

Mejora de la producción de metano y calidad del digestato a partir de la codigestión anaerobia de residuos agroindustriales con nanomateriales: una revisión sistemática.

Maria Fernanda Castañeda Restrepo, Silvia Juliana Lara Franco

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingenieras civiles

Director

Brayan A. Parra Orobio

Doctor en ingeniería

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería civil

Programa Académico

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

*Este trabajo de grado se lo dedico primeramente a Dios por guiarme durante todo este camino, a mi padre Carlos Restrepo por ser un apoyo incondicional para mi e impulsarme a lo largo de mi vida, a mi madre Diana Restrepo por todo el amor y sacrificio para ayudarme a salir adelante, a mis abuelos maternos por nunca dudar de mis capacidades y estar siempre, a mis hermanitos que a pesar de ser tan pequeños me enseñan cada día a ser mejor para ser un gran ejemplo para ellos, a mi segunda madre Carla Cuellar por apoyarme y no dejarme caer nunca, a mis tías por cuidarme y sentirse orgullosas con cada logro obtenido, a mis primos Brian, Isabel, Cris, Jeaneth y Karol por enseñarme grandes cosas y a nunca desistir de mis sueños, a mi mejor amigo Carlos por impulsarme a estudiar lo que siempre había soñado, a Silvia por ser mi amiga y compañera de proyecto, la cual ha estado en todo este largo camino y apoyado en cada paso, a mis mejores amigas que a pesar de la distancia siempre han estado para mi. Así mismo, se lo dedico a Jhon Ortiz que ha sido mi motor, mi amor y amigo, el cual siempre estuvo en los buenos y malos momentos, me enseñó a nunca rendirme y a siempre luchar por lo que quiero, gracias por impulsarme a ser mejor y creer en mi.*

***Maria Fernanda Castañeda Restrepo***

*Este trabajo de grado se lo dedico primordialmente a Dios, que día a día me regaló perseverancia para lograr mis objetivos, también a mis padres, Julio César y Alba Luz por ser pilares en mi formación. A mi hermana Lauren por impulsarme a tomar mejores decisiones y ser mi fiel compañía. A mis tías Yesenia, Julieta e Isabel que a pesar de la distancia siempre tuvieron voz de apoyo. También a mi prima Manuela quien me impulsa a ser mejor persona. Del mismo modo a todos mis amigos que estuvieron presente y entendieron mis ausencias, a mi compañera, mi amiga, un ser incondicional, Maria Fernanda, por apoyar mis ideas e impulsarlas y estar siempre presente, a todos muchas gracias.*

***Silvia Juliana Lara Franco***

### **Agradecimientos**

*Un agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por ofrecernos las herramientas necesarias para efectuar la carrera y este proyecto de investigación, un especial agradecimiento a nuestras familias por todo el apoyo durante este largo camino y siempre recordarnos que todo esfuerzo vale la pena, a nuestro director el profesor Brayan Parra, a nuestros Codirectores el profesor Ricardo Oviedo y el profesor Jonathan Soto, quienes fueron fundamentales en el desarrollo del proyecto. Del mismo modo al grupo de investigación en recursos hídricos y saneamiento ambiental (GPH) por su asesoramiento y guía en la investigación y elaboración de nuestro proyecto de grado. Nos han dejado una gran enseñanza con respecto a la investigación.*

***Maria Castañeda y Silvia Lara***

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	12
1. Objetivos .....	15
1.1 Objetivo General .....	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Análisis bibliométrico .....	16
2.1 Producción científica anual .....	16
2.2 Países destacados en la producción científica.....	17
2.3 Palabras relevantes .....	18
2.4 Tendencia de los temas .....	19
2.5 Evolución temática.....	21
3. Nanomateriales .....	24
3.1 Tipo de nanomateriales .....	24
3.2 Reactores.....	29
3.3 Sustratos .....	31
3.4 Tamaño de nanomateriales .....	36
3.5 Según su diámetro.....	37
3.6 Según su longitud.....	38
3.7.1 <i>Tiempo de retención hidráulica (TRH)</i> .....	39
3.7.2 <i>Temperatura</i> .....	40
3.7.3 <i>pH</i> .....	41
4. Conclusiones .....	45

5.	Recomendaciones .....	47
	Referencias Bibliográficas .....	48
	Apéndices.....	54

**Lista de Tablas**

	<b>pág.</b>
Tabla 1. Nanomateriales grupo metales y aleaciones. ....	25
Tabla 2. Porcentaje de metano presente en el biogás.....	44

**Lista de Figuras**

	<b>pág.</b>
Figura 1. Proceso de mejoramiento de la producción de metano y calidad del digestato por medio de la digestión anaerobia de residuos agroindustriales. ....	14
Figura 2. Producción científica anual. ....	16
Figura 3. Países destacados por la producción científica con nanomateriales. ....	17
Figura 4. Palabras más relevantes. ....	18
Figura 5. Tendencias asociadas al uso de nanomateriales en la Digestión Anaerobia. ....	20
Figura 6. Evolución temática. ....	22
Figura 7. Nanomateriales con base de carbono ....	26
Figura 8. Nanomateriales inorgánicos no metálicos. ....	28
Figura 9. Reactores utilizados en los estudios con nanomateriales. ....	30
Figura 10. Sustrato en la categoría aceites. ....	32
Figura 11. Sustrato en la categoría alimentos. ....	32
Figura 12. Sustrato en la categoría de desechos y residuos. ....	33
Figura 13. Sustrato en la categoría estiércol. ....	34
Figura 14. Sustrato en la categoría lodos. ....	35
Figura 15. Sustrato en la categoría otros. ....	36
Figura 16. Box plot del tamaño de los nanomateriales según su diámetro, n=23 estudios. ....	37
Figura 17. Box plot del tamaño de los nanomateriales según su longitud, n=270 estudios. ....	38
Figura 18. Box plot del tiempo de retención hidráulico (TRH), n=261 estudios. ....	39
Figura 19. Box plot temperatura en °C, n=294 estudios. ....	40
Figura 20. Box plot pH, n=48 estudios. ....	42

**Lista de Apéndices**

	<b>pág.</b>
Apéndice A. Nanomateriales grupo metales y aleaciones. ....	54

## Resumen

**Título:** Mejora de la producción de metano calidad del digestato a partir de la codigestión anaerobia de residuos agroindustriales con nanomateriales: Una revisión sistemática\*

**Autor:** Maria Fernanda Castañeda Restrepo y Silvia Juliana Lara Franco\*\*

**Palabras Clave:** Biogás, Co-digestión anaerobia, Metano, Nanomateriales, Residuos agroindustriales.

**Descripción:** El crecimiento poblacional ha contribuido al incremento en la producción de residuos de alimentos. La valorización de estos residuos puede ayudar a reducir los impactos ambientales de su manejo y a generar productos que puedan ser incorporados en ciclos productivos. La generación de residuos agroindustriales es una problemática actual a nivel mundial, debido a que contribuye a la contaminación ambiental. Para el aprovechamiento de los residuos se insiste en implementar nanomateriales para potencializar la producción del metano y la calidad agrícola del digestato. Este estudio presenta una revisión sistemática sobre la mejora de la producción del metano a partir de la codigestión anaerobia de residuos agroindustriales con nanomateriales. La revisión incluyó la búsqueda y depuración de artículos científicos y el análisis mediante un software libre R studio y Bibliometrix®, donde se encontraron 425 artículos, a los que se les realizó procesos de filtración, revisando en detalle 38 artículos. Los resultados muestran que el nanomaterial más empleado según lo analizado es el hierro granular de valencia cero, ya que la adición de este nanomaterial durante la digestión anaerobia enriquece la producción de metano debido a que entrega electrones que disminuyen el dióxido de carbono. También, se destaca el grafeno el cual permite a los electrones una vía rápida entre las bacterias que producen los ácidos grasos volátiles durante la digestión anaerobia y las arqueas quienes son responsables de la producción del biogás. Por otro lado, existen los factores que inciden en la digestión anaerobia tales como, los subproductos y los sustratos. Con base en esto, se destacan los lodos, los desechos de alimentos y el estiércol de ganado siendo este último el sustrato con más estudios, debido que al manipularse con nanomateriales incrementan la producción de metano con concentraciones superiores al 60% en un rango de [20%-60%] en el biogás.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Brayan A. Parra Orobio. Ing. Sanitario, MSc, PhD.

### Abstract

**Title:** Improving methane production and digestate quality from anaerobic co-digestion of agro-industrial waste with nanomaterials: A systematic review \*

**Author(s):** Maria Fernanda Castañeda Restrepo y Silvia Juliana Lara Franco \*\*

**Key Words:** Biogas, Anaerobic Co-digestion, Methane, Nanomaterials, Agro-industrial waste.

**Description:** Population growth has contributed to the increase in the production of food waste. The recovery of these residues can help reduce the environmental impacts of their management and generate products that can be incorporated into production cycles. The generation of agro-industrial waste is a current problem worldwide, because it contributes to environmental pollution. For the use of waste, it is insisted on implementing nanomaterials to potentiate the production of methane and the agricultural quality of the digestate. This study presents a systematic review on the improvement of methane production from the anaerobic co-digestion of agro-industrial waste with nanomaterials. The review included the search and filtering of scientific articles and the analysis using free software R studio and Bibliometrix®, where 425 articles were found, which were subjected to filtering processes, reviewing 38 articles in detail. The results show that the most widely used nanomaterial according to the analysis is granular iron of zero valence, since the addition of this nanomaterial during anaerobic digestion enriches the production of methane because it delivers electrons that reduce carbon dioxide. Graphene stands out, which allows electrons a fast track between the bacteria that produce volatile fatty acids during anaerobic digestion and the archaea, which are responsible for biogas production. On the other hand, there are factors that affect anaerobic digestion such as by-products and substrates. Based on this, sludge, food waste and cattle manure stand out, the latter being the substrate with the most studies, because when manipulated with nanomaterials they increase methane production with concentrations greater than 60% in a range of [ 20%-60%] in the biogas.

---

\* Degree Work

\*\*Faculty of Physics-Mechanics. School of Civil Engineering. Director: Brayan A. Parra Orobio. Sanitary Engineer, MSc, PhD.

## Introducción

Los residuos agroindustriales presentan un alto potencial para su uso en una variedad de procesos, como la obtención de nuevos productos, la adición de valor a los productos originales y la restauración de las condiciones ambientales modificadas, obteniendo diferentes bioproductos tales como energía, compost o alimento para animales, que pueden reincorporarse a ciclos productivos (R et al., 2017).

La digestión anaerobia (DA) es una tecnología promisorio, que además de transformar la materia orgánica, permite obtener productos de valor. Este proceso permite convertir en subproductos útiles, grandes cantidades de residuos de cultivos, estiércol, desechos de las industrias alimentaria, de fermentación, de papel y algunas industrias químicas (Corredor & Pérez, 2018).

La DA de residuos agroindustriales reviste importancia, por la dificultad para el tratamiento de ciertos sustratos, que pueden carecer de adecuado balance de nutrientes, la movilidad de las bacterias metanogénicas dentro del sustrato se restringe cada vez más a medida que aumenta el contenido de sólidos, lo que puede afectar la eficiencia y la producción de biogás (Varnero,2011).

Los nanomateriales son uno de los productos principales de las nanotecnologías, los cuales poseen formas de tubos, varillas, partículas o fibras, además de ser creados por carbono o minerales. Recientes investigaciones muestran el potencial de mejora de la DA de diversos sustratos cuando han sido incluidos como un aditivo en el proceso. El mecanismo general es un

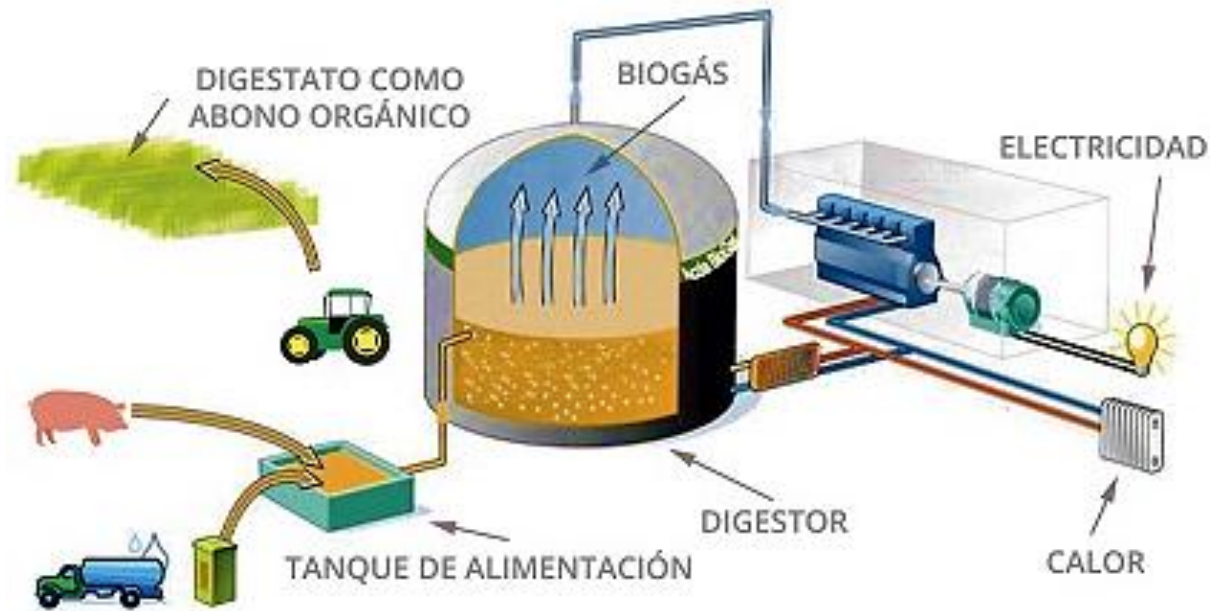
proceso biológico espontáneo en el que intervienen una serie de microorganismos que degradan la biomasa en ausencia de oxígeno, en el cual se obtiene una mezcla de gases (metano y dióxido de carbono) conocida como biogás y una suspensión acuosa o digestato que contiene componentes de biomasa no descompuestos o parcialmente descompuestos y residuos orgánicos (Varnero, 2011).

