

**Análisis del potencial teórico del metano de los residuos alimentarios por medio de la
minería de datos**

Andrés Felipe Villamizar Rodríguez

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Ambiental

Director

Olga Lucia Bayona Ayala

Magister Ingeniería Química

Co director

Angelica María Candela Soto

Doctorado en Ciencias

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad Ingeniería Ambiental

2023

Dedicatoria

Este trabajo de grado se lo quiero dedicar a mis padres, Cecilio Villamizar, Yolanda Rodríguez y a mis hermanos, Heyson Villamizar y Yohana Villamizar, quienes con su apoyo, paciencia y cariño me permitieron cumplir el sueño de ser profesional. Este será el comienzo de muchos logros.

A mis compañeros presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron momentos y conocimiento durante estos años y a los profesores y tutores que me brindaron y guiaron en este camino académico.

A mis amigas, Camila Peñaloza y Carmen Núñez, quienes han sido parte fundamental para mi vida, por su compañía incondicional, el apoyo mutuo durante todos los momentos y su amistad sincera que siempre va a prevalecer. Por muchos años más luchando juntos.

A mi hermano de vida, Bismar Castelblanco, quien me acompaña desde hace años motivándome y ayudándome en todas las situaciones, siempre incondicional y sincero.

Andrés Felipe Villamizar Rodríguez

Agradecimientos

Agradezco a mi familia por creer en mí, a pesar de todos los inconvenientes presentados siempre estuvieron a mi lado con su amor y consejos.

Agradezco a mi compañera de vida, Angie Lugo, quien me dio su apoyo y su tiempo en los momentos difíciles, siempre incentivándome a cumplir nuevas metas y logros.

Agradezco los consejos, cariño, afecto y ayuda de todos mis compañeros y amigos que hicieron parte de este proceso.

Agradezco a todos los docentes y directivos de la facultad de ingeniería ambiental, por todo su interés y conocimiento compartido durante el transcurso de la carrera de pregrado.

Agradezco en especial a la profesora Olga Bayona y decana Angelica Candela, quienes fueron un apoyo y guía constante para conseguir esta meta.

Andrés Felipe Villamizar Rodríguez

Contenido

Introducción	12
1. Análisis del potencial teórico del metano de los residuos alimentarios por medio de la minería de datos	14
1.1 Definición del problema.....	14
2. Justificación	15
3. Objetivos	17
3.1 Objetivo general	17
3.2 Objetivos específicos.....	17
4. Marco Referencial.....	17
4.1 Antecedentes	17
4.2 Marco Conceptual	19
4.2.1 Residuos sólidos orgánicos (RSO)	19
4.2.2 Tratamiento de los residuos alimentarios mediante codigestión anaeróbica y producción de metano.....	21
4.2.3 Digestión anaeróbica	21
4.2.3.1 Procesos de la digestión anaeróbica	22
4.2.4 Definición de biogás.....	24
5. Diseño Metodológico.....	25
5.1 Vigilancia tecnológica.....	26
5.2 Condiciones fisicoquímicas de los sustratos	28
5.3 Potencial teórico de metano	29
5.3.1 Estimación del potencial de metano	29

6. Resultados y Discusión	30
6.1 Vigilancia tecnológica.....	30
6.1.1 Indicadores cienciométricos	31
6.1.1.1 Publicaciones por año	32
6.1.1.2 Publicaciones por país.....	33
6.1.1.3 Publicaciones por países latinoamericanos	34
6.1.1.4 Publicaciones por fuente	35
6.1.1.5 Publicaciones por institución	36
6.1.1.6 Publicaciones por autores.....	38
6.1.1.7 Palabras claves	39
6.2 Parámetros fisicoquímicos para la producción de metano	40
6.3 Evaluación del potencial teórico para la producción de metano	42
6.3.1 Tipo de reactor.....	50
6.3.2 Estimación de la producción teórica de metano y biogás.....	51
6.4 Residuos Sólidos Orgánicos en Bucaramanga	52
6.4.2 Viabilidad de la digestión anaeróbica con residuos alimentarios en Bucaramanga	54
7. Conclusiones	55
8. Recomendaciones	56
Referencias.....	57

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Clasificación de los residuos sólidos</i>	20
Tabla 2. <i>Indicadores cienciométricos para artículos</i>	27
Tabla 3. <i>Reacciones bioquímicas de la digestión anaeróbica de la materia orgánica.</i>	29
Tabla 4. <i>Indicadores cienciométricos del proyecto</i>	31
Tabla 5. <i>Revisión bibliográfica (condiciones de la biomasa)</i>	43
Tabla 6. <i>Revisión bibliográfica (Potencial de metano y biogás)</i>	45
Tabla 7. <i>Revisión bibliográfica (Observaciones y recomendaciones)</i>	47
Tabla 8. <i>Potencial teórico del metano y el biogás</i>	51

