METODOLOGÍA

Para esta revisión sistemática de literatura (RSL) sin metaanálisis se utilizó la estrategia PICO. Con ello, se elaboró una búsqueda efectiva mediante la formulación de preguntas acerca del tema tratado en relación con el problema, intervención, comparación y resultados [11]. A partir de ello, se formuló la siguiente interrogante principal: ¿Qué tratamientos se realiza al digestato para sus usos en la industria, según su materia prima? En base a ello, se descompuso en 4 subpreguntas más concisas según cada componente y se detalla a continuación.

RQ1: ¿Cuáles son las principales fuentes de digestato?

RQ2: ¿Qué tratamientos se realiza al digestato?

RQ3: ¿Cuál es el digestato más empleado y por qué?

RQ4: ¿Qué aplicaciones se le da al digestato?

Posteriormente, se identificaron las palabras clave relacionadas a cada pregunta PICO; luego se ingresó a la base de datos SCOPUS debido a que garantiza calidad y autenticidad de sus informes al pasar por una revisión de pares. Con ello, se obtuvo la ecuación de búsqueda pertinente para recopilar documentos relacionados con el enfoque del tema utilizando los operadores booleanos, tal como se muestra a continuación: (Digestate OR “anaerobic digestate” OR “sources of digestate”) AND (“Hydrothermal carbonization” OR treatments OR post-digestion OR “Thermochemical conversion”) AND (“digestate quality” OR “agro-industrial digestate” OR “organic waste” OR manure OR “food waste” OR “wastewater”) AND (Biofertilizer OR “soil amendment” IVOR “nutrient recovery” OR biofuel OR “microalgae cultivation” OR biochar OR biogas OR fertilizer).

Seguidamente se realizó su análisis utilizando la metodología PRISMA, la cual permite comprender de forma práctica los procedimientos y analizar la eliminación de registros no pertinentes durante el proceso de revisión con la finalidad de garantizar una transparencia total generando visualizaciones que documentan de forma estructurada y secuencial los resultados de un proceso de revisión sistemática [12]. En primera instancia, se obtuvieron 1366 documentos sin aplicar ningún filtro de la base de datos de SCOPUS, siguiendo con la metodología en el cribado se excluyeron 87 documentos que no cumplían con la temática de la investigación a través de un filtro aplicado al resumen, el cual tenía que contener la palabra digestato.

A continuación, se aplicó el filtro de acceso abierto a los 1279 documentos que quedaron; sin embargo, dentro de ello se encontraron documentos con el acceso restringido al texto completo; por lo cual se descartaron en total 762 documentos. Posteriormente, como parte de la metodología PRISMA se definieron los criterios requeridos de inclusión y exclusión los cuales fueron clasificados y utilizados para la selección de artículos, tal como se presenta en la Tabla I.

TABLA I
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN PARA LA SELECCIÓN DE ARTÍCULOS

CÓDIGO	CRITERIOS
CI1	El artículo presenta información de la materia prima para obtención del digestato.
CI2	El artículo presenta información de tratamientos del digestato.
CI3	El artículo tiene información de aplicaciones del digestato en las industrias.
CE1	Se excluyeron libros, conference paper, reviews y cualquier otro distinto al artículo original.
CE2	Se excluyen los artículos publicados menores al 2020.
CE3	Se excluyeron artículos que no son relevantes para la redacción de la RSL.

A partir de ello, utilizando los criterios de exclusión se llevó a cabo una revisión minuciosa de cada documento. En el proceso se descartaron todos los documentos distintos a artículos originales, los publicados antes del año 2020 y aquellos que no tenían relevancia con la RSL, ya que no abordaban al digestato como tema principal de investigación. Como resultado de ello se excluyeron 466 documentos y se obtuvieron 51 artículos elegidos para la RSL (Figura 1).

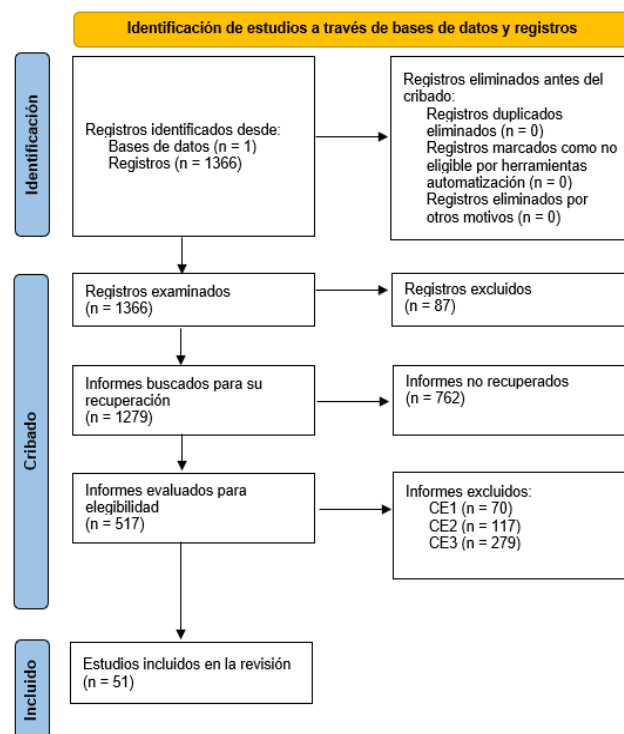


Fig. 1 Diagrama de flujo PRISMA

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la RSL se incluyeron 51 artículos los cuales fueron publicados entre los años 2020 y 2025. De ello se identificó que el número de publicaciones varía significativamente; ya que en el año 2024 se publicaron 13 artículos; mientras que en el 2025 la cantidad de publicaciones sobre el digestato disminuyó a 3 artículos. La distribución de los demás años se visualiza en la Fig. 2.