Dado que la aplicación de nanomateriales es un tema emergente en el mejoramiento de la DA de residuos agroindustriales, en este proyecto de grado se hizo una recopilación de artículos que demuestran como los nanomateriales ayudan a la mejora de la producción del metano y la calidad del digestato con apoyo de los residuos agroindustriales.

Este trabajo demuestra a la sociedad colombiana que se puede hacer un mejor uso de los residuos provenientes de los diferentes desarrollos agroindustriales y a las energías verdes. Asimismo, como los nanomateriales ayudan a la mejora de la producción del metano y la calidad del digestato con el apoyo de los residuos agroindustriales.

**Figura 1**

*Proceso de mejoramiento de la producción de metano y calidad del digestato por medio de la digestión anaerobia de residuos agroindustriales.*



*Nota:* tomado de "Optimización de producción y rendimiento de una planta de Biogás con residuos orgánicos - Biotech Spain " por Amapex Environement, 2022.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Revisar sistemáticamente el efecto del uso de nanomateriales para el mejoramiento de los productos de la digestión anaerobia de residuos agroindustriales, mediante un enfoque de análisis estadísticos.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Identificar los tipos de nanomateriales usados en la codigestión anaerobia de residuos agroindustriales.

Determinar el efecto de los nanomateriales sobre los subproductos de valor agregado generados en la codigestión anaerobia de residuos agroindustriales

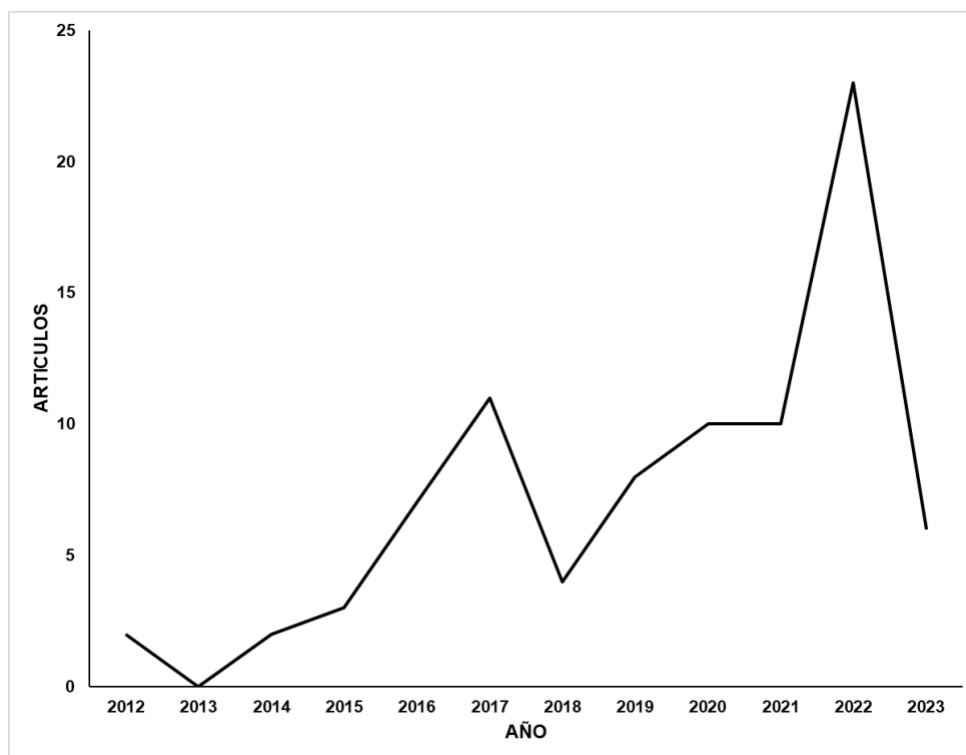
## 2. Análisis bibliométrico

### 2.1 Producción científica anual

Con respecto a la producción científica anual, se puede observar un incremento del 24% en los últimos años, debido al interés que ha venido surgiendo sobre temas de investigación científica en el mundo. En relación con lo anterior, la producción científica mundial aumentó un 21% en el año 2019 con respecto al año 2015 (ver Figura 2). Enfocándose en investigación sobre nanomateriales se ha examinado un progreso drástico en avances científicos, herramientas y nuevas técnicas.

#### Figura 2

*Producción científica anual.*



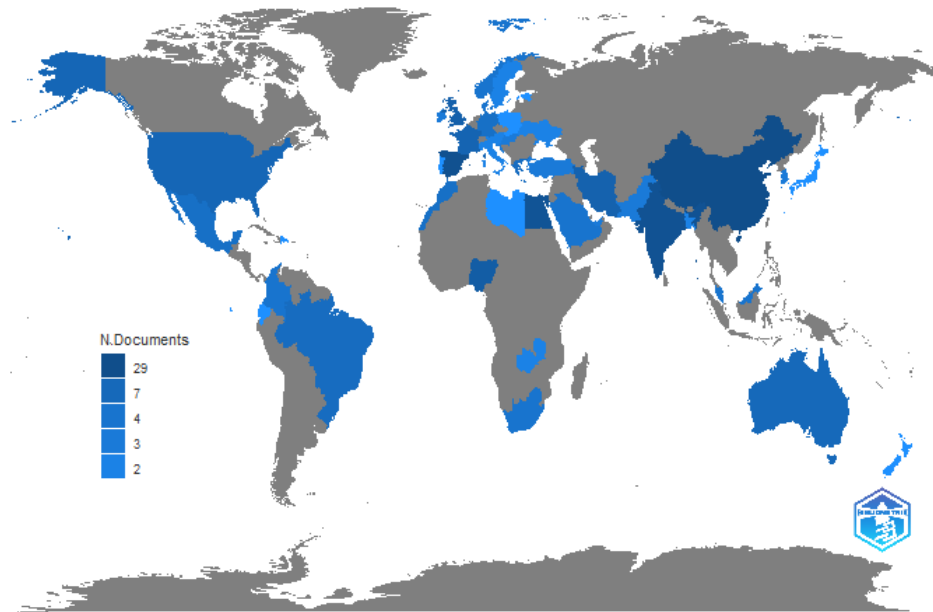
*Nota:* tomado de "Bibliometrix®" por elaboración propia, 2023.

## 2.2 Países destacados en la producción científica

En la producción científica por países se destacó China de Asia y España de Europa con 29 y 25 artículos de estudios (ver Figura 3) científicos sobre el tema en discusión respectivamente, donde se ha observado en las últimas décadas un incremento importante en la cantidad y calidad de la producción científica, aunque en Asia y Europa se concentran en la producción en el área de ciencias físicas (Dávila Rodríguez et al., 2009).

### Figura 3

*Países destacados por la producción científica con nanomateriales.*



*Nota:* tomado de "Bibliometrix®" por elaboración propia, 2023.

China es uno de los países con mayores aportes científicos en el tema de los nanomateriales, en base al número de publicaciones con énfasis en los nanomateriales a base de hierro como FeO y FeO<sub>2</sub> y estructuras carbonizadas como las láminas de grafeno. Además, hay puntos de investigación importantes sobre nanomateriales verdes y sostenibles (Davarazar et al., 2021), China ocupa el primer puesto a nivel mundial en estudios de alto impacto y volumen de

investigación científica (Polo, 2023). China ha logrado avances notables en dos campos como lo es la nanotecnología de la energía y los nanomateriales catalíticos (Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial / Carta de Servicios / Red Exterior CDTI, 2023).

### 2.3 Palabras relevantes

En la Figura 4, se evidencia que las 10 palabras más relevantes que se encontraron en los artículos científicos analizados son, digestión anaerobia, biogás, co-digestión anaerobia, metano, nanomateriales, nanopartículas, producción de biogás, co-digestión, digestato y desechos de alimentos.

#### Figura 4

*Palabras más relevantes.*



*Nota:* tomado de "Bibliometrix®" por elaboración propia, 2023.

La digestión anaerobia y el biogás fueron las palabras más sobresalientes con 43 y 29 artículos científicos respectivamente. Los nanomateriales tienen varias ventajas para la producción de biogás, ya que estos proporcionan más sitios abiertos para las bacterias anaerobias, asimismo ayuda a liberar sustancias poliméricas entre las células cuando se disuelve la materia orgánica. El control de las propiedades de la superficie ayuda a catalizar las grasas animales, las membranas celulares de las plantas y los desechos celulares, y ayuda en la transformación química de la materia orgánica. El uso de nanomateriales en la producción de biogás puede ser una de las formas

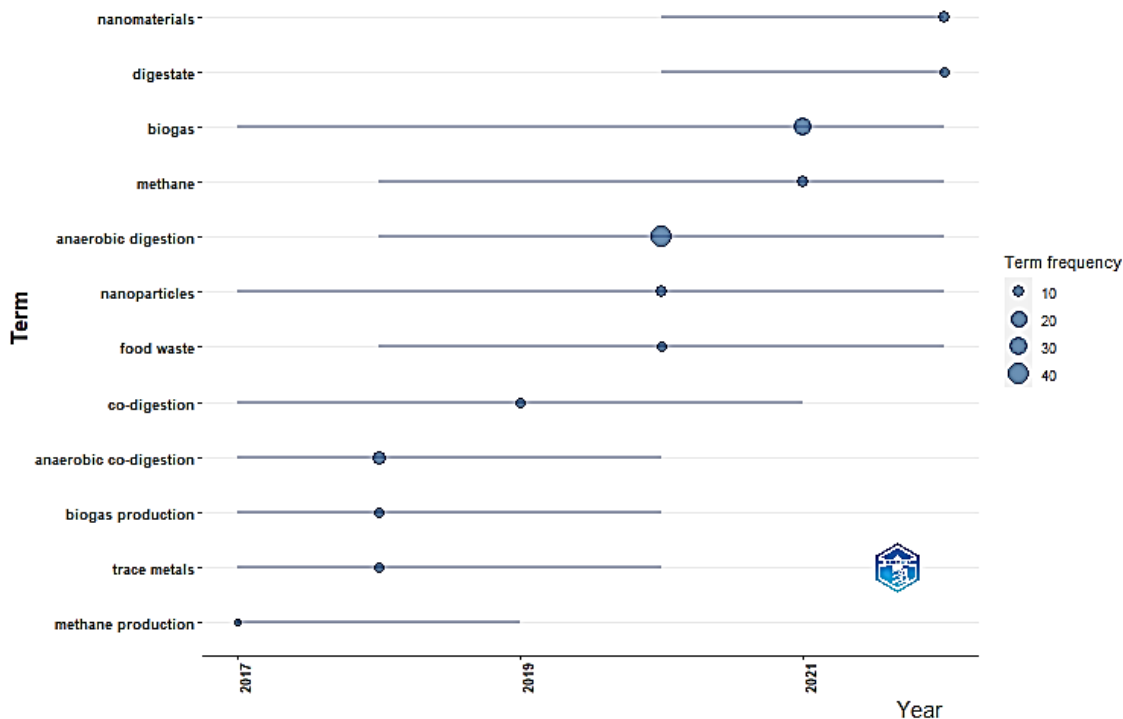
posibles de preservar esta fuente de energía renovable para la producción a gran escala, además de que varios nanomateriales se utilizan como aditivos para mejorar la producción de biogás (Khan et al., 2022). Asimismo, los nanomateriales contribuyen al proceso de digestión anaerobia debido a sus propiedades únicas, como una alta área de superficie específica, solubilidad, adsorción reducida de metales pesados, degradación de materia orgánica, absorción reducida de hidrógeno y naturaleza catalítica, que los hacen muy útiles en muchas aplicaciones debido a su capacidad para mejorar la eficiencia de la digestión anaerobia como donante de electrones (Heikal et al., 2022).