Lista de figuras

Figura 1. <i>Fases del metabolismo principal de la digestión anaeróbica</i>	23
Figura 2. <i>Obtención de biogás a partir de la materia orgánica y posibles usos</i>	25
Figura 3. <i>Metodología del proyecto</i>	25
Figura 4. <i>Publicaciones en el periodo de 2011-2021</i>	32
Figura 5. <i>Publicaciones por país</i>	33
Figura 6. <i>Publicaciones por países latinoamericanos</i>	34
Figura 7. <i>Publicaciones por fuente</i>	35
Figura 8. <i>Publicaciones por institución</i>	37
Figura 9. <i>Publicaciones por autores</i>	39
Figura 10. <i>Palabras clave</i>	40

Resumen

En este estudio, se realizó una vigilancia tecnológica sobre la digestión anaeróbica usando como sustrato los residuos alimentarios, la búsqueda se acoto en un periodo de diez años (2011-2021), abordando el problema desde la base de un aumento de población lo cual implica una mayor generación de residuos, ahora, se observa la viabilidad de uso y los parámetros que se deben tener en cuenta para su buen rendimiento. En los artículos evaluados se encontró residuos alimentarios con buenos resultados de rendimiento de metano y biogás, por otro lado, se tuvo en cuenta la viabilidad que tiene implantar dicha técnica en Bucaramanga, Santander, la cual, sería una opción tentadora porque según el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS), no se está dando aprovechamiento a los Residuos Sólidos Orgánicos (RSO).

Palabras clave: digestión anaeróbica, parámetros fisicoquímicos, residuos alimentarios, vigilancia tecnológica, metano, biogás

Abstract

In this study, a technological surveillance on anaerobic digestion was carried out using food waste as a substrate, the search was limited to a period of ten years (2011-2021), addressing the problem from the base of an increase in population which implies a greater generation of waste, now, the feasibility of use and the parameters that must be taken into account for its good performance are observed. In the articles evaluated, food waste was found with good methane and biogas yield results, on the other hand, the feasibility of implementing this technique in Bucaramanga, Santander, was taken into account, which would be a tempting option because according to the Integral Management of Solid Waste (PGIRS), is not taking advantage of Organic Solid Waste (RSO).

Keywords: anaerobic digestion, physicochemical parameters, food waste, technological surveillance, methane, biogas

Glosario

Bacterias anaeróbicas: las bacterias anaerobias son microorganismos que son capaces de sobrevivir y multiplicarse en ambientes que no tienen oxígeno.

Biogás: es un gas que se genera en medios naturales, por las reacciones de biodegradación de materia orgánica, mediante la acción de microorganismos, producto resultante es una mezcla constituida por metano y dióxido de carbono.

Biomasa: es materia orgánica utilizada como fuente energética. La biomasa abarca un grupo de materia orgánica que se caracteriza por su heterogeneidad, tanto por su origen como por su naturaleza.

Biocombustible: es el combustible formado por hidrocarburos renovables, generalmente alcoholes, por ejemplo, metanol, etanol, y derivados de los cereales.

Biometano: es un gas combustible con una elevada concentración de metano, que se obtiene a partir del biogás.

Combustibles fósiles: son aquellos originados por la descomposición de materia orgánica animal y vegetal.

Digestion anaerobia: es un proceso biológico donde intervienen varios grupos de microorganismos que degradan la biomasa en ausencia de oxígeno.

Gas de efecto invernadero: es el gas que absorbe la radiación emitida por la superficie terrestre y las nubes, creando un atrapamiento de la energía lo cual, calienta la superficie de la Tierra.

Impacto: una perturbación u otra ocurrencia perjudicial a un ecosistema o un paisaje, que es causada por la actividad humana intencional o inadvertida.

Energía renovable: es aquella energía que se genera mediante recursos inagotables o renovables y no contaminantes.

Nutrientes: elementos minerales necesarios para el metabolismo y el crecimiento de plantas y microbios, tales como fósforo, calcio, magnesio, hierro, etc.

PH: es la medida de la acidez o alcalinidad; oscila entre 0 (ácida) y 14 (alcalina), pasando por 7 (neutra).

Residuos alimentarios: se define como todo lo descarte procedente del consumo humano, generado tanto en producción, procesado, venta y consumo.

Residuos sólidos orgánicos: son residuos que se descomponen naturalmente, presentan la característica de poder desintegrarse o degradarse rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica.

Vigilancia tecnológica: es una de las herramientas que organiza, selecciona y captura información del exterior sobre ciencia y tecnología en un determinado sector de interés.

Introducción

En el siglo XVIII con la revolución industrial, comenzó el proceso de transformación en el sector económico, social y ambiental, dando paso a un incremento exponencial del uso y explotación de los recursos no renovables, siendo la principal fuente de energía, teniendo como base el petróleo, el carbono y el gas natural (Pérez Pariente, 2016), sin embargo, en las últimas décadas, su existencia se ha ido reduciendo, a tal punto que ya se tiene proyectado un tiempo de vida útil, de esta manera la oferta se encuentra en decrecimiento, lo cual, aumenta el precio de la energía y eso conlleva a un desencadenamiento de costos elevados en el comercio (Office, 2013).

Desde el punto de vista ambiental, la extracción, producción y aprovechamiento descontrolado de los recursos no renovables, ha dejado impactos negativos en la biosfera, uno de ellos es la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que resultan a favor del cambio climático y con esto se ven afectados los patrones climáticos y la temperatura a nivel mundial (Office, 2013). En vista de las consecuencias, se han comenzado a tomar decisiones en pro del medio ambiente, buscando soluciones amigables y sostenibles con el planeta tierra, una de ellas es implementar el uso de la energía renovable, la cual tiene como base los recursos naturales como el sol, el viento, el agua o la biomasa vegetal o animal (Camps Michelena, 2008).