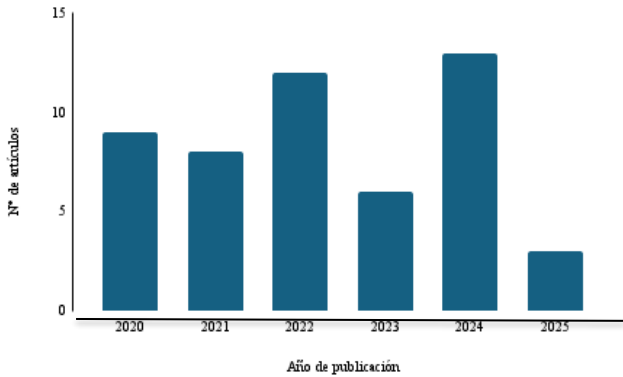


Fig. 2 Artículos incluidos para la RSL según el año de publicación

Además, se clasificaron los artículos para la RSL en relación con el país de origen. Como resultado se encontró que el país con más investigaciones sobre la temática del digestato es España con 7 artículos, seguido de los países Italia y Reino Unido, ambos con 5 artículos; por otro lado, China con 4 artículos; estos son los países que realizaron más estudios respecto al campo de investigación. En total se identificaron 27 países, los detalles sobre el origen de las investigaciones restantes se presentan en la Fig. 3.

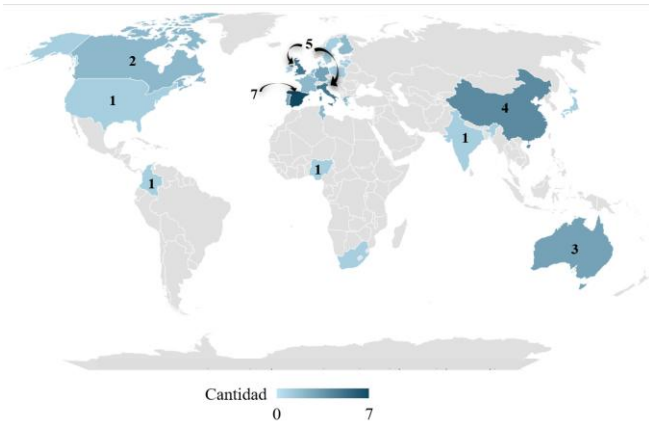


Fig. 3 Artículos incluidos en la RSL según su ubicación geográfica

Por otra parte, se clasificaron los artículos tomando en cuenta en que revista fueron publicados. De ello se identificó que la mayoría de los artículos incluidos para la revisión sistemática de literatura pertenecen al cuartil 1, es decir que los artículos pertenecientes a estas revistas tienen un mayor impacto y visibilidad dentro de su campo de investigación, los demás artículos se presentan en la Tabla II.

TABLA II
RANKING DE REVISTAS CIENTÍFICAS UTILIZADAS SEGÚN CUARTILES

SJR	Nº	Revista	REFERENCIAS
Q1	38	Agronomy Algal Research Applied Soil Ecology Biochar Bioresource Technology Chemical Engineering Journal Chemosphere Energies Energy Environment International Environmental Research Environmental Science and Pollution Research Environmental Technology and Innovation European Journal of Agronomy Frontiers in Environmental Science Frontiers in Microbiology Frontiers in Sustainable Food Systems Journal of Cleaner Production Journal of Environmental Management Journal of Hazardous Materials Molecules Nature-Based Solutions Renewable and Sustainable Energy Reviews Renewable Energy Results in Engineering Science of the Total Environment Separation and Purification Technology Waste Management Water (Switzerland)	[3], [13] - [49]
Q2	12	Applied Sciences (Switzerland) Bioresource Technology Reports Eng Environmental and Climate Technologies Processes Sustainability (Switzerland) Waste and Biomass Valorization Water Science and Technology	[50] - [61]
Q3	1	Desalination and Water Treatment	[62]

De acuerdo con los artículos recopilados para la redacción de la RSL, se identificaron los diversos tratamientos empleados para el digestato. A partir de ello, los tratamientos más utilizados fueron el de separación sólido líquido y tratamiento con membranas cada uno con 9 artículos. Seguidamente el tratamiento mediante carbonización hidrotermal (HTC) el cual fue utilizado en 8 artículos y de precipitación de estruvita con 4 artículos. A continuación, se detalla la importancia de cada tratamiento, así como los métodos o técnicas que se emplean para cada uno tal como se presenta en la Tabla III.