#### **2.4 Tendencia de los temas**

Los temas más importantes vistos en los artículos son digestión anaerobia y biogás entre el año 2019 y 2022 como se puede ver en la Figura 5. Observándose un crecimiento notable año tras año, y con tendencia cada vez más grande.

**Figura 5**

*Tendencias asociadas al uso de nanomateriales en la Digestión Anaerobia.*



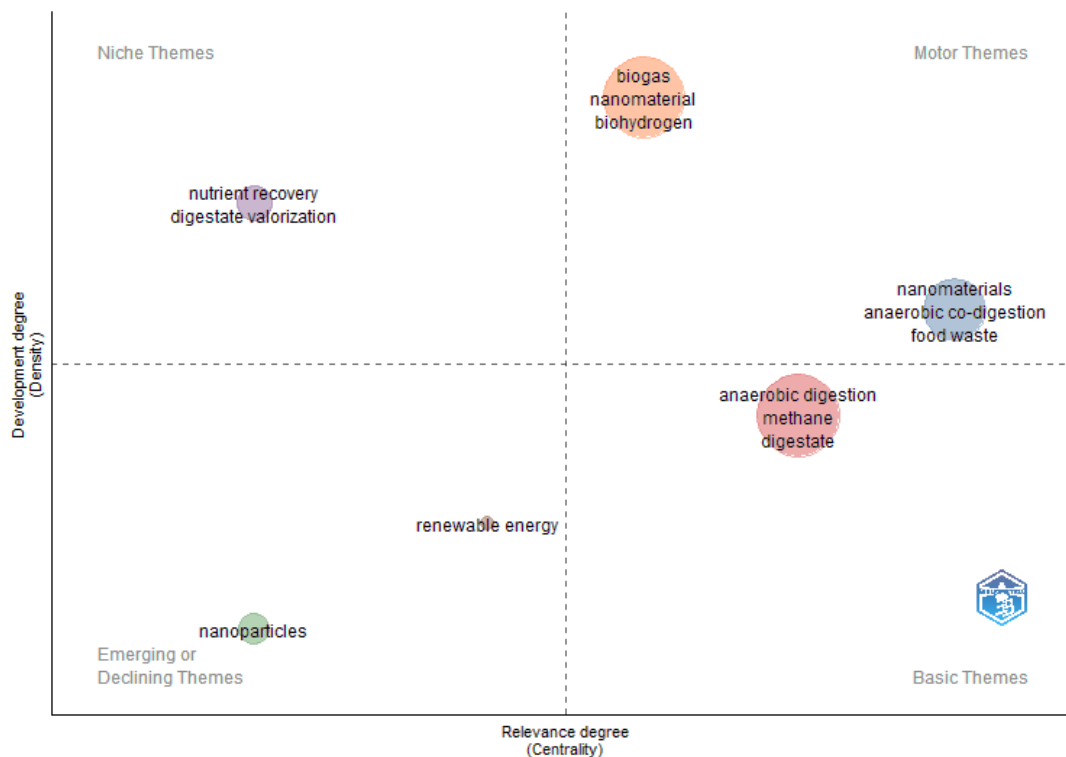
*Nota:* tomado de "Bibliometrix®" por elaboración propia, 2023.

La investigación sobre digestión anaerobia es prometedora para el desarrollo de nuevos procesos que contribuyen a la producción de biogás, siendo este un tema de gran tendencia en los últimos años. La tendencia en la investigación muestra que, en términos de mercado, el biogás está impulsado principalmente por la creciente demanda de electricidad y el creciente enfoque en combustibles alternativos para formas de energía sostenible y seguridad. Sin embargo, la falta de conocimiento y comprensión del biogás como fuente de energía entre el público en general puede obstaculizar el crecimiento del mercado. También, los nanomateriales son un tema de preferencia, ya que, el avance de estos va creciendo considerablemente, explotando su potencial con nuevas ideas y aplicaciones. Asimismo, se espera que el uso creciente de nanomateriales en aplicaciones

de tratamiento de aguas residuales impulse la demanda de nanomateriales en el mercado ( Mordor intelligence, 2023).

## **2.5 Evolución temática**

La evolución temática se analizó en un lapso del 1 de enero de 2010 al 1 de enero de 2023. En la Figura 6 se observan un mapa temático de palabras claves asociadas y determinadas en cuadrantes del plano cartesiano dividido en cuatro puntos de desarrollo de los temas analizados, en el primer cuadrante se posicionan los temas motores o impulsores (motor themes), en el segundo cuadrante se evidencian temas avanzados y aislados (niche themes), en el tercer cuadrante se trata de temas emergentes o en declive ( emerging or declining themes) y finalmente en el cuarto cuadrante se tratan temas básicos y transversales (basic themes) ( López Rodríguez y Neme Chaves, 2023).

**Figura 6***Evolución temática.*

*Nota:* tomado de "Bibliometrix®" por elaboración propia, 2023.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el primer cuadrante se encontraron los temas de biogás, nanomateriales, codigestión anaerobia, biohidrógeno y desechos de alimentos, destacando el biogás, los nanomateriales y la codigestión anaerobia. Con base en esto, se examinó el biogás, ya que está siendo utilizado alrededor del mundo como energía calórica y generador de energía eléctrica; sin embargo, se deben superar desafíos y obstáculos, por lo que se deben desarrollar soluciones para la producción, almacenamiento y uso de biogás a nivel local y regional (Aryal, Vanegas y Pinto, 2023). Los nanomateriales se sintetizan y modifican para mejorar su desempeño en procesos tecnológicos e industriales, la composición del material varía dependiendo de su aplicación potencial. Por otro lado, se destaca que las nuevas tecnologías de nanomateriales son

muy importantes para resolver los problemas del cambio climático y la contaminación ( Sastoque, 2023). En cuanto a la codigestión anaerobia esta permite una mejor utilización de los respectivos sustratos para mejorar el proceso y aumentar la producción de biogás. Además, proporcionar un entorno más estable ayuda a mitigar las fluctuaciones temporales en la composición y generación de residuos individuales. De manera similar, la codigestión anaeróbica puede integrar la recuperación de subproductos orgánicos como los biosólidos (Bernal-Martinez, 2020).

En el segundo cuadrante donde se evidencian los temas avanzados y aislados, se observa la recuperación de nutrientes, la cual es una prioridad que debe abordarse no solo en Europa sino también a nivel mundial, mejorando la eficiencia en la utilización de nutrientes mientras se reducen las pérdidas, produciendo más alimentos y energía con un menor impacto ambiental a través de una mejor utilización de nutrientes, creando una economía ambientalmente más sostenible (Corona Encinas, 2020). Se necesita un nuevo esfuerzo global para diseñar nuevos escenarios, hay muchas maneras de mejorar la gestión de nutrientes y aumentar la eficiencia de la utilización de nutrientes en la agricultura y la ganadería, teniendo como objetivo aumentar la producción mundial de alimentos, optimizar el uso de recursos externos y minimizar el impacto ambiental causado por estas actividades. Uno de los mayores desafíos es implementar la tecnología existente, especialmente considerando la infraestructura que puede ser necesaria o rediseñando y mejorando los sistemas de procesamiento existentes (Corona Encinas, 2020). Asimismo, la valorización del digestato depende de su calidad, que puede variar mucho debido a la concentración final de nutrientes retenidos durante el proceso. Las características del residuo que deja la digestión anaeróbica dependen significativamente del sustrato orgánico que se introduce en el digestor, la

tecnología elegida para obtener biogás y los parámetros operativos del proceso (Ogisa Infraestructuras S.A, 2022).

De igual forma, en el tercer cuadrante donde están los temas en decadencia se observa la energía renovable. El desarrollo de las energías renovables no fue constante y fluctuó en el tiempo. El advenimiento del carbón, y más tarde del petróleo hizo que las energías renovables quedaran temporalmente fuera de la vista por razones de conveniencia económica y practicidad, teniendo como problema principal la inestabilidad, dado que no está enfocado en un área de producción específica, y puede ir y venir con descansos regulares (La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos, 2008). También, las nanopartículas, ya que estas gracias a su carencia en información necesita de estudios sobre los efectos ambientales que conlleva.

Además, en el último cuadrante destaca el metano siendo un precursor importante del ozono troposférico, la reducción de este también reduce los efectos del ozono en la salud y, asimismo, el metano reciclado es una nueva fuente de energía abundante y sostenible para países en desarrollo (Serrano & Alejandro, 2017).

### **3. Nanomateriales**

#### **3.1 Tipo de nanomateriales**

La comisión de la Unión Europea propone una clasificación de los nanomateriales (Gómez, 2015) en cuatro grupos, correspondientes a nanomateriales inorgánicos no metálicos con un 1%, metales y aleaciones con 89%, nanomateriales con base de carbono con un 10% y por último las nanoarcillas con un 0.2%. De acuerdo con los 38 documentos analizados, se encontraron alrededor de 102 nanomateriales utilizados en la DA de residuos agroindustriales, donde las partículas de

hierro granular de valencia cero o ZVI representan un 12% del total, el nanomaterial más popular. En la Tabla 1 se destacan los nanomateriales a base de metales y aleaciones, resaltando este grupo con una mayor participación de 77 nanomateriales (ver apéndice A) correspondientes al 89% de los tipos de nanomateriales estudiados.

**Tabla 1**

*Nanomateriales grupo metales y aleaciones.*

METALES Y ALEACIONES		N	%
ZVI	Hierro granular de valencia cero	50	13
ZnO	Óxido de zinc	32	9
Ni	Níquel	28	7
Ag	Plata	27	7
$Fe_3O_4$	Magnetita	25	7
Co	Cobalto	22	6
$CeO_2$	Dióxido de cerio	19	5
Fe	Hierro	19	5
CuO	Óxido de cobre	15	4
$Fe_2O_3$	Trióxido de dihierro	13	3
$TiO_2$	Dióxido de titanio	13	3
$SiO_2$	Dióxido de silicio	10	3

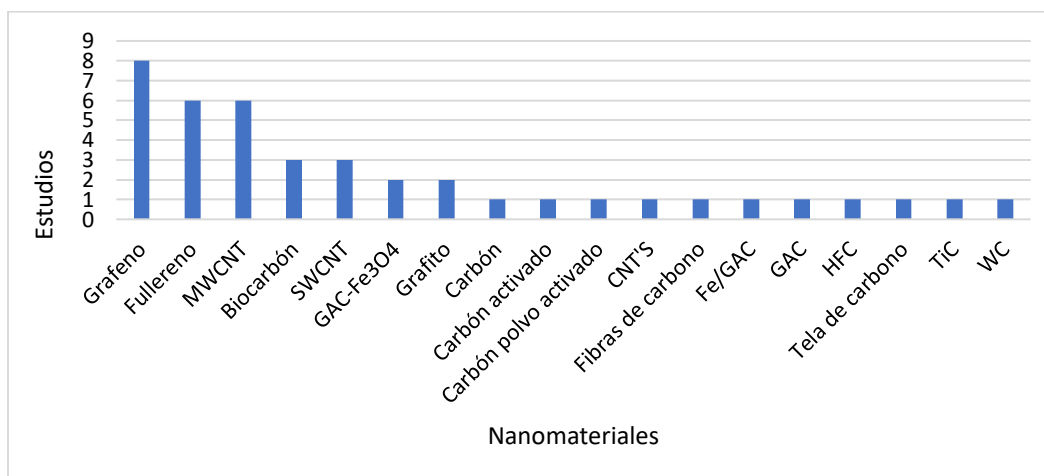
*Nota:* tomado de elaboración propia, 2023.

De la Tabla 1, sobresale el nanomaterial ZVI denominado partículas de hierro granular de valencia cero, debido a que es un material de alta calidad muy común en los tratamientos de agua residuales y, además, es muy económico (Díaz Villanueva, 2022). Por otro lado, este material permite que, durante la DA, según los niveles de adición de nanopartículas, se mejore la producción de metano y la remoción de los sólidos volátiles (Conde et al., 2020), debido a que entrega electrones que disminuyen el dióxido de carbono para producir el metano por medio de la metanogénesis autotrófica (Liang et al., 2017). Con respecto a la magnetita, es el resultado de la corrosión de ZVI durante la digestión anaerobia, mejorando la biodegradación orgánica y como resultado, aumentando la producción del metano (Conde et al., 2020). De igual manera, se encuentran ZnO (óxido de zinc), Ni (Níquel), Ag (Plata), Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Magnetita) y Co (Cobalto) con 9%, 7%, 7%, 7% y 6% respectivamente.