El camino de la energía renovable ha ido en incremento en los últimos 50 años, no obstante, la biomasa ha estado presente en la humanidad desde hace siglos, siendo fuente principal para la cocción de los alimentos y la regulación de la energía en el hogar (L. Wang, 2014). Hoy en día con el desarrollo de la ciencia y la tecnología se han creado nuevos métodos de aprovechamiento para la biomasa, como la combustión, digestión anaeróbica, gasificación y pirolisis, siendo procesos generadores de gases con un alto poder calorífico, biocombustibles y entre otras fuentes energéticas (Tyagi, et al., 2022).

En cuanto a la degradación microbiana anaeróbica, también denominada Digestión Anaeróbica (DA), se entiende como el tratamiento a los desechos orgánicos por medio de microorganismos, degradando la materia orgánica para la obtención de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) en ausencia de oxígeno (Tyagi, et al., 2022). Puesto que la DA ayuda a la reducción de los residuos orgánicos, la producción de energía renovable y la generación de un digestato rico en nutrientes, se ha ganado un papel importante para los países en pro de la remediación del cambio climático, fomentando la implementación en zonas agrícolas e industriales (Kosseva, et al., 2013).

El sector agroindustrial es uno de los muchos sectores que puede sacar provecho de esta tecnología, puesto que los residuos alimentarios cuentan con gran cantidad de carbono biodegradable, que puede convertirse en un gran porcentaje de metano y fertilizante orgánico (Kosseva, et al., 2013). Ahora, con el metano generado de la digestión anaeróbica se puede transformar en biogás, ya que, este se compone en su mayor parte por metano; es así como los países empiezan a potenciar esta tecnología; teniendo a la Unión Europea como principal productor de biogás, el cual obtuvo 209 TWh de energía en el 2018, por otro lado, China es el segundo productor de biogás y cuenta con varios digestores trabajando con residuos agrícolas y alimentarios, y en tercer puesto, Estados Unidos, el cual trabaja con los mismos residuos que China pero no cuenta con tantos digestores como ellos (Tyagi, et al., 2022).

1. Análisis del potencial teórico del metano de los residuos alimentarios por medio de la minería de datos

1.1 Definición del problema

En los últimos años, se ha visto la degradación que ha tenido el medio ambiente y su falta de sostenibilidad a lo largo del tiempo, factores como el cambio en el uso del suelo, la contaminación de los recursos naturales, el crecimiento poblacional y muchos otros son responsables del colapso que tiene el planeta tierra. Dentro de las consecuencias encontramos las elevadas emisiones de gases contaminantes, extensión de la fauna y flora, pérdida de la agricultura, entre otros, dejando a los países en estado de alerta ambiental.

En cuanto a la población, el continente de Asia es el más poblado siendo China e India, abarcando casi el 40% de la población mundial (Hagos, et al., 2017); siendo un elemento determinante en la generación de residuos sólidos, ya que, el aumento de la población provoca un mayor consumo de recursos y servicios, eso para mantener el nivel en la calidad de vida que venía manteniendo la sociedad (Braguglia, et ál., 2018).

Ahora, se puede tener en cuenta el origen de los residuos sólidos para conocer cuál es la actividad que está generando mayor impacto ambiental, sin embargo, gran parte de los residuos terminan en el relleno sanitario. A pesar de eso, si su clasificación es por composición, en otras palabras, si se clasifica por residuos orgánicos, residuos inorgánicos y peligrosos, se podría tener una mejor perspectiva en busca de una solución; por ejemplo, al analizar la línea de suministro de alimentos, lo que incluye la producción, procesamiento, distribución y consumo, se estima que los países en vías de desarrollo pierden el 80% del producto con las primeras etapas, pero, en los países desarrollados esta pérdida se reduce la mitad, a lo largo de las etapas se van originando

desperdicios de producto, incrementando el porcentaje de residuos orgánicos (Braguglia ,et al., 2018).

2. Justificación

La dependencia generada por los hidrocarburos en los diferentes sectores como la industria automotriz ha hecho que cada vez se incremente el consumo de los recursos no renovables como el petróleo o el carbono (Camps Michelena, 2008). Lo cual llevo a la humanidad a un estilo de vida de mano con los beneficios producidos a base de energía no renovable, sin embargo, la ciencia busca las alternativas adecuadas para conseguir manteniendo el ritmo y el cual lleva la sociedad.

Las soluciones que se está analizando es la energía extraída de los recursos naturales, siendo una opción viable para recuperar calidad ambiental y sostenibilidad energética a lo largo del tiempo (Office, 2013). Considerando la idea de generar energía de manera sustentable por medio de transformaciones energéticas, expresado de otra manera seria, la conversión de energía química a energía eléctrica, como es el tema de los paneles solares, transformando las ondas solares por celdas fotovoltaicas.