TABLA III
TRATAMIENTOS APLICADOS AL DIGESTATO

Tratamiento	Método o técnicas	Utilidad principal	Referencias
Tratamiento de separación sólido líquido	Floculación-oxidación biológica, dilución, centrifugación, filtración al vacío, filtro de arena, vermifiltro, recirculación, tanque de desgasificación, lagunas facultativas, sedimentación, evaporación, concentración, prensa de tornillo, centrifuga decantadora, filtración por prensa.	Mejora su manejo, reduce el volumen y permite recuperar nutrientes.	[27], [32], [34], [41], [48], [54], [57], [60], [61]
Tratamiento con membranas	Electrodialisis (ED), electrodialisis reversible (EDR), anodo-electrodialisis (Anode-ED), filtración por membranas (microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración), destilación, ósmosis inversa.	Reduce la cantidad de residuos mediante el uso de membranas como barreras selectivas que permiten el paso de agua y nutrientes.	[21], [24], [38], [44]–[47], [51], [56]
Carbonización hidrotermal (HTC)	Carbonización/humificación hidrotermal (HTH).	Convierte el digestato en carbón a través de altas temperaturas, produciendo biochar.	[16], [17], [19], [20], [23], [42], [50], [53]
Precipitación de estruvita	Uso de caliza de lodo de papel calcinada como precipitante; desgasificación de amoníaco.	Se añade magnesio al digestato para formar cristales de estruvita, reduciendo la concentración de nutrientes en exceso.	[25], [43], [52], [62]
Anammox	Desnitrificación y oxidación de DQO.	Reduce la concentración de amoníaco en el digestato mediante bacterias anaeróbicas, mejorando su calidad.	[3], [18], [49]
Cultivo de microalgas	Biorremediación en fotobiorreactores.	Las microalgas cultivadas absorben nutrientes durante su crecimiento, purificando el digestato.	[14], [37], [59]
Acidificación	Secado solar	Se agregan ácidos para reducir el pH del digestato, eliminar patógenos y mejorar la eficacia de tratamientos posteriores.	[31], [36]
Ozono	Ozonización (O ₃), ozonización combinada con peróxido de hidrógeno (O ₃ /H ₂ O ₂)	El ozono elimina patógenos y oxida compuestos orgánicos del digestato, mejorando su calidad.	[22], [28]
Antibióticos	Humedales construidos	Se añaden antibióticos al digestato para eliminar bacterias patógenas y permitir su uso agrícola.	[33]
Nanopartículas	Nanomateriales magnéticos (MNPs)	Utiliza nanopartículas para mejorar la calidad y la eficiencia en el tratamiento de contaminantes y nutrientes.	[39]

Adicionalmente de los tratamientos mencionados en la Tabla III, se identificaron tratamientos que no fueron utilizados en más de dos artículos, pero son importantes ya que mejoran las propiedades del digestato. De acuerdo con ello se menciona en 2 artículos al tratamiento de adición de ácidos y cenizas de madera el cual se emplea para modificar la composición química del digestato regulando su pH [30],[40]. Seguidamente, el tratamiento con adición de biochar el cual al agregar biocarbón al digestato mejora sus propiedades para ser utilizado como compost [35], [58].

Por otro lado, se utilizó el tratamiento mediante adición de fertilizante en 2 artículos donde se indica que permite mejorar la composición del digestato potenciando su valor en la agricultura y la gestión de residuos [13], [15]. Así también el tratamiento de carbón activado es uno de los tratamientos que fue utilizado recientemente, aunque aún faltan realizar más investigaciones sobre ello para conocer sus beneficios al eliminar compuestos no deseados en el digestato mejorando su calidad [55]. De igual manera, se encontró el tratamiento de adición de ácido sulfúrico y el tratamiento con hidrólisis térmica aplicados al digestato con el fin de reducir su pH para ser utilizado como enmienda y reducir patógenos utilizando

calor y agua a alta presión para descomponer al digestato respectivamente [26], [29].

En este estudio se identificó al tratamiento de separación sólido líquido como uno de los más empleados, ya que impulsa las características de las fuentes de digestato. Una de las técnicas empleadas es la floculación y sedimentación las cuales mejoran su gestión y almacenamiento permitiendo la recuperación de nutrientes para su posterior uso como parte líquida y sólida independientemente [41]. En cambio, otros autores aplican métodos de centrifugación o coagulación lo cual permite una eficiencia mayor 44% en la recuperación de nutrientes [63]. Adicionalmente aplicando el método de prensas de tornillo y tambores rotatorios se obtiene un bajo rendimiento menor al 50 %.