El grupo de nanomateriales con base de carbono abarca el 10% del total de los nanomateriales estudiados, posicionándolo en el segundo grupo con más análisis.

### Figura 7

#### *Nanomateriales con base de carbono*



*Nota:* tomado de elaboración propia, 2023.

De acuerdo con la Figura 7 el grafeno es el nanomaterial con más estudios en esta categoría, representando el 20% de los análisis, seguido del fullereno y de los nanotubos de carbono de pared múltiple o sus siglas en inglés MWCNT con 15% cada uno. El grafeno es un material 100% hecho de carbón, considerado el material más fuerte hoy en día incluso más fuerte que el acero estructural y con mejor dureza que el diamante, con la ventaja que es bidimensional y se presta para diferentes usos (Papageorgiou et al., 2017). El grafeno tiene una forma de nanoplaca la cual comprende de una red hexagonal de átomos en un mismo plano, y es un materia conductor de la electricidad; por ende, permite a los electrones una vía rápida entre las bacterias que producen los ácidos grasos volátiles durante la DA y las arqueas quienes son responsables de la producción del biogás ( Comisión europea, 2021). Asimismo, su presencia en la metanogénesis a corto plazo permite que la producción de metano aumente (Tian et al., 2017). Por otro lado, el fullereno reúne 60 átomos de carbono (C60) acogiendo la forma de una esfera hueca; es insoluble en disoluciones acuosas y químicamente es estable (Conde et al., 2020).

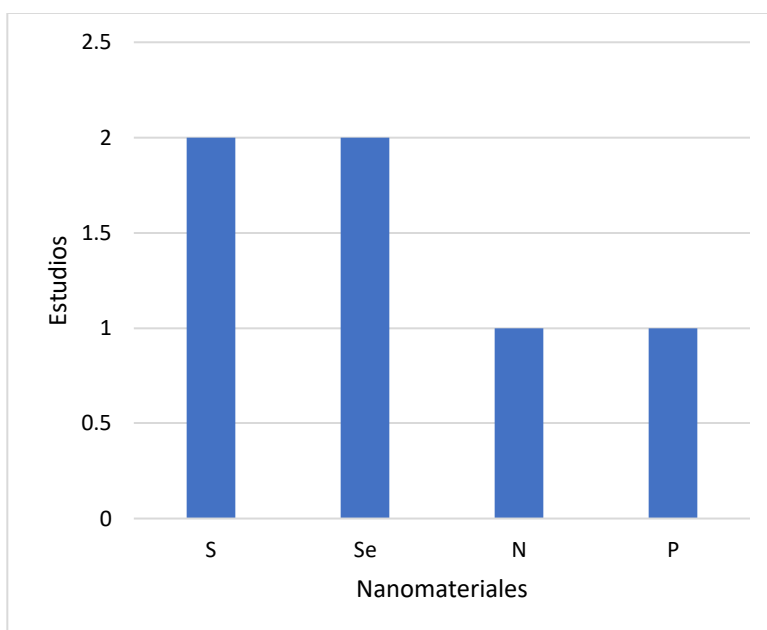
Asimismo, los nanotubos de carbono (MWCNT) son una serie de tubos agrupados uno dentro del otro, caracterizado por ser un material mesoporoso y presenta propiedades neutras. Los nanotubos permiten que la actividad de las bacterias degradadoras del butirato sintróficas y etanol durante el proceso de DA aumenten gracias a su capacidad de intervenir en la transferencia de electrones. Del mismo modo, acelera los procesos más lentos del procedimiento, dando como resultado una alta tasa de producción de metano, además, los MWCNT se pueden reutilizar ya que es posible recuperarlos al final de la operación (Cavaleiro et al., 2020). Sin embargo, se debe ser cuidadoso con este material debido a que un mal manejo o manipulación de este podría causar la inhalación o exposición de este material y llegar a órganos vitales y generar impactos tóxicos en el cuerpo ( Cavaleiro *et al.*, 2020). El alto contenido del biocarbón podría inhibir la producción de

metano (Jiang et al., 2021), por esto, no es un nanomaterial deseable a comparación de los mencionados anteriormente en esta categoría.

Del mismo modo, en la Figura 8 con un 1% de participación se encuentra el grupo de nanomateriales inorgánicos no metálicos.

### Figura 8

*Nanomateriales inorgánicos no metálicos.*



*Nota:* tomado de elaboración propia, 2023.

De acuerdo con la Figura 8 se puede inferir que en este grupo de clasificación los nanomateriales más utilizados fueron a base de azufres (S) y selenio (Se) juntos representando el 66% del total del grupo. Esto se debe a que se involucran en la bioquímica de la formación de metano. Sin embargo, son elementos pocos utilizados porque al tener una gran cantidad de macronutrientes como el azufre y micronutrientes como el selenio, impide el proceso de la digestión anaerobia (Romero, Vilab, Mata, Chimenos, Astales 2016).

Por último, se tiene un único nanomaterial en el grupo de nanoarcillas correspondiente al 0.2% del total, la sílice mesoporosa, con solo un 0.24% haciendo el material irrelevante en el estudio.

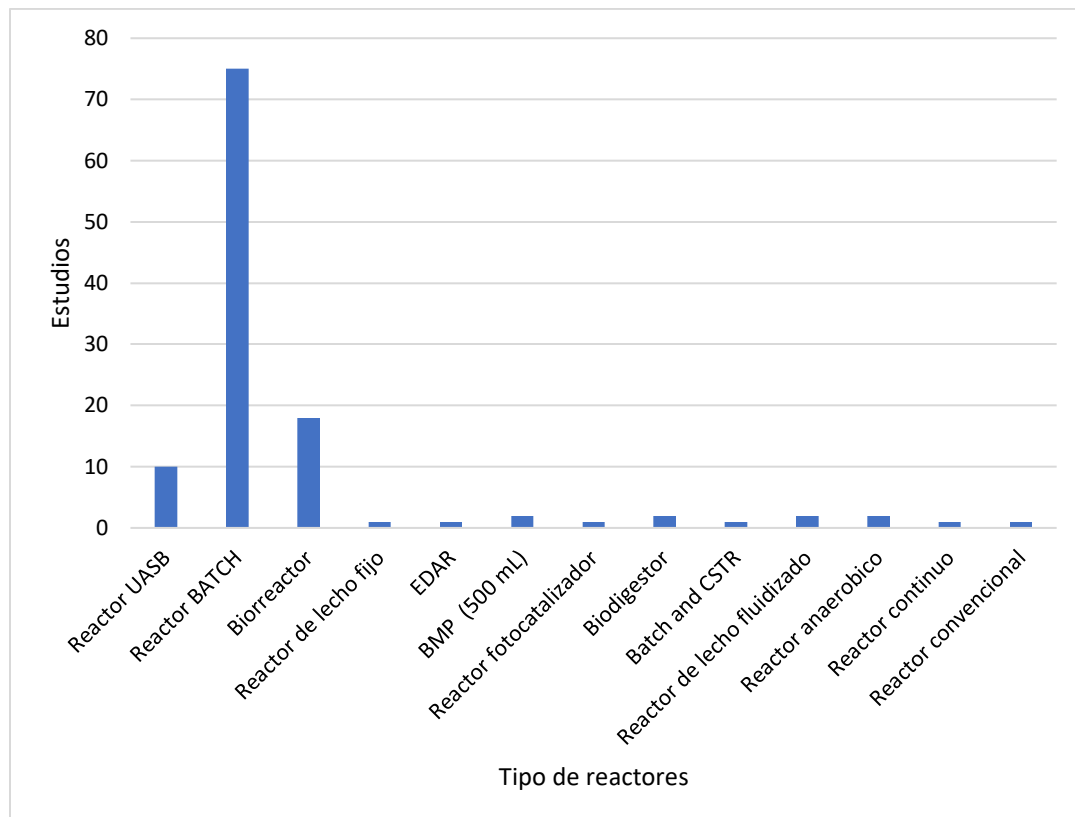
En cada grupo de nanomateriales se resaltaron los más utilizados y el cómo potencia o disminuye el proceso de la DA. Por eso, se entiende que hay que evitar cantidades excesivas de los nanomateriales inorgánicos no metálicos ya que inhiben el proceso. Por el contrario, hacer uso de los ZVI por su eficacia en la remoción de los sólidos volátiles y en el grupo de nanomateriales de carbono, hacer uso del Fullerenos y los MWCNT ya que ambos contribuyen con sus propiedades eléctricas a acelerar la metanogénesis por la comunidad bacteriana presente.

### **3.2 Reactores**

Para poder llevar a cabo el proceso de DA es necesario el uso de reactores, permiten la transformación del efluente en metano.

**Figura 9**

*Reactores utilizados en los estudios con nanomateriales.*



*Nota:* tomado de elaboración propia, 2023.

De acuerdo con la Figura 9 es posible afirmar que el reactor más utilizado en los estudios con nanomateriales es de tipo BATCH con una representación del 64% equivalentes a 75 participaciones donde solo se tiene información del 29% que corresponden a una escala de laboratorio, es decir, menor a 5L. Este es un tipo de reactor discontinuo donde puede variar factores como la temperatura o sus componentes, es decir, trabaja en condiciones no estacionarias (Ibáñez Vega, 2020), y trabaja por lotes. Es utilizado en el tratamiento de aguas residuales y cuenta con un proceso de limpieza sencillo y construcción simple, asimismo, permite la recolección de datos de manera sencilla y la realización de operaciones sin tanta restricción.

De otro lado, se encuentran el biorreactor y reactor UASB con 15% y 9% respectivamente. Asegura homogeneidad para que el crecimiento de los microorganismos sea adecuado al igual que el producto que se desea adquirir con el proceso, por esto se define que realiza un proceso de cultivo (Ruíz-Leza et al., 2007). Asimismo, es escogido debido a su diseño aséptico que evita la aparición de contaminantes en el proceso y el consumo de energía es mínimo (5 a 10 KW) (Kasalab, 2023). Por otro lado, el reactor anaerobio de flujo ascendente o como sus siglas en inglés UASB es de bajo consumo de energía, tiene gran estabilidad del efluente con bajo costos de implantación y permite la aparición del metano como producto final (Engenharia, 2019), siendo estos factores atractivos al momento de escoger el tipo de reactor a usar. Cabe resaltar, que para todos los reactores mencionados se lleva a cabo el proceso de digestión anaerobia, donde la degradación de los microorganismos se hace en la ausencia del oxígeno (Rico & Gabriela, 2023).

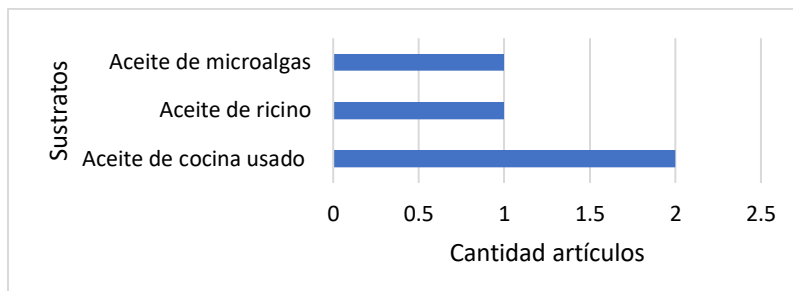
### **3.3 Sustratos**

Los sustratos son un factor importante en el proceso de la digestión anaerobia, debido a que gracias a ellos por medio de la acción microbiana en ausencia de oxígeno se convierte en biogás. Durante la revisión se encontraron alrededor de 96 sustratos agroindustriales diferentes y se clasificaron en 6 categorías para facilidad de análisis, aceites (1%), alimentos (6%), desechos y residuos (23%), estiércol (19%), lodos (26%) y por último otros (20%), presentadas a continuación.

En la Figura 10 se observa que el 50% de estudios relacionados a esta categoría corresponde al aceite de cocina usado, el cual lo posiciona en el más importante; sin embargo, no es de mayor interés debido a que esta categoría solo se lleva el 1% de los análisis comprendidos en los tipos de sustratos llevados a cabo en la DA.