En el caso de la biomasa, se entiende como toda la materia orgánica que se adquiere de los recursos naturales, en este escenario cuenta como una elección en caminata a un desarrollo sostenible. La obtención de energía por medio de la biomasa se da por la descomposición química de los residuos orgánicos, dando como resultado gases con un potencial energético, con el fin de ser utilizados como biogás (Ochoa, et al., 2021; Tyagi, et al., 2022). Esta tecnología está siendo utilizada en países como la Unión Europea, China y Estados Unidos, siendo los principales exponentes en producción de biogás y generación de biocombustible, de cierta manera, puede ser

un indicador para los países en vías de desarrollo a continuar con la implementación y apropiación de este sistema energético (L. Wang, 2014).

Por su parte, la decisión de optar por energías renovables se enfoca en perseguir los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), los cuales abarcan desde acabar con la pobreza, preservar el planeta tierra y mejorar la calidad de vidas de las personas (Naciones Unidas, 2020c). Puntualmente, se enfoca en el número 7, en este se pretende garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna, es decir, sus objetivos se basan en asegurar el acceso universal a servicios energéticos y darle crecimiento a la fracción de energía renovable (Naciones Unidas, 2020b); a su vez, se enfatiza en el objetivo número 13, en el cual se adoptan medidas urgentes para luchar contra el cambio climático y sus efectos, en otros términos, se incluyen medidas de control y mitigación para el cambio climático, por medio de políticas, estrategias y planes nacionales (Naciones Unidas, 2020a).

El rumbo de esta investigación va dirigido a evaluar el potencial de metano a partir de la digestión anaeróbica con los residuos alimentarios, dándole un valor energético a los desechos que se están perdiendo y causando problemas en los rellenos sanitarios. Este análisis se va a desarrollar en base a las investigaciones realizadas a los últimos 10 años, o sea, desde 2011 a 2021; se identificarán los parámetros fisicoquímicos y el potencial teórico de la generación de metano de los residuos orgánicos con el fin de determinar las opciones con mejor viabilidad para el proceso de digestión anaeróbica, por su parte, se tendrá en cuenta la generación de biogás para aprovecharlo como biocombustible en otros procesos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar el potencial teórico de metano mediante digestión o codigestión anaeróbica generado a partir de biomasa residual de los alimentos.

3.2 Objetivos específicos

- Identificar las condiciones de parámetros fisicoquímicos para la producción de biogás y metano por medio de residuos alimentarios como sustrato.
- Determinar el potencial teórico de la generación de metano en los procesos de digestión o codigestión anaeróbica a partir de residuos alimentarios como sustrato.
- Evaluar la viabilidad que tiene el uso de residuos alimentarios para la producción de metano en un biodigestor anaerobio.

4. Marco Referencial

4.1 Antecedentes

La relación de los recursos naturales con el ser humano ha existido desde la prehistoria, mostrando como principio el uso de la agricultura, donde se potencio el crecimiento poblacional y se comenzó a utilizar la energía del sol para la producción de alimentos. Desde ese entonces se han despendido mecanismos de tracción animal que se utilizó para movilizar alimentos, surgió la mecánica hidráulica con el molino de agua, y siguiendo esa línea de energía mecánica se dio paso

a nuevas invenciones, también, se apoyaron de la madera y el carbón para abastecerse de energía abriendo espacio al uso de la biomasa (Pacheco Floreza y Melo Poveda, 2015).

El siguiente cambio drástico llegó en la revolución industrial, donde se dio paso a los procesos automáticos e impulsados por energía proveniente de fuentes inorgánicas, también, se hizo la transición de la madera al carbón, aumentando las producciones industriales de acuerdo con la demanda del crecimiento poblacional (Tyagi, et al., 2022). Pero, no sería hasta el siglo XIX, donde se toma como fuente de energía principal el uso de combustibles fósiles, es decir, el cambio del carbón por el petróleo y el gas natural (Pacheco Floreza y Melo Poveda, 2015).

Por otro lado, en el siglo XIX y XX, Alessandro Volta descubrió el metano en el lago Maggiore y John Dalton estableció su composición química, también, Jean-Louis Mouras dio introducción al concepto de digestión anaeróbica por medio de un tanque séptico, además, en temas energéticos, Louis Pasteur informo los usos del biogás para la calefacción e iluminación (Lora Grando, et al., 2017). Con estos aspectos saliendo a la luz de la comunidad científica, la digestión anaeróbica se fue estudiando e implementando para el tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos (Bhat, 2017).

Sin embargo, su énfasis de alternativa amigable con el ambiente llamo la atención por varios aspectos, como utilizar los residuos como materia prima para la producción de biogás y fertilizantes de alta calidad, y su bajo costo en comparación a otras alternativas (Lora Grando, et al., 2017). Dicha tecnología genera auge en países como Alemania, promoviendo proyectos de biogás en el sector rural, así mismo en China e India, donde se implementaron biodigestores en zonas rurales y comunidades pequeñas (Acosta Pabuena y Pasqualino, 2014).