En cambio, otros estudios indican que se debe realizar un tratamiento con membranas utilizando sistemas de filtración como la microfiltración y ultrafiltración, los cuales reducen la cantidad de residuos con los que viene el digestato del proceso de la digestión anaeróbica, como resultado solo se utiliza la parte líquida del digestato el cual tiene una mejor concentración de nutrientes [21], [24]. Por otra parte, en términos de producción energética el tratamiento de carbonización

Asimismo, la precipitación con estruvita permite convertir al digestato en un sólido con mayor potencial debido a que el tratamiento se enfoca en remover nutrientes como el amoníaco al modificar el pH del digestato añadiendo una base lo cual permite formar cristales, ello es de suma importancia para evitar la contaminación de suelos y agua [43].

TIPO DE RESIDUO	VENTAJA	USOS EN LA INDUSTRIA	REFERENCIAS
Lodos de depuradora	Alta disponibilidad, rico en macro y micronutrientes N, P y K	Fertilizantes	[25], [26], [31], [36], [39], [42], [44], [49], [57], [61]
Estiércol de cerdo	Alta disponibilidad de nitrógeno y mejor movilidad en el suelo especialmente en condiciones secas.	Enmienda de suelo y biofertilizantes	[14], [18], [21], [24], [27], [28], [29], [31], [32], [38], [45], [53], [62]
Residuos alimentarios	Retención de agua, rendimiento de cultivos	Fertilizante	[13], [15], [16], [19], [23], [24], [40], [46], [55], [56], [58]]
Estiércol de pollo	Reducción de compuestos tóxicos.	Fertilizante	[52], [55]
Estiércol de vacuno y suero de leche	Contenido de sólidos volátiles	Hydrocarbon para combustión y aditivo para compostaje.	[17], [22], [24], [28], [33], [34], [43], [45], [47], [48], [49], [50], [52], [59], [62]
Residuos de cultivos	Potencial mineralización y recuperación de nutrientes.	Fertilizante	[25], [30], [34], [40], [41], [46], [48], [54], [62]

Aguas residuales de almazaras de aceitunas	Baja toxicidad	Fertilizante, enmienda de suelo	[24], [37], [51]
Residuos solidos urbanos	Rico en nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio.	Fertilizante y fuente de nutrientes para cultivar microalgas	[33], [35], [48], [56], [60]
Residuos de biomasa lignocelulósica (silaje de maíz, cascara de semillas)	Alta eficiencia en la recuperación de nitrógeno	Fertilizante	[13], [25], [59]
Residuos de matadero	Alto valor nutritivo (aminoácidos, minerales)	Fertilizante	[24], [31], [56]

RSL del digestato. De esta manera se proporciona una visión detallada de cómo se distribuyen estos residuos en diferentes sectores. Los más representativos son el sector ganadero (23%), el sector agroindustrial (17%) y el sector agrícola (10%); los demás sectores se detallan en la figura 4.

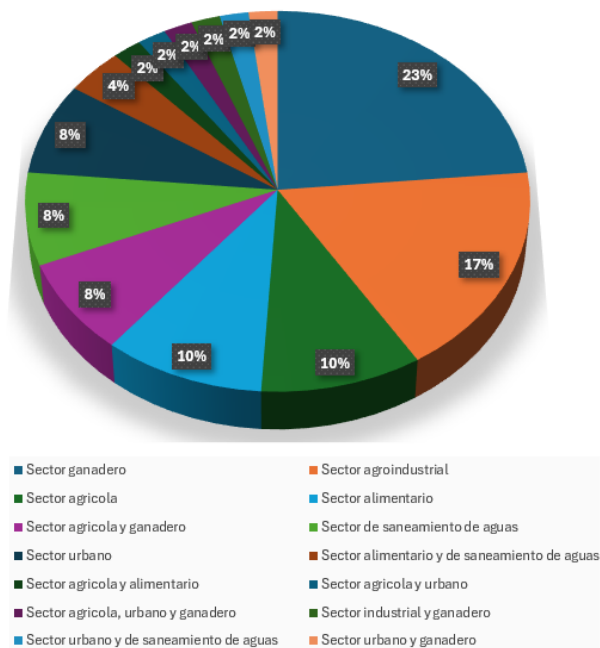


Fig. 4 Sectores productivos que generan la fuente para el digestato.

IV. CONCLUSIONES

Esta revisión identificó las fuentes de digestato que más resaltaron por sus características que fueron el estiércol de cerdo y ganado vacuno, lodos de depuradora y los residuos alimentarios ya que estos destacaron por su alta disponibilidad y contenido en nutrientes como nitrógeno y fósforo así también los residuos de biomasa lignocelulósica como los residuos de estiércol de pollo tienen la ventaja de recuperar el nitrógeno y recuperar los suelos reduciendo los compuestos tóxicos. Por otro lado, los tratamientos más eficientes para el aprovechamiento adecuado del digestato son la separación sólido líquido para un uso independiente puesto que facilita el manejo y su tratamiento posterior para cada fracción optimizando su valorización, la carbonización hidrotermal que permite secuestrar el carbono para su posterior uso en el sector energético, además de los tratamientos con membranas los cuales eliminan patógenos contaminantes para darle un posterior uso como fertilizante o enmienda de suelo y el tratamiento de precipitación con estruvita utilizando bases para cristalizar el digestato y poder ser utilizado en el cultivo de microalgas. También se encontró que en su mayoría el digestato postratamiento se utilizó en el sector agrícola, sin embargo, para futuras investigaciones se recomienda realizar estudios acerca de su uso como combustible, vermicompost y aditivo para

bioplásticos con el fin de promover la economía circular en las industrias.