**Figura 10**

*Sustrato en la categoría aceites.*

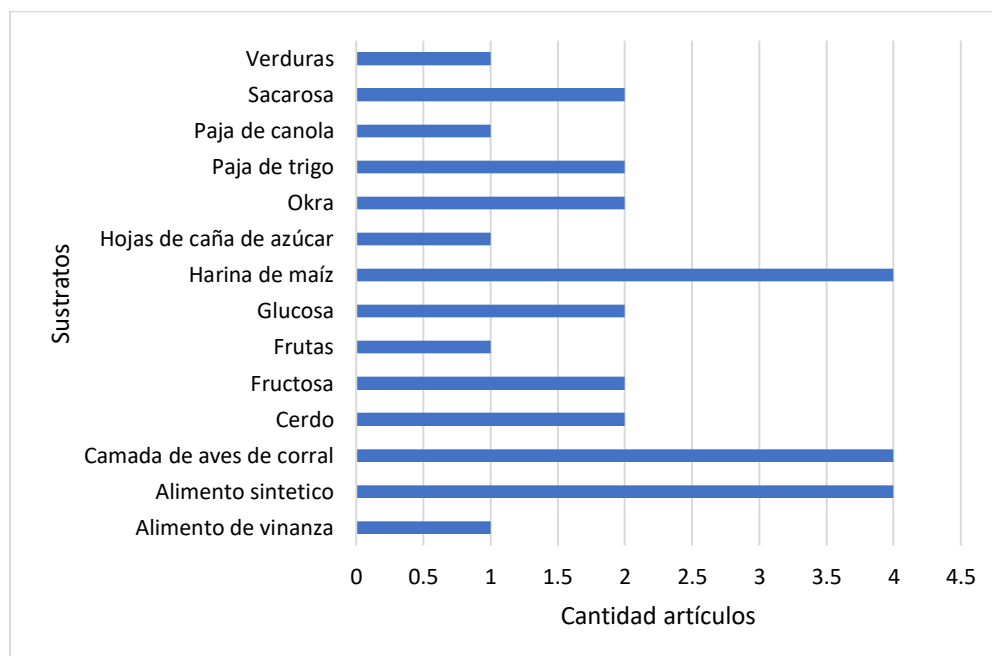


*Nota:* tomado de elaboración propia, 2023.

Como se menciona anteriormente esta categoría no cuenta con suficiente interés como las que se verán posteriormente. Aquí se resalta la harina de maíz, la camada de aves de corral y el alimento sintético (ver Figura 11) con el 41% de análisis en esta categoría.

**Figura 11**

*Sustrato en la categoría alimentos.*

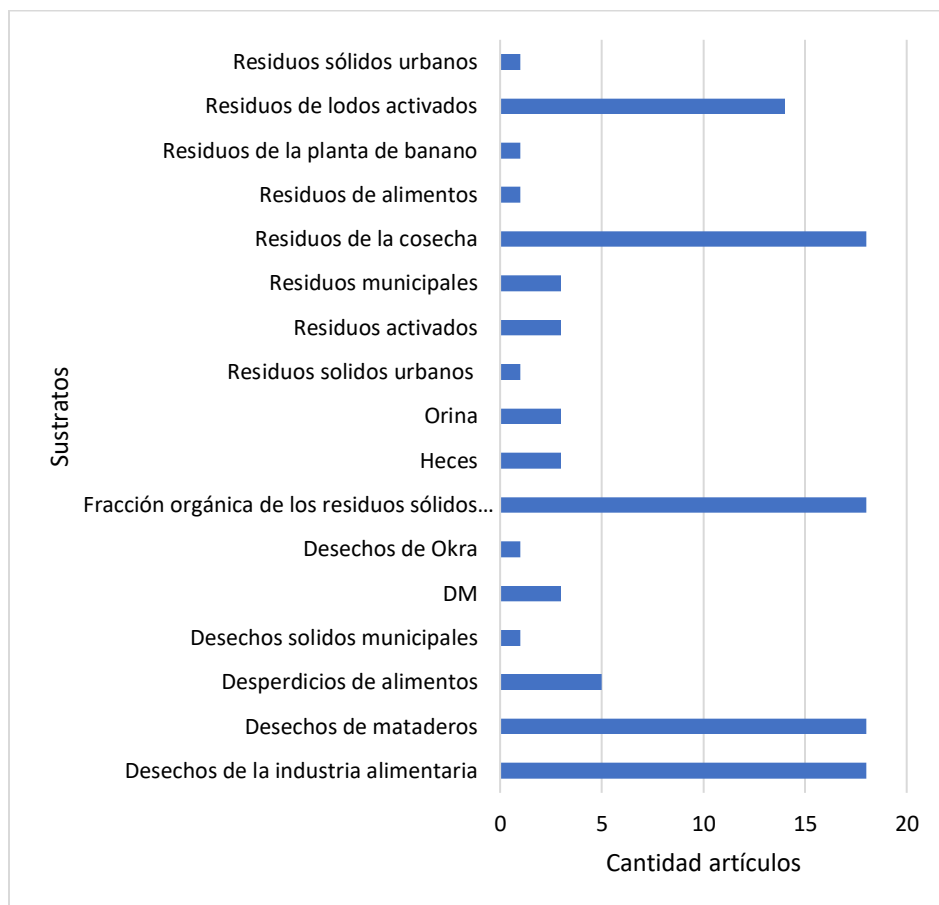


*Nota:* tomado de elaboración propia, 2023.

Los sustratos presentes en la categoría de desechos y residuos cuentan con 23% de estudios posicionándolos como la segunda mejor opción para la obtención de metano y biogás. Destacándose con un 64% de la categoría desechos de la industria alimentaria, mataderos, fracción orgánica de los residuos municipales y residuos de cosecha cada uno con un 16% (ver Figura 12). Es claro que los residuos agroindustriales aportan un sustrato que al ser manipulado con los nanomateriales ayudan a incrementar la producción de metano.

**Figura 12**

*Sustrato en la categoría de desechos y residuos.*

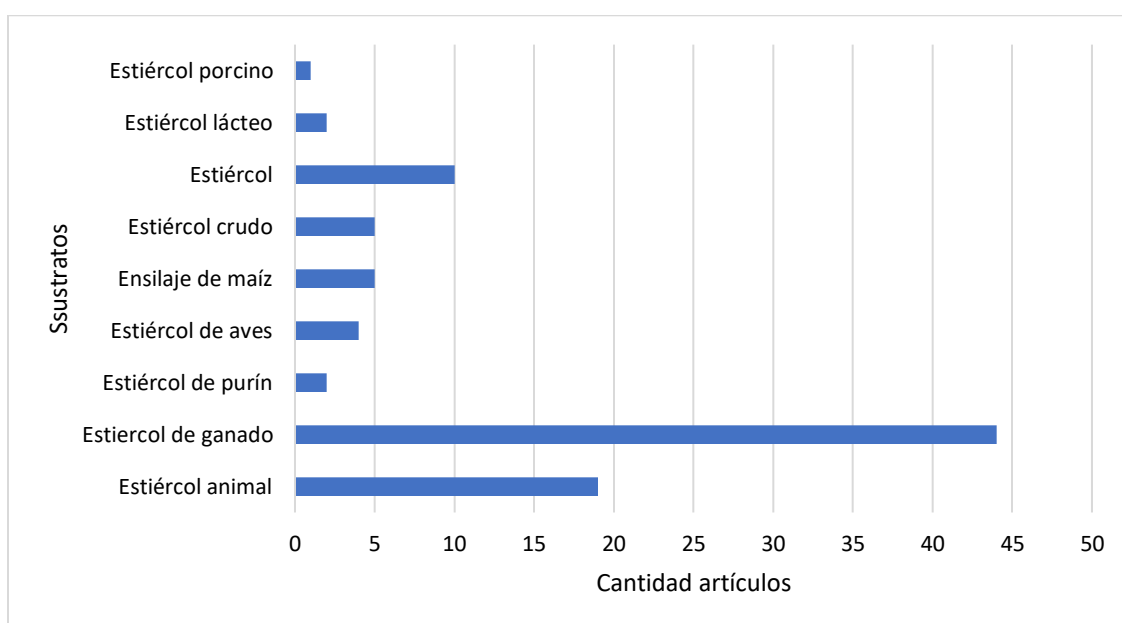


*Nota: tomado de elaboración propia, 2023.*

La categoría de estiércol comprende un 18% del total de los sustratos analizados. Según la Figura 13, el estiércol de ganado engloba un 48% de esta categoría, calificándolo como el sustrato con más estudios que aportan a lograr el objetivo en común mencionado anteriormente, seguido del estiércol de animal sin especificar cuál y estiércol en general con 21% y 11% respectivamente.

### Figura 13

*Sustrato en la categoría estiércol.*

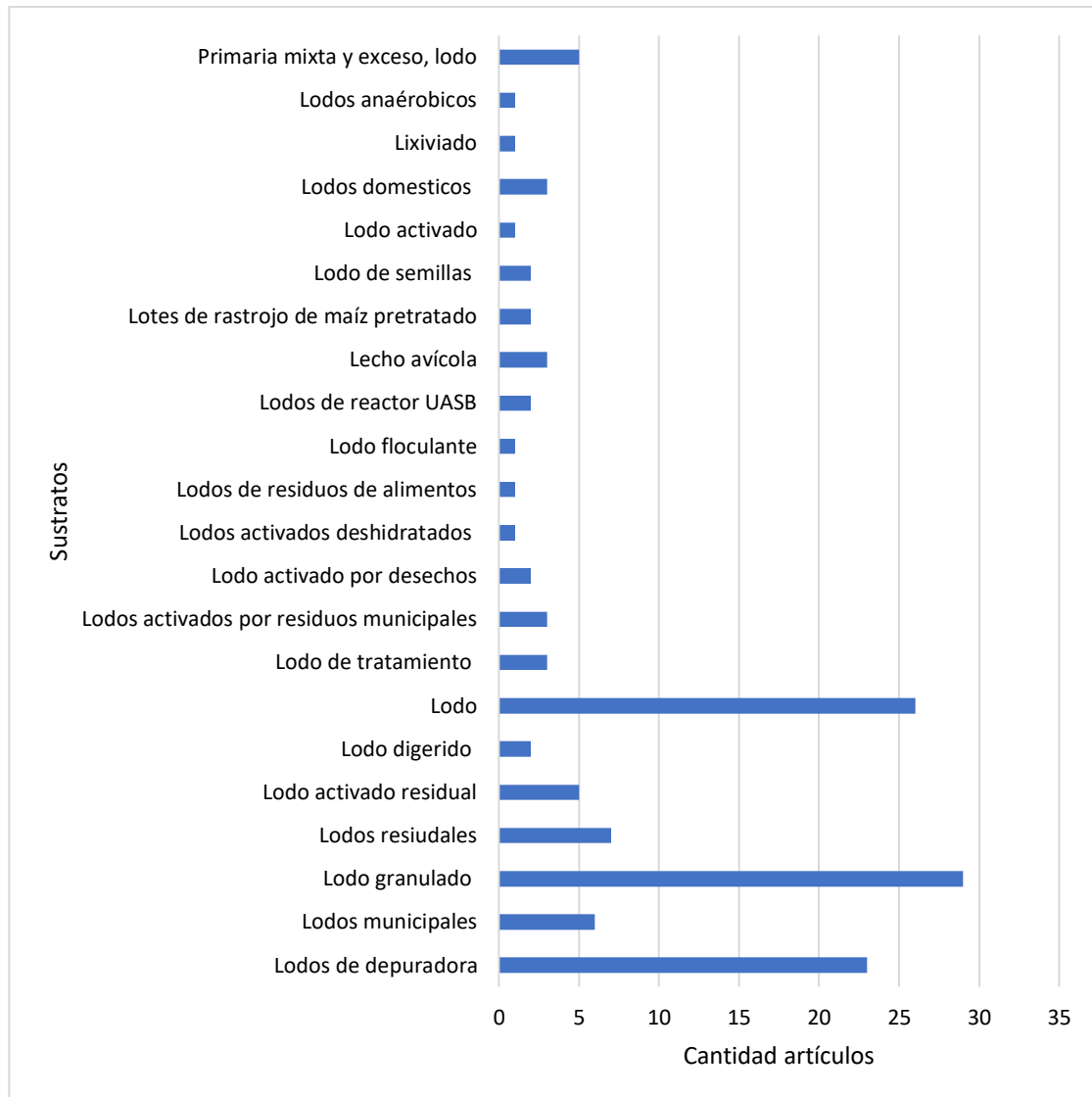


*Nota:* tomado de elaboración propia, 2023.

Abarcando un 26% del total de los sustratos, la categoría de lodos se lleva el mayor reconocimiento a cuantos análisis encontrados, por ende, se califica como el mejor sustrato para la producción del biogás. Especialmente el lodo granulado con un 22% seguido de lodos en general y lodos de depuradora con 20% y 18% respectivamente (ver Figura 14).