En Colombia, el cambio debe ir de la mano de Fuente No Convencionales de Energía (FNCE), el cual, en el rango de 1990 al 2009, represento un 21,38% de la oferta, equivalente a

1.534.478 TJ/año; indicando un 9,46% en hidroeléctricas, un 7,10% en madera, un 4,59% en pulpa de caña de azúcar, un 0,14% en bioetanol, un 0,013% en energía eólica y un 0,08% en biodiesel (Acosta Pabuena y Pasqualino, 2014). En el marco político colombiano, el análisis de la regulación para el uso de biocombustibles se determinará para cada fase de su ciclo de vida, en otras palabras, se tendrá en cuenta, los residuos sólidos como materia prima, la producción y consumo de biogás, y producción y consumo de biofertilizantes como subproducto (Rincón-Velásquez y Castiblanco-Rozo, 2021).

4.2 Marco Conceptual

4.2.1 Residuos sólidos orgánicos (RSO)

Un residuo se puede definir como cualquier material creado en procesos de extracción, beneficio, transformación, implementación o consumo donde no sea posible volverlo a usar en el proceso que lo generó (Berrelleza Robles, 2014). Los RSO son biodegradables contando con una propiedad de poder degradarse velozmente y convertirse en materia orgánica, la cual está compuesta químicamente por carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre (Ochoa, et al., 2021; Raposo, et al., 2012).

Dentro de los residuos orgánicos se puede encontrar restos de frutas y verduras, residuos de jardinería, residuos de excretas de animales o restos de alimentos procesados (Reyes Aguilera, 2017). Sin embargo, los residuos sólidos se pueden clasificar según su origen como se muestra en la *Tabla 1*:

Tabla 1. *Clasificación de los residuos sólidos*

Fuente	Actividad o localizaciones donde se genera	Tipo de residuos sólidos
Doméstica	Viviendas unifamiliares o multifamiliares	Residuos de comida, papel, cartón, plástico, textiles, cuero, madera, vidrio, entre otros.
Comercial	Tiendas, restaurantes, mercados, edificios, hoteles, gasolineras, entre otros.	Residuos de papel, cartón, plástico, textiles, cuero, madera, vidrio, residuos peligros y residuos especiales.
Institucional	Escuelas, hospitales, cárceles, centros gubernamentales.	Residuos de papel, cartón, plástico, textiles, cuero, madera, vidrio, residuos peligros y residuos especiales.
Construcción y demolición	Lugares nuevos y viejos de construcción, reparación o remodelación de carreteras, derribo de edificaciones.	Residuos de madera, vidrio, acero, hormigón, papel, plástico, entre otros.
Servicios municipales	Limpieza de calles, parques, cuencas y otras áreas de recreo.	Residuos especiales, recortes de árboles y plantas, residuos generales de parques, playas y zonas de recreo.
Plantas de tratamiento	Aguas, aguas residuos y proceso de tratamiento industrial.	Residuos de planta de tratamiento, compuestos principales de fangos.
Industrial	Construcción, fabricación ligera y pesada, refinerías, plantas químicas, centrales térmicas, entre otras.	Residuos de procesos industriales, materiales de chatarra, residuos no industriales incluyendo residuos de comida, basura, cenizas de residuos de demolición y construcción, residuos especiales, residuos peligrosos.
Agrícolas	Cosechas de campo, árboles frutales, viñedos, ganadería, granjas, entre otras.	Residuos de comida, agrícolas, basura, residuos peligrosos.
Residuos sólidos urbanos	Todo lo dicho anteriormente	Todo lo dicho anteriormente

Adaptado de Berrelleza Robles (2014).

Las dos fuentes con más producción de residuos sólidos son la industrial y agrícola, contando con más del 50% de residuos biodegradables, también, cuentan con gran parte de aprovechamiento de estos, ya sea para incorporarlos de nuevo a su cadena de producción o en otras actividades con los mismos fines (Kosseva, et al., 2013).

4.2.2 Tratamiento de los residuos alimentarios mediante codigestión anaeróbica y producción de metano

Los problemas que se han presentado por la generación de residuos proceden de tres factores, la sobrepoblación, actividades antrópicas y consumismo, lo cual ha llevado a las comunidades y sus gobiernos a tomar medidas al respecto, es decir, tomaron alternativas de aprovechamiento o eliminación (Chávez Porras y Rodríguez González, 2016).

En 2015, los cuatro países con mejor gestión de residuos sólidos fueron Colombia, Puerto Rico, Ecuador y Bolivia, implementando el uso de vertederos, reciclaje, rellenos sanitarios, digestión anaeróbica, compostaje e incineración (Segura, et al., 2020).

Las investigaciones se centran brindar un valor económico a la biomasa, la opción más cercana es la digestión anaeróbica, siendo un proceso en ausencia de oxígeno para lograr la transformación de la materia orgánica en gases como el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), usando dichos gases usados como biogás para llegar a cambiar parte de los combustibles fósiles, además, es clasificada como energía renovable por su versatilidad para ser transformada en energía eléctrica o térmica (Simbaqueva Aguilera y Urrego León, 2019).

La producción de metano a partir de los residuos alimentarios depende de las características físicas y químicas de estos, en el caso de los desechos de frutas y verduras, se logra convertir aproximadamente el 95% de sólidos volátiles teniendo un rendimiento de metano de 350 ml/g VS, según los estudios analizados por Uçkun Kiran y compañía.