REFERENCIAS

- [1] M. Czatzkowska, D. Rolbiecki, E. Korzeniewska, and M. Harnisz, "Heavy Metal and Antimicrobial Residue Levels in Various Types of Digestate from Biogas Plants—A Review," *Sustainability* (Switzerland), vol. 17, no. 2, p. 416, Jan. 2025, doi: 10.3390/SU17020416/S1.
- [2] C. Klüpfel, B. Yuan, P. Biller, and B. Herklotz, "Hydrothermal liquefaction as a treatment technology for anaerobic digestate: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 210, p. 115156, Mar. 2025, doi: 10.1016/J.RSER.2024.115156.
- [3] A. S. Varling, V. Chrysochoidis, V. Bisinella, B. Valverde-Pérez, and T. H. Christensen, "Climate change impacts of biological treatment of liquid digestate from the anaerobic digestion of food waste," *Waste Management*, vol. 193, pp. 339–349, Feb. 2025, doi: 10.1016/J.WASMAN.2024.12.013.
- [4] V. Proskynitopoulou et al., "Nutrient recovery from digestate: Pilot test experiments," *J Environ Manage*, vol. 353, p. 120166, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2024.120166.
- [5] A. Tumanyisibwe, M. Nasr, M. Fujii, and M. G. Ibrahim, "Anaerobic Digestion of Dye Wastewater and Agricultural Waste with Bio-Energy and Biochar Recovery: A Techno-Economic and Sustainable Approach," *Water* (Switzerland), vol. 16, no. 14, p. 2025, Jul. 2024, doi: 10.3390/W16142025/S1.
- [6] M. Czatzkowska, I. Wolak, M. Harnisz, and E. Korzeniewska, "Microbial diversity and biosafety judgment of digestates derived from different biogas plants for agricultural applications," *J Environ Manage*, vol. 371, p. 123329, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2024.123329.
- [7] S. Katti, B. Willems, E. Meers, and Ç. Akyol, "Pilot-scale anaerobic digestion of on-farm agro-residues: Boosting biogas production and digestate quality with thermophilic post-digestion," *Waste Management Bulletin*, vol. 3, no. 3, p. 100201, Sep. 2025, doi: 10.1016/J.WMB.2025.100201.
- [8] M. N. H. Sani, M. Amin, K. J. Bergstrand, S. Caspersen, T. Prade, and J. W. H. Yong, "Harnessing biostimulants from biogas digestates for high-value resource recovery: a review," *Environmental Chemistry Letters* 2024 23:1, vol. 23, no. 1, pp. 139–164, Dec. 2024, doi: 10.1007/S10311-024-01801-8.
- [9] J. Mikusińska, K. Szkadłubowicz, Z. Prus, M. Kuźnia, M. Gajek, and M. Wilk, "Fuel properties characterization of hydrochars derived from agricultural digestate," *Renew Energy*, vol. 244, p. 122639, May 2025, doi: 10.1016/J.RENENE.2025.122639.
- [10] K. Chojnacka, K. Moustakas, and A. Witek-Krowiak, "Bio-based fertilizers: A practical approach towards circular economy," *Bioresour Technol*, vol. 295, p. 122223, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2019.122223.
- [11] C. M. D. C. Santos, C. A. D. M. Pimenta, and M. R. C. Nobre, "The PICO strategy for the research question construction and evidence search," *Rev Lat Am Enfermagem*, vol. 15, no. 3, pp. 508–511, 2007, doi: 10.1590/S0104-11692007000300023.
- [12] N. R. Haddaway, M. J. Page, C. C. Pritchard, and L. A. McGuinness, "PRISMA2020: An R package and Shiny app for producing PRISMA 2020-compliant flow diagrams, with interactivity for optimised digital transparency and Open Synthesis," *Campbell Systematic Reviews*, vol. 18, no. 2, p. e1230, Jun. 2022, doi: https://doi.org/10.1002/cl2.1230.
- [13] J. Jamison, S. K. Khanal, N. H. Nguyen, and J. L. Deenik, "Assessing the Effects of Digestates and Combinations of Digestates and Fertilizer on Yield and Nutrient Use of Brassica juncea (Kai Choy)," *Agronomy* 2021, Vol. 11, Page 509, vol. 11, no. 3, p. 509, Mar. 2021, doi: 10.3390/AGRONOMY11030509.
- [14] J. M. Ayre, B. S. Mikan, S. N. Jenkins, and N. R. Moheimani, "Batch cultivation of microalgae in anaerobic digestate exhibits functional changes in bacterial communities impacting nitrogen removal and wastewater treatment," *Algal Res*, vol. 57, p. 102338, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.ALGAL.2021.102338.
- [15] J. O'Connor et al., "Value of food waste-derived fertilisers on soil chemistry, microbial function and crop productivity," *Applied Soil Ecology*, vol. 198, p. 105380, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.APSOIL.2024.105380.