**Figura 14**

*Sustrato en la categoría lodos.*

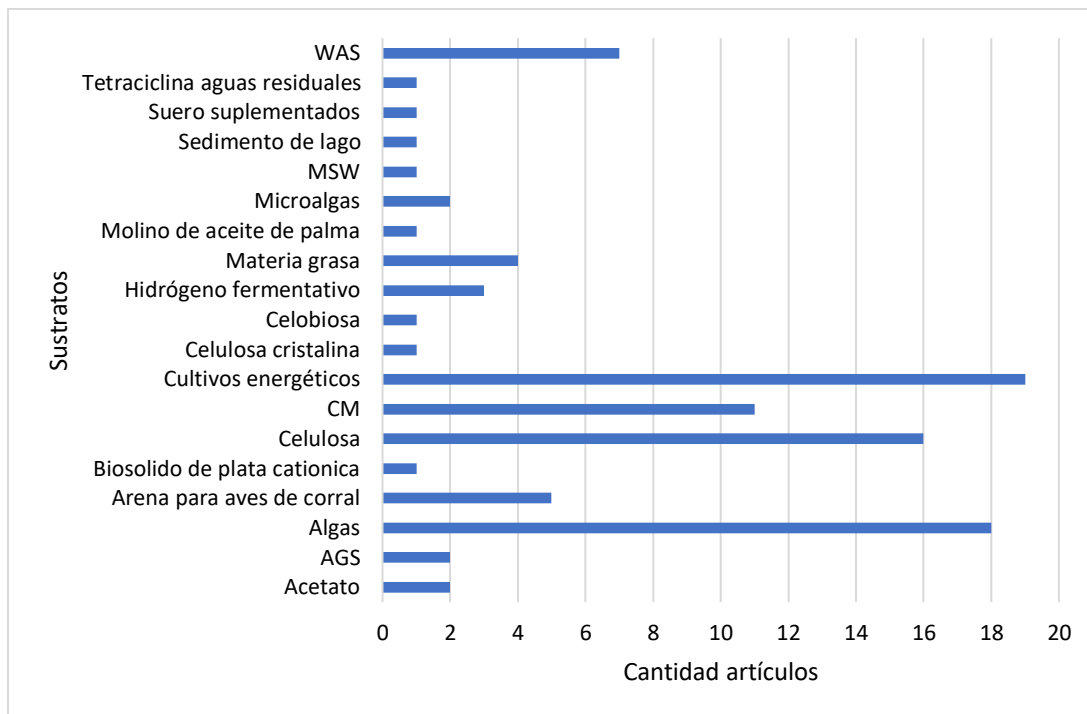


*Nota:* tomado de elaboración propia, 2023.

Por último, los sustratos que no se clasificaron en las categorías anteriores se posicionaron en esta nueva categoría denominada otros (ver Figura 15) comprendiendo un 20% del total. Donde los cultivos energéticos abarcan el 19% y las algas el otro 18% junto a la celulosa con un 16%, con un total del 53% encabezándolos como potenciadores sustratos para la obtención del biogás.

**Figura 15**

*Sustrato en la categoría otros.*



*Nota:* tomado de elaboración propia, 2023.

Recapitulando, los sustratos siempre estarán presentes en las plantas de tratamiento, pero a la hora de escoger el mejor para potenciar la producción del metano y biogás, se debería escoger los lodos sumado con los desechos y residuos agroindustriales, juntos comprenden el 49% de los sustratos analizados.

### 3.4 Tamaño de nanomateriales

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO), establece la definición y terminología para las nanopartículas, por ende, un nanomaterial se comprende por una nanoescala oscilando entre los 1 y 100 nm, un tamaño mucho más pequeño que el de un cabello y cuenta con tres dimensiones externas a la nanoescala (Camacho, 2016). Donde el nanómetro (nm) equivale a

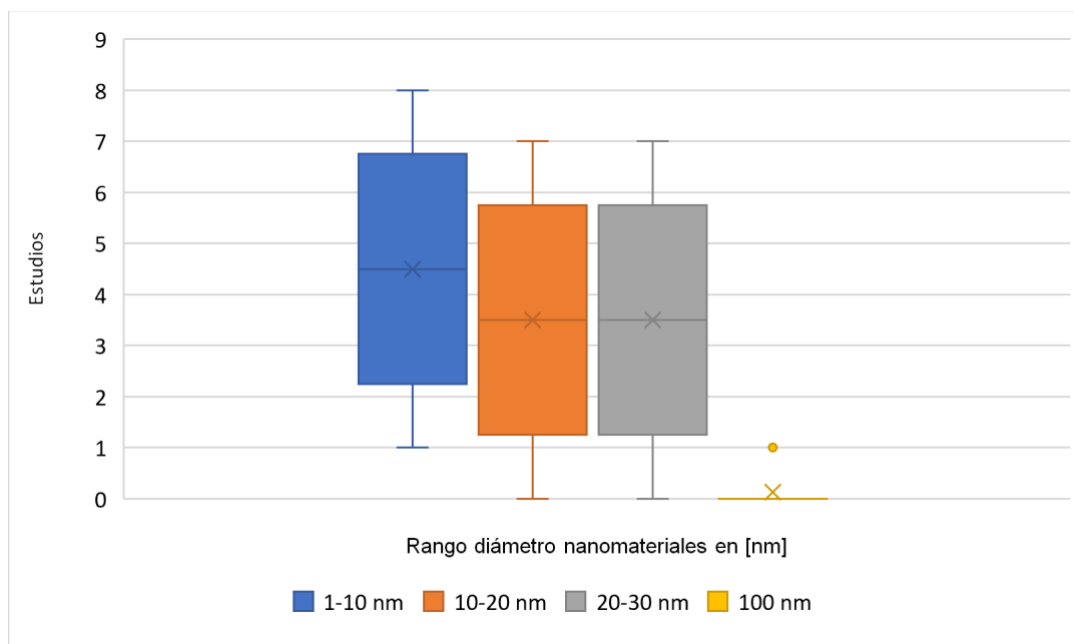
una milmillonésima parte de un metro. Es por esto por lo que en las figuras 15 y 16, encontrarán un repertorio de los tamaños más populares entre los estudios analizados.

### 3.5 Según su diámetro

Como bien se mencionó anteriormente, los nanomateriales cuentan con más de dos dimensiones por ende el diámetro es un parámetro que tuvieron en cuenta los investigadores en sus estudios. En la Figura 16 se evidencia con el 35% los nanomateriales con diámetro entre 1 y 10 nm siendo estos lo más finos y un 60% entre 10 y 30 nm.

**Figura 16**

*Box plot del tamaño de los nanomateriales según su diámetro, n=23 estudios.*



*Nota: tomado de elaboración propia, 2023.*

No obstante, los nanomateriales con un diámetro de 100 nm representan el 4% de los artículos investigados, colocando a este nanomaterial al límite de lo que se consideraría una nanopartícula. Además, se evidencia que para un mejor resultado es preferible el uso de diámetros

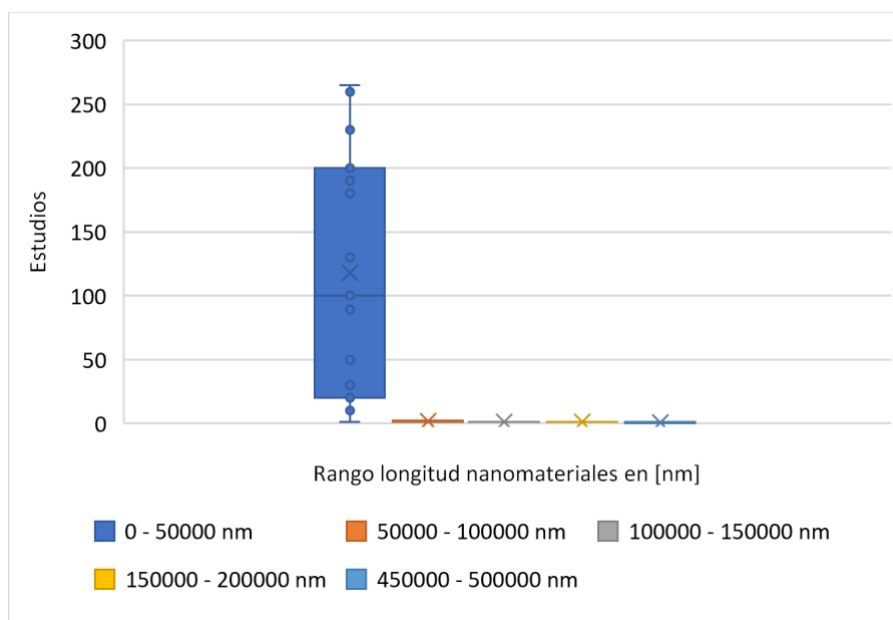
más finos. El tamaño del nanomaterial parece ser el parámetro determinante de su eficacia, un factor que respalda la importancia del efecto de dilución del ion de hierro (Gómez, 2015).

### 3.6 Según su longitud

En la Figura 17, se observa el tamaño de los nanomateriales según su longitud donde el 98% de las investigaciones fueron realizadas con una longitud entre 0 y 50000 nm siendo este rango con la mayor y casi perfecta aprobación para la producción de metano y biogás con los diferentes tipos de nanomateriales utilizados. Algo notable de los nanomateriales es que sus propiedades fisicoquímicas difieren del mismo material a escala micro o macro, esto se debe a que al reducir el tamaño del material se aumenta su área superficial, es decir tiene más espacio para interactuar con otros átomos y/o moléculas que se atraen y se repelen debido a las interacciones entre sus nubes de electrones (CHAVEZ, 2018).

**Figura 17**

*Box plot del tamaño de los nanomateriales según su longitud, n=270 estudios.*



*Nota: tomado de elaboración propia, 2023.*

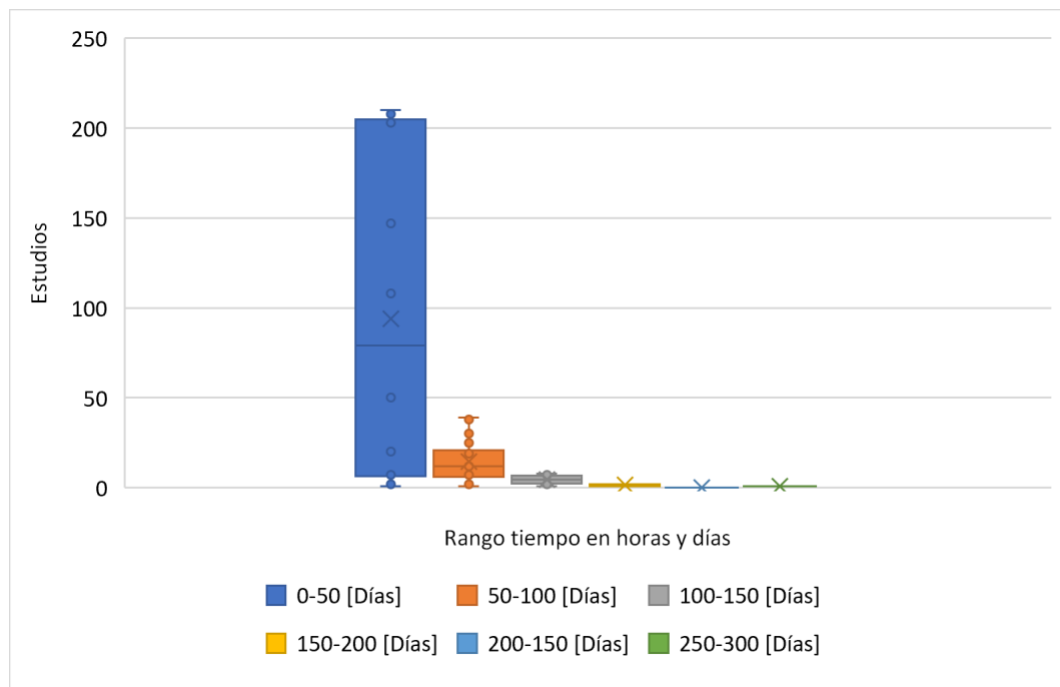
### 3.7 Factores que inciden en la digestión anaerobia

#### 3.7.1 *Tiempo de retención hidráulica (TRH)*

El tiempo de retención hidráulica es el periodo de permanencia del sustrato dentro del digestor. En la Figura 18 se aprecia el mayor rango en días efectuado en los artículos investigados, el cual comprende de los 0 a 50 días.