4.2.3 Digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica, también llamada biometanización o producción de biogás, es un proceso biológico que se lleva a cabo por medio de la fermentación microbiana en un entorno con

ausencia de oxígeno, generando una mezcla de gases que se compone de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y dejando una suspensión acuosa (lodos) (Lorenzo Acosta y Obaya Abreu, 2005).

Se denomina un proceso complejo, donde intervienen microorganismos que descomponen la materia orgánica en compuestos más sencillos, para luego ser convertidos en ácidos grasos volátiles (AGV's), los cuales son consumidos por microorganismos metanogénicos, teniendo como resultado la generación de metano (CH_4) entre el 50 % al 70% y dióxido de carbono (CO_2) entre el 50% al 30% (García, 2021).

La materia orgánica es el componente principal para el funcionamiento de la técnica, dichos se componen de carbohidratos, proteínas y grasas, en otras palabras, es la biomasa residual que cuente con un alto contenido de humedad, como restos de comida, restos de jardinería y vegetación, residuos de la ganadería y residuos de las plantas de tratamiento (Hagos, et al., 2017).

4.2.3.1 Procesos de la digestión anaeróbica.

Los cuatros principales procesos que están involucrados en la digestión anaeróbica son:

1. La hidrólisis:

Es la etapa inicial, donde la materia orgánica se encuentra como moléculas insolubles y completas, estas son solubilizadas por exoenzimas llamadas hidrolasas que excretan las bacterias hidrolíticas, lo cual provoca un efecto catalítico hidrolizante, es decir, las proteínas se convierten en aminoácidos, los polisacáridos en azúcares y los lípidos en ácidos grasos (Lorenzo Acosta y Obaya Abreu, 2005; Parada Parada, 2016).

2. Acidogénesis:

En este periodo, los productos de la hidrólisis son transformados por medio de un conjunto de bacterias que los fermentan e hidrolizan, generando ácidos grasos más sencillos como acético, propiónico y butírico, en gran parte. Dichos ácidos de cadena corta son procesados y liberados como hidrogeno (H_2), en otras palabras, los azucares simples, ácidos grasos y aminoácidos son transformados a ácidos orgánicos y alcoholes (Garcia Garcia, 2021; Parada Parada, 2016).

3. Acetogénesis:

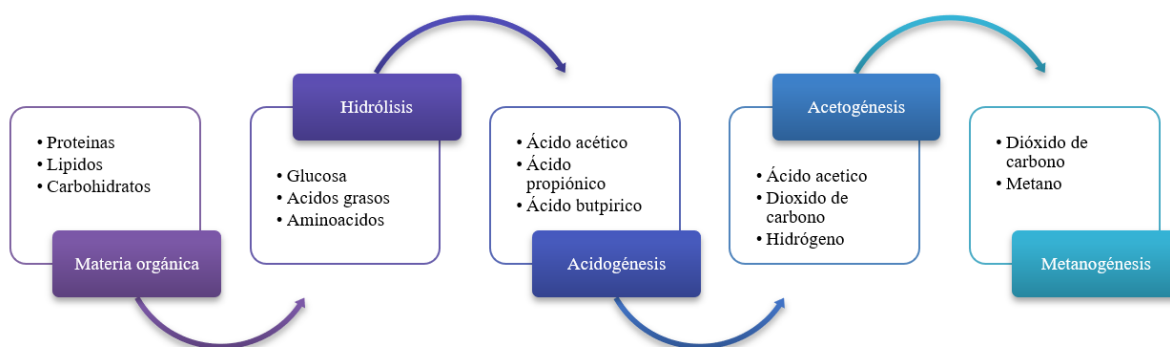
Se conoce como acidogénesis intermedia, algunos productos de la fermentación son metabolizados directamente por los organismos acetogénicos formando productos más sencillos (hidrogeno (H_2), dióxido de carbono (CO_2) y acetato ($C_2H_3O_2^-$)) (Parada Parada, 2016; Parra Huertas, 2015).

4. Metanogénesis:

En esta etapa metabólica, el metano (CH_4) es producido por medio de productos conseguidos en la anterior fase, el ácido acético o la mezcla de hidrogeno (H_2) y dióxido de carbono (CO_2), serian el alimento para dos grupos de bacterias metanogénicas (acetoclásticas y hidrogenofílicas), dando por finalizado el proceso de digestión anaeróbica (Parada Parada, 2016; Parra Huertas, 2015).

En la **Figura 1**, se puede ver reflejado el proceso de digestión anaeróbica manera sencilla:

Figura 1. *Fases del metabolismo principal de la digestión anaeróbica*



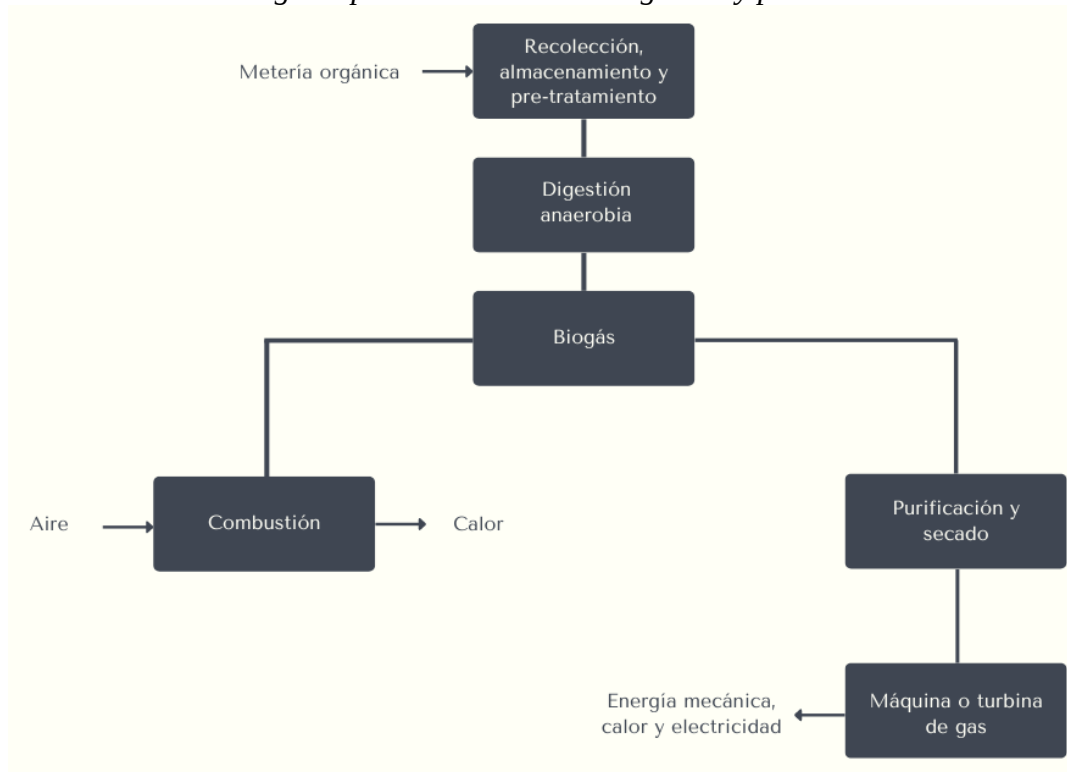
4.2.4 Definición de biogás

El biogás es una mezcla de gases generados de manera natural por un proceso metabólico donde la materia orgánica es el componente principal (Hagos, et al., 2017). Su composición se basa en el metano, ya que, contiene entre el 50% - 70%, también, contiene dióxido de carbono en gran medida, ocupando del 30% - 40% (Vega Martínez y Silva Ariza, 2020).

Dicho gas es utilizado como biocombustible, calor y electricidad, está disponible para la nueva generación amigable con el medio ambiente, dándole valor energético a los residuos orgánicos y abriendo paso a la producción de energía (Matheri, et al., 2017). En el panorama mundial, los países con mayor investigación y desarrollo en temas de biogás son China, India y Europa, siendo pioneros en la implementación de biodigestores, sin embargo, en 2017, Alemania lideraba el incremento de la tecnología en biogás, esto gracias a su programa “Renewable Energy Sources Act” (Reyes Aguilera, 2017). En Colombia, ha sido una alternativa viable con el desarrollo sostenible, comenzando la implementación en las zonas rurales y algunas en sectores domésticos, pero, la mayoría de estos son proyectos independientes, por lo cual, no se tiene información de todos los productores de biogás (Acosta Pabuenta y Pasqualino, 2014).

La **Figura 2**, es un esquema representativo de la obtención energía a partir de la materia orgánica por medio de la digestión anaeróbica:

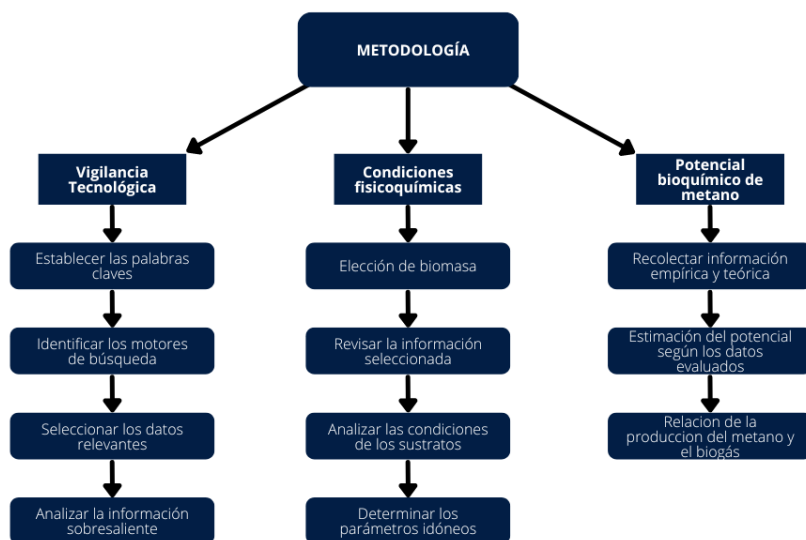
Figura 2. Obtención de biogás a partir de la materia orgánica y posibles usos



5. Diseño Metodológico

La metodología se basó en la vigilancia tecnológica, la elección del sustrato y la evaluación del potencial de metano, como se muestra en la **Figura 3**, en esta se encuentran las actividades que se llevaron a cabo en el desarrollo del proyecto.