- [16] D. Gamaralalage et al., "Biowaste to biochar: a techno-economic and life cycle assessment of biochar production from food-waste digestate and its agricultural field application," *Biochar*, vol. 7, no. 1, pp. 1–18, Dec. 2025, doi: 10.1007/S42773-025-00456-0/FIGURES/1.
- [17] N. Marzban et al., "Maximizing the value of liquid products and minimizing carbon loss in hydrothermal processing of biomass: an evolution from carbonization to humification," *Biochar*, vol. 6, no. 1, pp. 1–17, Dec. 2024, doi: 10.1007/S42773-024-00334-1/FIGURES/4.
- [18] Y. Qian et al., "Control strategy and performance of simultaneous removal of nitrogen and organic matter in treating swine manure digestate using one reactor with airlift and micro-granule," *Bioresour Technol*, vol. 355, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2022.127199.
- [19] M. He et al., "Process water recirculation for catalytic hydrothermal carbonization of anaerobic digestate: Water-Energy-Nutrient Nexus," *Bioresour Technol*, vol. 361, p. 127694, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2022.127694.
- [20] M. He et al., "Catalytic co-hydrothermal carbonization of food waste digestate and yard waste for energy application and nutrient recovery," *Bioresour Technol*, vol. 344, p. 126395, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2021.126395.
- [21] L. Shi et al., "In situ electrochemical oxidation in electrodialysis for antibiotics removal during nutrient recovery from pig manure digestate," *Chemical Engineering Journal*, vol. 413, p. 127485, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.CEJ.2020.127485.
- [22] M. H. Somers et al., "Behavior of trace elements and micronutrients in manure digestate during ozone treatment," *Chemosphere*, vol. 252, p. 126477, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126477.
- [23] L. Zaccariello, M. L. Mastellone, L. I. D'Amelia, M. Catauro, and B. Morrone, "Assessment of Integration between Lactic Acid, Biogas and Hydrochar Production in OFMSW Plants," *Energies* 2020, Vol. 13, Page 6593, vol. 13, no. 24, p. 6593, Dec. 2020, doi: 10.3390/EN13246593.
- [24] A. Yfantis et al., "Industrial Pilot for Assessment of Polymeric and Ceramic Membrane Efficiency in Treatment of Liquid Digestate from Biogas Power Plant," *Energies* 2022, Vol. 15, Page 6574, vol. 15, no. 18, p. 6574, Sep. 2022, doi: 10.3390/EN15186574.
- [25] A. Akhlar, F. Guilayn, M. Torrijos, A. Battimelli, A. H. Shamsuddin, and H. Carrère, "Correlations between the Composition of Liquid Fraction of Full-Scale Digestates and Process Conditions," *Energies* 2021, Vol. 14, Page 971, vol. 14, no. 4, p. 971, Feb. 2021, doi: 10.3390/EN14040971.
- [26] D. Fernández-Polanco, E. Aagesen, M. Fdz-Polanco, and S. I. Pérez-Elvira, "Comparative analysis of the thermal hydrolysis integration within WWTPs as a pre-, inter- or post-treatment for anaerobic digestion of sludge," *Energy*, vol. 223, p. 120041, May 2021, doi: 10.1016/J.ENERGY.2021.120041.
- [27] N. Duan, B. Khoshnevisan, C. Lin, Z. Liu, and H. Liu, "Life cycle assessment of anaerobic digestion of pig manure coupled with different digestate treatment technologies," *Environ Int*, vol. 137, p. 105522, Apr. 2020, doi: 10.1016/J.ENVINT.2020.105522.
- [28] N. Moradi, C. L. Vazquez, H. G. Hernandez, D. Brđjanovic, M. C. M. van Loosdrecht, and F. R. Rincón, "Removal of contaminants of emerging concern from the supernatant of anaerobically digested sludge by O₃ and O₃/H₂O₂: Ozone requirements, effects of the matrix, and toxicity," *Environ Res*, vol. 235, p. 116597, Oct. 2023, doi: 10.1016/J.ENVRES.2023.116597.
- [29] F. Corona, D. Hidalgo, J. M. Martín-Marroquín, and E. Meers, "Study of pig manure digestate pre-treatment for subsequent valorisation by struvite," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 19, pp. 24731–24743, May 2021, doi: 10.1007/S11356-020-10918-6/FIGURES/7.
- [30] A. Moure Abelenda, K. T. Semple, B. M. J. Herbert, G. Aggidis, and F. Aiouache, "Valorization of agrowaste digestate via addition of wood ash, acidification, and nitrification," *Environ Technol Innov*, vol. 28, p. 102632, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.ETI.2022.102632.
- [31] G. Nascimento, D. Villegas, and C. Cantero-Martínez, "Crop diversification and digestate application effect on the productivity and efficiency of irrigated winter crop systems," *European Journal of Agronomy*, vol. 148, p. 126873, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.EJA.2023.126873.
- [32] H. Luo et al., "Benefits of biobased fertilizers as substitutes for synthetic nitrogen fertilizers: Field assessment combining minirhizotron and UAV-based spectrum sensing technologies," *Front Environ Sci*, vol. 10, p. 988932, Nov. 2022, doi: 10.3389/FENV.2022.988932/BIBTEX.