#### Figura 18

*Box plot del tiempo de retención hidráulico (TRH), n=261 estudios.*



*Nota: tomado de elaboración propia, 2023.*

El TRH depende del volumen del digestor y del caudal efluente, y se expresa en horas o en días. Según la Figura 18 el rango entre 0 y 50 días es donde se lleva el mejor TRH que potencializa la mayor producción de metano, comprendido en un 81% de los análisis, seguido del rango entre 50 y 100 días con 15%. Según una investigación en Patras, Grecia, el TRH es un factor crítico en la producción del metano gracias a que afecta la ecología microbiana en los digestores y debido a

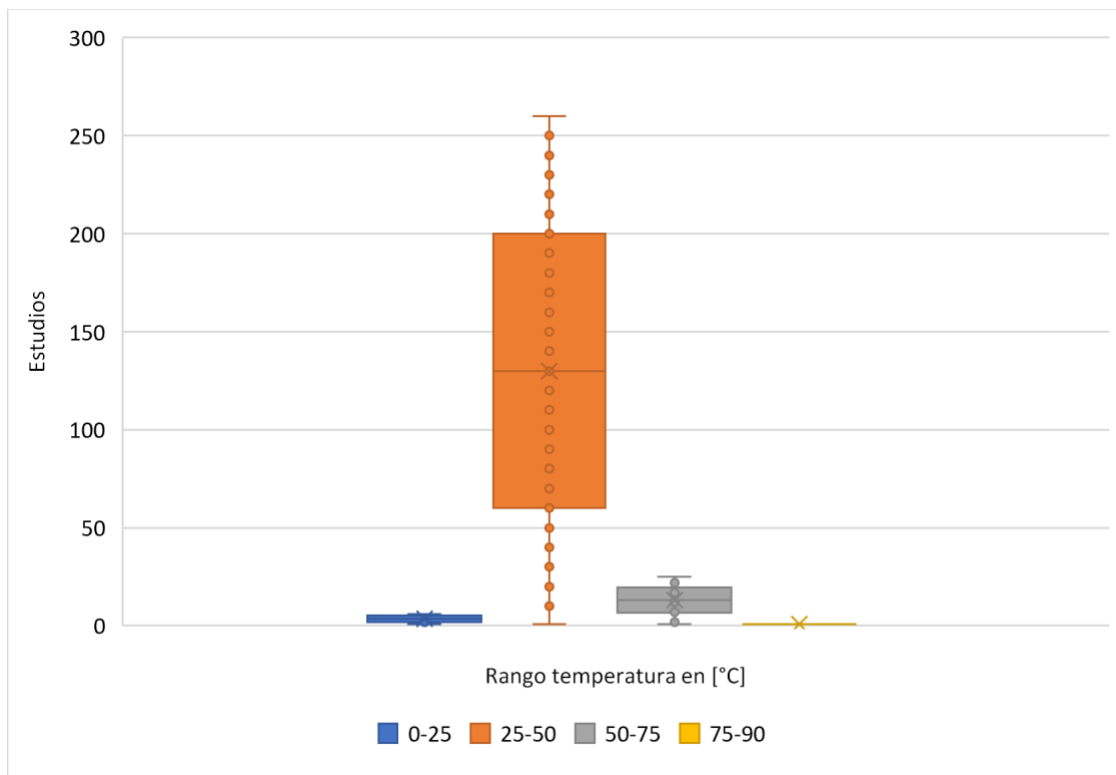
esto, se debe optimizar los sustratos fermentados en el digestor, además, establecen que si el TRH está por debajo de los 12 días estos podrían afectar de manera significativa al reactor haciéndolo inestable e incapaz de producir metano ya que hay acumulación de ácidos grasos volátiles pero si se encuentra entre los 16 y 24 días se logra un mejor rendimiento de metano (Dareiotti & Kornaros, 2015).

### 3.7.2 Temperatura

Para poder llevar a cabo de manera óptima el proceso de digestión anaerobia es necesario contar con la temperatura adecuada y que esta sea estable. Según los estudios, en la Figura 19, se destaca el rango de 25 entre 50 °C con una participación total de 260 análisis.

**Figura 19**

*Box plot temperatura en °C, n=294 estudios.*



*Nota: tomado de elaboración propia, 2023.*

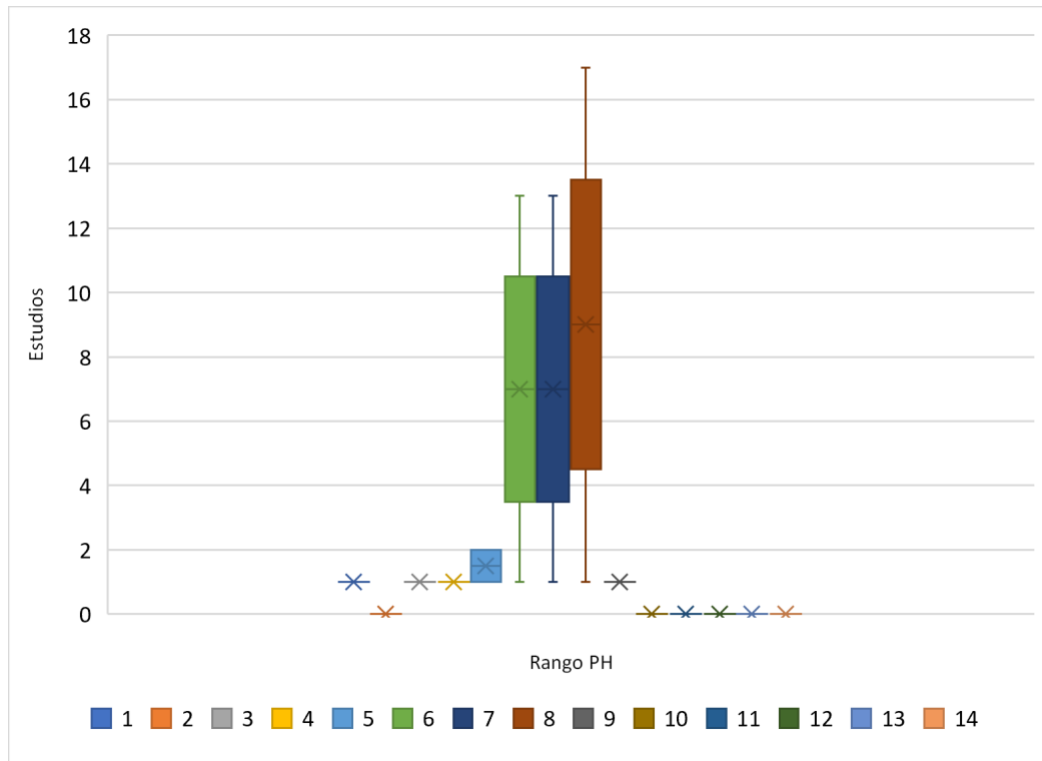
Como se mencionó antes, es necesario una temperatura adecuada para que se pueda sacar mayor provecho a los productos de la digestión anaerobia, es por esto que se lleva a cabo en temperaturas en régimen mesofílico y régimen termofílico, el cual comprende entre los 25-45°C y 45-65°C respectivamente (Ibáñez Vega, 2020). En la Figura 19, se puede apreciar que en los rangos de 25-50 °C y 50-75°C son los que más estudios se han encontrado debido a los beneficios de los regímenes mencionados. Por ejemplo, el régimen termófilo, cuenta con mayor velocidad de proceso y por ende la eliminación de patógenos, pero proporciona una mayor inestabilidad, y sus equipos se vuelven más costosos (Acosta & Abreu, 2005). No obstante, el régimen más usado es el mesófilo debido a que es más estable y no requiere de mucha energía, además, se sugiere que la temperatura óptima para un mejor aprovechamiento de producción de biogás sea entre los 35 y 37 °C (Arhoun, 2017).

### **3.7.3 pH**

Este factor también es muy importante en el proceso de la digestión anaerobia, consecuentemente, una variación de este podría causar un mal funcionamiento de los digestores (Arhoun, 2017).

**Figura 20**

*Box plot pH, n=48 estudios.*



*Nota: tomado de elaboración propia, 2023.*

En la Figura 20 los pH con mayor número de análisis encontrados fueron el pH de 6, 7 y 8 unidades con 13, 13 y 17 estudios respectivamente. El pH neutro (7) cuenta con mayor producción de metano y los cercanos a 6.6 y 8 unidades son pH favorables ya que, el pH influye en el nitrógeno y este es considerado un factor importante en el proceso biológico debido a la inhibición de actividades microbianas ( Parra Orobio, 2014). En la Figura 20 se evidencia que los pH entre 6 y 8 unidades son los que atribuyeron a una mejor obtención del metano. Un estudio sobre la influencia del pH acerca de la obtención de nanopulvos de titanio de bario, en Cuba, encontró que, a mayores unidades de pH en el proceso, los diámetros del nanomaterial se harán más pequeños (Aguilera-Domínguez, 2013).

### 3.8 Subproductos de la digestión anaerobia

El proceso de digestión anaerobia deja como resultado algunos subproductos que se pueden aprovechar y no solo verlos como residuos de una operación. Un gas muy apetecido en la actualidad debido a que contribuye con las energías verdes, este es el Biogás, el cual está compuesto en su mayoría por metano y por dióxido de carbono. Por otro lado, el digestato, material que queda de dicha operación, pero por resultados de la revisión sistemática se omitirá hablar de ello puesto que no hubo suficiente información de este subproducto en los artículos estudiados.

### 3.9 Biogás

Se obtuvo biogás entre 0.273 L y 631397.150 m<sup>3</sup> en relación con la producción por lotes en los reactores con la adicción de los nanomateriales durante el proceso de digestión anaerobia. Hay que tener en cuenta que los diferentes factores mencionados en los ítems anteriormente influyen en que la diferencia entre el valor máximo y mínimo producido.

### 3.10 Metano

El metano ( $CH_4$ ) es un gas natural producto de diferentes actividades humanas como cría de ganado y fuentes naturales como los pantanos naturales, pero también proviene de la digestión anaerobia y hace parte de las emisiones del gas de efecto invernadero (*Manual de biogás*, s. f.). En la Tabla 2 se muestran los resultados de la influencia en la obtención de este gas de los diferentes nanomateriales estudiados, al igual que parámetros como el pH, el TRH, la temperatura, el tipo de reactor y el tipo de sustrato, que posteriormente aportarán a una mayor producción de biogás. Las concentraciones de metano en el biogás más utilizadas en los estudios analizados fueron [50%-60%], [40%-50%], [30%-40%], [20%-30], con 20%, 18%, 13%, 13% respectivamente,

representando más del 60% del total de los estudios. Con esto se evidencia que al usar los nanomateriales se afirma que el porcentaje o cantidad de metano aumentará y según del tipo que se emplee determinará si amplía más del 50% de su producción, asimismo, en la Tabla 1 se encuentra el hierro granular de valencia cero o ZVI nanomaterial popular entre los estudios que garantizan la incrementación de este subproducto.

**Tabla 2**

*Porcentaje de metano presente en el biogás.*

<b>PORCENTAJE DE METANO EN EL BIOGÁS</b>	<b>ESTUDIOS</b>
0-10	3
10-20	4
20-30	7
30-40	7
40-50	10
50-60	11
60-70	3
70-80	4
80-90	3
90-100	4

*Nota:* tomado de elaboración propia, 2023.

#### 4. Conclusiones

La tendencia de los nanomateriales ha ido creciendo en los últimos años, seguido de la conciencia de los diferentes países alrededor del mundo en el uso de las energías verdes. Por ende, se busca aprovechar los residuos de las diferentes actividades diarias que realizan estas sociedades; el aprovechamiento de los residuos de la digestión anaerobia (metano y digestato) aportaría a la reducción de la crisis energética y la crisis ambiental, sin embargo, se pueden potenciar la producción de estos con la ayuda de los nanomateriales. China y España fueron los países líderes en aplicación de nanomateriales en la digestión anaerobia, ya que actualmente son pioneros en investigaciones científicas en el campo.

Es importante destacar los siguientes puntos clave:

- El nanomaterial más utilizado fue el hierro granular de valencia cero (ZVI) con 12% del total de todos los nanomateriales estudiados ya que con la adición de este durante el proceso de DA entrega de electrones que disminuyen el dióxido de carbono para producir el metano por medio de la metanogénesis autotrófica.
- El uso del reactor BATCH dado que trabaja en condiciones no estacionarias y por lotes, y comprende un sistema de limpieza sencillo.
- Los sustratos de lodos y desechos, puesto que abarcan el 26% y 23% respectivamente de los estudios analizados.
- Realizar el proceso de DA en una temperatura de régimen mesofílico, en un TRH entre 16 y 24 días y el pH entre 6 y 8 unidades.

- Aumento del metano con concentraciones de más del 60% en un rango de [20%-60%] en el biogás. También cantidades altas de biogás llegando a los 631397.150 m<sup>3</sup> en relación con la producción de lotes en los reactores.

En los 38 documentos estudiados no se encontró información en como la nanotecnología podría potencializar la producción del digestato. Por esto, se hace la invitación a los futuros investigadores abarcar el tema, ya que el digestato es un tema en tendencia que seguirá creciendo, además, es un residuo que es aprovechable en la agroindustria.

## 5. Recomendaciones

- Se propone continuar estudiando el efecto del uso de nanomateriales en otros subproductos de valor agregado en la DA de residuos agroindustriales como son el digestato.
- Es importante seguir abordando los efectos del tamaño de los nanomateriales en los procesos bioquímicos y fisicoquímicos de la digestión anaerobia.
- Se recomienda realizar estudios a escala de laboratorio de nanomateriales utilizando residuos agroindustriales generados en el contexto colombiano.
- Se aconseja producir investigaciones de cómo influyen los nanomateriales en el tiempo de retención hidráulica durante la digestión anaerobia.

### Referencias Bibliográficas

- Acosta, Y. L., & Abreu, M. C. O. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, XXXIX(1), 35-48.
- Aguilera-Domínguez, L. L. (s. f.). *Influencia del pH en la obtención de nanopulvos de titanato de bario*.
- Arhoun, B. (2017). *Digestión y Codigestión Anaerobia de Residuos Agrícolas, Ganaderos y Lodos de Depuradora*. <https://riuma.uma.es/xmlui/handle/10630/15500>
- Aryal, D.R, Vanegas, J. P. y Pinto, R. (2023). *Biogás, la energía renovable para el desarrollo de granjas porcícolas en el estado de Chiapas*. (2023, mayo 30). [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2448-66552019000100169](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-66552019000100169)
- Bernal-Martinez, A. (2020). Codigestión anaerobia como alternativa para el tratamiento de aguas residuales lácteas y la generación de biogás y biosólidos. En Á. Marroquín-De Jesús, *Mujeres en la Ciencia Ciencias ambientales, uso de recursos* (1.<sup>a</sup> ed., pp. 115-141). ECORFAN. <https://doi.org/10.35429/H.2020.8.115.141>
- Camacho, A. (2016). *Definición de nanomateriales para Colombia*. (s. f.). Recuperado 30 de mayo de 2023, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-28042016000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-28042016000100003&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Cavaleiro A. J et al (2020). *Multi-walled Carbon Nanotubes Production, Properties & Applications*. (s. f.). Recuperado 30 de mayo de 2023, de <https://tuball.com/articles/multi-walled-carbon-nanotubes>
- Cavaleiro, A. J., Salvador, A. F., Martins, G., Oliveira, C. C., Liu, Y., Martins, V. R., Castro, A. R., Soares, O. S. G. P., Pereira, M. F. R., Pereira, L., Langenhoff, A. A. M., Pereira, M. A.,

- & Alves, M. M. (2020). Multi-Walled Carbon Nanotubes Enhance Methanogenesis from Diverse Organic Compounds in Anaerobic Sludge and River Sediments. *Applied Sciences*, 10(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/app10228184>
- Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial / Carta de Servicios / Red Exterior CDTI. (2023, mayo 30). <https://www.cdti.es/index.asp?MP=8&MS=155&MN=2&TR=A&IDR=1&iddocumento=6920>
- CHAVEZ, A. (2018, julio 12). *Item 1004/2135* | Repositorio CIMAV. <http://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1004/2135>
- Conde, B. R., Moreno, M. C., Bonmati, A., & Martí, T. B. (s. f.). *ESTUDIO DEL EFECTO DE LA APLICACIÓN DE NANOPARTICULAS DE HIERRO EN LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE PURÍN DE CERDO*.
- Corona Encinas, F. (2020). *Estudio de la recuperación de nutrientes presentes en efluentes de sistemas de digestión anaerobia en forma de estruvita*. <https://doi.org/10.35376/10324/45332>
- Corredor, Y. A. V., & Pérez, L. I. P. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en el mejoramiento de la calidad del ambiente. *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, 59-72. <https://doi.org/10.18359/rfcb.3108>
- Dareioti, M. A., & Kornaros, M. (2015). Anaerobic mesophilic co-digestion of ensiled sorghum, cheese whey and liquid cow manure in a two-stage CSTR system: Effect of hydraulic retention time. *Bioresource Technology*, 175, 553-562. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.10.102>

- Davarazar, M., Kamali, M., & Lopes, I. (2021). Engineered nanomaterials for (waste)water treatment—A scientometric assessment and sustainability aspects. *NanoImpact*, 22, 100316. <https://doi.org/10.1016/j.impact.2021.100316>
- Dávila Rodríguez, M., Guzmán Sáenz, R., Macareno Arroyo, H., Piñeres Herera, D., de la Rosa Barranco, D., & Caballero-Urbe, C. V. (2009). Bibliometría: Conceptos y utilidades para el estudio médico y la formación profesional. *Revista Salud Uninorte*, 25(2), 319-330.
- Díaz Villanueva, M. J. (2022). *Aplicación de nanotecnología para remediación de suelos contaminados con hidrocarburos* [BachelorThesis, Fundación Universidad de América]. <https://repository.uamerica.edu.co/handle/20.500.11839/8956>
- Engenharia, Á. C. (2019, agosto 13). Reactor UASB: Sepa que és y como funciona | Águas Claras Engenharia. *Águas Claras*. <https://aguasclarasengenharia.com.br/reactor-uasb-sepa-que-es-y-como-funciona/>
- Heikal, G., Shakroum, M., Vranayová, Z., & Abdo, A. (2022). Impact of Nanoparticles on Biogas Production from Anaerobic Digestion of Sewage Sludge. *Journal of Ecological Engineering*, 23(8), Article 8. <https://doi.org/10.12911/22998993/151093>
- Ibáñez Vega, S. (2020). *Sistemas de control «on line» de reactores químicos Batch* [Bachelor thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/185196>
- Jiang, Q., Liu, H., Zhang, Y., Cui, M., Fu, B., & Liu, H. (2021). Insight into sludge anaerobic digestion with granular activated carbon addition: Methanogenic acceleration and methane reduction relief. *Bioresource Technology*, 319, 124131. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124131>

- KASALAB (2023). *BIORREACTOR PILOTO – Kasalab*. (s. f.). Recuperado 2 de junio de 2023, de <https://www.kasalab.com/producto/biorreactor-piloto/>
- Khan, S. Z., Zaidi, A. A., Naseer, M. N., & AlMohamadi, H. (2022). Nanomaterials for biogas augmentation towards renewable and sustainable energy production: A critical review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2022.868454>
- La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos. (2008). *Emisiones mundiales de metano y oportunidades de atenuación*. [https://www.globalmethane.org/documents/methane\\_analysis\\_fs\\_spa.pdf](https://www.globalmethane.org/documents/methane_analysis_fs_spa.pdf)
- Serrano, S y Alejandro D, (2017). *La digestión anaeróbica potenciada con grafeno aumenta sustancialmente el potencial de producción de biogás | Research and Innovation*. (2021). <https://ec.europa.eu/research-and-innovation/es/projects/success-stories/all/la-digestion-anaerobica-potenciada-con-grafeno-aumenta-sustancialmente>
- Liang, Y., Li, X., Zhang, J., Zhang, L., & Cheng, B. (2017). Effect of microscale ZVI/magnetite on methane production and bioavailability of heavy metals during anaerobic digestion of diluted pig manure. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(13), 12328-12337. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8832-9>
- López Rodríguez, C.E y Neme Chaves S. R, (2023). *Employer branding: Una exploración del campo de conocimiento a partir de indicadores bibliométricos*. (2023, mayo 30). [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2215-910X2021000100083](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-910X2021000100083)
- MS Romero, Vilab J., Mata J., Chimenos JM, Astales S., (2016). «*El papel de los aditivos en la digestión anaeróbica: Una revisión—ScienceDirect*». (s. f.). Recuperado 2 de junio de 2023,

- de <https://www-sciencedirect-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/science/article/pii/S136403211501477X?via%3Dihub>
- Mordor intelligence, (2023). *Informe de mercado de nanomateriales | Tamaño, participación, crecimiento y tendencias (2023-28)*. (2023, abril 24). <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/nanomaterials-market>
- OGISA INFRAESTRUCTURAS S.A (2022). *¿Cómo han evolucionado las energías renovables?* (2022, diciembre 1). <https://ogisa.es/como-han-evolucionado-energias-renovables-en-ultimos-anos/>
- Parra-Orobio, B. A.,(2014). *INFLUENCIA DEL pH SOBRE LA DIGESTIÓN ANAEROBIA DE BIORRESIDUOS DE ORIGEN MUNICIPAL*. (s. f.). Recuperado 30 de mayo de 2023, de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-42262014000200027](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262014000200027)
- Papageorgiou, D. G., Kinloch, I. A., & Young, R. J. (2017). Mechanical properties of graphene and graphene-based nanocomposites. *Progress in Materials Science*, 90, 75-127. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.07.004>
- Polo, J. D. (2023). *China ocupa el primer lugar en volumen y calidad de la investigación científica, superando a Estados Unidos*. (2023, mayo 30). <https://wwwwhatsnew.com/2022/08/14/china-ocupa-el-primer-lugar-en-volumen-y-calidad-de-la-investigacion-cientifica-superando-a-estados-unidos/>
- R, K. C., M, Y. A., M, A. M., V, R. O., & Ch, L. C. (2017). Residuos agroindustriales su impacto, manejo y aprovechamiento. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 9(S1), Article S1. <https://doi.org/10.24188/recia.v9.nS.2017.530>
- Rico, B., & Gabriela, T. (2023). *Aplicación de la digestión anaerobia para la producción de biogás a partir de aguas residuales en zonas no interconectadas de Colombia*.

[Bachelor Thesis, Fundación Universidad de América].  
<https://sie.car.gov.co/handle/20.500.11786/38451>

Ruíz-Leza, H. A., Rodríguez-Jasso, R. M., Rodríguez-Herrera, R., Contreras-Esquivel, J. C., & Aguilar, C. N. (2007). Diseño de biorreactores para fermentación en medio sólido. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 6(1), 33-40.

Sastoque, M. (2023). *Nanomateriales, actualidad y aplicaciones tecnológicas*. (2023, mayo 30).  
<https://www.virtualpro.co/noticias/nanomateriales--actualidad-y-aplicaciones-tecnologicas>

Gómez, G. (2015). *Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales—Portal INSST - INSST*. (s. f.-a). Portal INSST. Recuperado 24 de abril de 2023, de <https://www.insst.es/seguridad-y-salud-en-el-trabajo-con-nanomateriales>

Gómez, G. (2015). «*Seguridad y salud en el trabajo con nanomateriales—Portal INSST - INSST*». (s. f.-b). Portal INSST. Recuperado 28 de junio de 2023, de <https://www.insst.es/seguridad-y-salud-en-el-trabajo-con-nanomateriales>

Serrano, S., & Alejandro, D. (2017). *Valoración del digestato generado por la digestión anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México*.  
<http://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/22712>

Tian, T., Qiao, S., Li, X., Zhang, M., & Zhou, J. (2017). Nano-graphene induced positive effects on methanogenesis in anaerobic digestion. *Bioresource Technology*, 224, 41-47.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.058>

Varnero-Moreno, M.T, (2011). *Manual de biogás*. (s. f.). Recuperado 1 de julio de 2023, de <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>

**Apéndices****Apéndice A.** Nanomateriales grupo metales y aleaciones.

<b>Metales y aleaciones</b>	<b>Estudios</b>
ZVI	50
ZnO	32
Ni	28
Ag	27
$Fe_3O_4$	25
Co	22
$CeO_2$	19
Fe	19
CuO	15
$Fe_2O_3$	13
$TiO_2$	13
$SiO_2$	10
$Al_2O_3$	8
Cu	5
MgO	5
$Co_3O_4$	4
$Mn_2O_3$	4

Au	3
Zeolita natural	3
Cr	2
ICZ (Zeolita recubierta ZVI NPS)	2
K	2
Mg	2
Mo	2
ni-co-ferrito	2
NiO	2
nZVI y zeolita	2
W	2
Zeolita	2
Zn	2
Al	1
BPEI Ag NPS	1
$C_3N_4$	1
Ca	1
CaO	1
Cd	1
CoO	1

$Fe_2NiO_4$	1
$Fe_2NiO_4Zn$	1
$Fe_2O_4$	1
$Fe_3O_4/ZnMg(Al)O$	1
FeOOH	1
Hierro comercial polvo	1
IMZ	1
IONP	1
M/SiO <sub>2</sub>	1
Mn	1
MNBA	1
MNFA	1
$MnO_2$	1
MNP'S	1
MOF	1
MOO3	1
MNP'S	1
Na	1
Nanopartículas birretálicas a base de cobre y hierro	1

$Nb_{3.49}N_{4.56}O_{0.44}$	1
NBN	1
$NbO_2$	1
Ni/CO	1
Ni-ferrite	1
Ni-Gr	1
OMS-2	1
óxido de hierro- zeolita	1
Óxidos metálicos porosos	1
Pb	1
$PPyFe_3O_4$	1
Pt	1
PVP AgNPs	1
Quitosano- $Fe_2O_4$ / $TiO_2$	1
SiC	1
$SiO_2$ -CH3	1
Sistema de óxido de hierro-zeolita	1

Zeolita recubierta de NZVI	1
Zeolita de sodio	1
$ZnFe_2O_4$	1
ZnO (nanocable)	1

Fuente: elaboración propia.