- [33] P. Porras-Socias et al., "Removal of metals and emergent contaminants from liquid digestates in constructed wetlands for agricultural reuse," *Front Microbiol*, vol. 15, p. 1388895, Jun. 2024, doi: 10.3389/FMICB.2024.1388895/BIBTEX.
- [34] C. Romio, A. J. Ward, and H. B. Møller, "Characterization and valorization of biogas digestate and derived organic fertilizer products from separation processes," *Front Sustain Food Syst*, vol. 8, p. 1415508, Jul. 2024, doi: 10.3389/FSUFS.2024.1415508/BIBTEX.
- [35] B. S. Mickan et al., "Closing the circle for urban food waste anaerobic digestion: The use of digestate and biochar on plant growth in potting soil," *J Clean Prod*, vol. 347, p. 131071, May 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.131071.
- [36] L. Morey et al., "Acidification and solar drying of manure-based digestate to produce improved fertilizing products," *J Environ Manage*, vol. 336, p. 117664, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2023.117664.
- [37] R. Karray et al., "A novel bioprocess combining anaerobic co-digestion followed by ultra-filtration and microalgae culture for optimal olive mill wastewater treatment," *J Environ Manage*, vol. 303, p. 114188, Feb. 2022, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2021.114188.
- [38] W. Cui, J. Meng, S. Wang, Z. Hu, G. Liu, and X. Zhan, "17 β -estradiol (E2) removal in anode-electrodialysis (anode-ED) during nutrient recovery from pig manure digestate," *J Hazard Mater*, vol. 462, p. 132754, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2023.132754.
- [39] E. K. Tetteh, G. Amo-Duodu, and S. Rathilal, "Synergistic Effects of Magnetic Nanomaterials on Post-Digestate for Biogas Production," *Molecules* 2021, Vol. 26, Page 6434, vol. 26, no. 21, p. 6434, Oct. 2021, doi: 10.3390/MOLECULES26216434.
- [40] A. Moure Abelenda, K. T. Semple, A. J. Lag-Brotons, B. M. J. Herbert, G. Aggidis, and F. Aiouache, "Strategies for the production of a stable blended fertilizer of anaerobic digestates and wood ashes," *Nature-Based Solutions*, vol. 2, p. 100014, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.NBSJ.2022.100014.
- [41] M. Juanpera et al., "A robust multicriteria analysis for the post-treatment of digestate from low-tech digesters. Boosting the circular bioeconomy of small-scale farms in Colombia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 166, p. 112638, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.RSER.2022.112638.
- [42] C. I. Aragón-Briceño, O. Grasham, A. B. Ross, V. Dupont, and M. A. Camargo-Valero, "Hydrothermal carbonization of sewage digestate at wastewater treatment works: Influence of solid loading on characteristics of hydrochar, process water and plant energetics," *Renew Energy*, vol. 157, pp. 959–973, Sep. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2020.05.021.
- [43] S. Trotta, F. Adani, M. Fedele, and M. Salvatori, "Nitrogen and phosphorus recovery from cow digestate by struvite precipitation: Process optimization to maximize phosphorus recovery," *Results in Engineering*, vol. 20, p. 101478, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.RINENG.2023.101478.
- [44] L. Weisz et al., "Feasibility study of electrodialysis as an ammonium reuse process for covering the nitrogen demand of an industrial wastewater treatment plant," *Science of The Total Environment*, vol. 954, p. 176699, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2024.176699.
- [45] J. L. Van Puffelen et al., "Performance of a full-scale processing cascade that separates agricultural digestate and its nutrients for agronomic reuse," *Sep Purif Technol*, vol. 297, p. 121501, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.SEPPUR.2022.121501.
- [46] F. Fernandes et al., "Valorising nutrient-rich digestate: Dilution, settlement and membrane filtration processing for optimisation as a waste-based media for microalgal cultivation," *Waste Management*, vol. 118, pp. 197–208, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.WASMAN.2020.08.037.
- [47] M. van der Wal, J. van Alphen, K. Nijmeijer, and Z. Borneman, "Dynamic ammonium retention for nutrient separation from manure digestate," *Waste Management*, vol. 190, pp. 644–653, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.WASMAN.2024.10.034.
- [48] J. Jimenez, M. Grigatti, E. Boanini, D. Patureau, and N. Bernet, "The impact of biogas digestate typology on nutrient recovery for plant growth: Accessibility indicators for first fertilization prediction," *Waste*

- Management, vol. 117, pp. 18–31, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.WASMAN.2020.07.052.
- [49] J. Majtacz, D. Grubba, and K. Czerwionka, “Application of the Anammox Process for Treatment of Liquid Phase Digestate,” *Water* 2020, Vol. 12, Page 2965, vol. 12, no. 11, p. 2965, Oct. 2020, doi: 10.3390/W12112965.
- [50] R. González et al., “Feasibility of Coupling Anaerobic Digestion and Hydrothermal Carbonization: Analyzing Thermal Demand,” *Applied Sciences* 2021, Vol. 11, Page 11660, vol. 11, no. 24, p. 11660, Dec. 2021, doi: 10.3390/AP112411660.
- [51] J. Pluschke et al., “Anaerobic Digestion of Olive Mill Wastewater and Process Derivatives—Biomethane Potential, Operation of a Continuous Fixed Bed Digester, and Germination Index,” *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 9613, vol. 13, no. 17, p. 9613, Aug. 2023, doi: 10.3390/AP13179613.
- [52] A. Nagarajan, Y. Chen, V. Raghavan, B. Goyette, and R. Rajagopal, “Sustainable nutrient recovery through struvite precipitation from poultry and multi-substrate agricultural waste digestates,” *Bioresour Technol Rep*, vol. 27, p. 101924, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.BITEB.2024.101924.
- [53] J. McGregor, S. González-Rojo, D. Carrillo-Peña, R. González González, and X. Gómez, “Assessing Digestate at Different Stabilization Stages: Application of Thermal Analysis and FTIR Spectroscopy,” *Eng* 2024, Vol. 5, Pages 1499–1512, vol. 5, no. 3, pp. 1499–1512, Jul. 2024, doi: 10.3390/ENG5030080.
- [54] B. Ilevina and F. Romagnoli, “Efficient Low-Temperature Nutrient Removal from Agricultural Digestate using Microalgae,” *Environmental and Climate Technologies*, vol. 28, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.2478/RTUECT-2024-0062.
- [55] J. G. Akinbomi et al., “Evaluating Potentials of Activated Carbon, Inoculum Diversity, and Total Solids Content for Improved Digestate Quality in Anaerobic Food Waste Treatment,” *Processes* 2025, Vol. 13, Page 382, vol. 13, no. 2, p. 382, Jan. 2025, doi: 10.3390/PR13020382.
- [56] E. U. Khan, Å. Nordberg, and P. Malmros, “Waste Heat Driven Integrated Membrane Distillation for Concentrating Nutrients and Process Water Recovery at a Thermophilic Biogas Plant,” *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 13535, vol. 14, no. 20, p. 13535, Oct. 2022, doi: 10.3390/SU142013535.
- [57] I. Pecorini et al., “Evaluation of MSW Compost and Digestate Mixtures for a Circular Economy Application,” *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 3042, vol. 12, no. 7, p. 3042, Apr. 2020, doi: 10.3390/SU12073042.
- [58] S. L. Saucedo and A. Lau, “Anaerobic Digestion of Food Waste with the Addition of Biochar Derived from Microwave Catalytic Pyrolysis of Solid Digestate,” *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 7997, vol. 16, no. 18, p. 7997, Sep. 2024, doi: 10.3390/SU16187997.
- [59] G. H. da Silva, N. dos S. Renato, A. C. Borges, M. A. Martins, A. J. D. dos Reis, and M. H. Otenio, “Valorization and Bioremediation of Digestate from Anaerobic Co-Digestion of Giant Reed (*Arundo donax* L.) and Cattle Wastewater Using Microalgae,” *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 10328, vol. 16, no. 23, p. 10328, Nov. 2024, doi: 10.3390/SU162310328.
- [60] T. Steiner, J. N. Möller, M. G. J. Löder, F. Hilbrig, C. Laforsch, and R. Freitag, “Microplastic Contamination of Composts and Liquid Fertilizers from Municipal Biowaste Treatment Plants: Effects of the Operating Conditions,” *Waste Biomass Valorization*, vol. 14, no. 3, pp. 873–887, Mar. 2023, doi: 10.1007/S12649-022-01870-2/TABLES/4.
- [61] D. Kamravanesh and M. Kokko, “Source separation and anaerobic codigestion of blackwater and food waste for biogas production and nutrient recovery,” *Water Science and Technology*, vol. 90, no. 3, pp. 1082–1098, Aug. 2024, doi: 10.2166/WST.2024.251/1449957/WST2024251.PDF.
- [62] P. Myllymäki, J. Pesonen, H. Romar, T. Hu, P. Tynjälä, and U. Lassi, “The use of calcined paper mill sludge as a chemical precipitant in the simultaneous removal of ammonium and phosphate - paper mill waste recycling and reuse,” *Desalination Water Treat*, vol. 194, pp. 459–467, Aug. 2020, doi: 10.5004/DWT.2020.25385.
- [63] A. Folino, D. A. Zema, and P. S. Calabrò, “Environmental and Economic Sustainability of Swine Wastewater Treatments Using Ammonia Stripping and Anaerobic Digestion: A Short Review,” *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 4971, vol. 12, no. 12, p. 4971, Jun. 2020, doi: 10.3390/SU12124971.