Figura 3. Metodología del proyecto



5.1 Vigilancia tecnológica

La vigilancia tecnológica es un proceso sistemático caracterizado por planear, seleccionar, evaluar y comunicar la información en cualquier tema de interés, con el fin de analizar situaciones y tomar decisiones de manera crítica y asertiva, para la anticipación riesgos y estrategias de prevención (Cabrita, et al., 2016).

El proceso metodológico de vigilancia tecnológica trabajado en el estudio se desarrolló teniendo en cuenta las siguientes actividades:

- Establecer las palabras claves: Estos términos se identifican a partir del tema de interés, en este caso, las palabras usadas se dividieron en tres ejes temáticos, el primero fue la producción de metano, el segundo fue la digestión anaeróbica y el último fue los residuos alimentarios; ya con estos ejes temáticos se logró estructurar la ecuación de búsqueda.
- Identificar los motores de búsqueda: Se implementó una base de datos, la cual fue Scopus, una base de datos bibliográficos que abarca las áreas de ciencia, tecnología, medicina y ciencias sociales.

- Seleccionar la información relevante: Dentro de los resultados arrojados por la base de dato, nos enfocamos en los artículos con un número mayor de citaciones y con información que genere peso, puesto que, no todos los datos aportan al rumbo que tiene el estudio.
- Analizar la información sobresaliente: Los registros obtenidos se trataron con Vanage Point (Licencia académica 9.0, Search Technology, Inc) un software diseñado para la minería de texto, el cual se encuentra disponible en la bibliometría de la Universidad Santo Tomás, en dicho programa se permite identificar tendencias de años de publicación, autores principales, países e instituciones con mayor interés sobre el tema, dándole rumbo a la investigación.

Dentro de la vigilancia tecnológica nos apoyamos de la cienciometría, siendo una herramienta empleada para el análisis estadístico de las investigaciones científicas, además, se cuenta con indicadores para definir tendencias en los artículos y patentes, como se puede observar en la Tabla 2.

Tabla 2. *Indicadores cienciométricos para artículos*

Tipo de revisión	Actividad científica
Tipo de documento	Artículos científicos.
Bases de datos	Bases de datos tipo referenciales y de texto.
Estructurar la ecuación de búsqueda	Palabras clave, buscar en los <i>keywords</i> , título y <i>abstract</i> del artículo, período de consulta.
Número de documentos	Número de artículos.
Dinámica de publicaciones	Número de artículos por años.
Autores	Investigadores más importantes en el tema.
Afiliación por país	Países donde se encuentran trabajando los investigadores.
Afiliaciones por institución	Organizaciones de tipo académico, privadas, gubernamentales, públicas.
En qué tema	Área de conocimiento en la cual tiene su aplicación el trabajo de investigación.
Donde se publica	Revistas científicas.

Adaptado de Unidad de Bibliometría – USTABUCA (2023)

5.2 Condiciones fisicoquímicas de los sustratos

La elección de la materia orgánica se realizó a partir del sector agropecuario, con la información obtenida de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) de 2019 a nivel nacional y a nivel del departamento de Santander, considerando los productores en condición de personas naturales y las hectáreas del suelo utilizado para actividades agrícolas.

Así mismo, se obtuvo información del PGIRS de Santander, donde se expresaba la cantidad de RSO que llegaba a la disposición final y su indicador de generación de acuerdo con cada habitante, en otros términos, es la cantidad de RSO que genera cada habitante de Santander.

Se ha utilizado dicha información con relación a la producción agropecuaria de la ENA, ya que, desde allí comienza el ciclo de los alimentos, y la obtención de los RSO presentado en los registros del PGIRS, puesto que, allí se tiene información de la disposición final. Siendo los residuos alimentarios el componente principal de la digestión anaeróbica para la obtención de metano y/o biogás.

Por otro lado, la biomasa en el proceso de digestión anaeróbica debe enfocarse en los parámetros fisicoquímicos para conseguir un mejor rendimiento en la producción de metano y/o biogás, esto se tiene presente por la sensibilidad de la técnica empleada. Por esta razón en los estudios se tiene en cuenta el porcentaje de carbohidratos, proteínas y lípidos, pero, también se resalta el papel que cumple la Demanda Química de Oxígeno (DQO) dando un balance energético en el digestor, el pH que influye en la actividad bacteriana y la relación SV/ST que es un indicador del porcentaje orgánico presente en el sustrato.

5.3 Potencial teórico de metano

Para determinar el potencial de metano, se consiguieron y examinaron datos teóricos de residuos alimentarios los cuales fueron sometidos al proceso de digestión anaeróbica, esta información va ligada a las reacciones bioquímicas presentes en la técnica, por otro lado, se cuenta con los datos experimentales, donde se consiguieron índices de producción de metano según cada sustrato utilizado.

5.3.1 Estimación del potencial de metano

En la evaluación y análisis del potencial de metano se tiene en cuenta los parámetros físicos-químicos hallados en el título anterior (5.2 Condiciones fisicoquímicas de los sustratos), dentro de estos parámetros encontramos el porcentaje de humedad, Solidos Totales (ST), Solidos Fijos (SF), Solidos Volátiles (SV), lípidos, proteínas, carbohidratos, la relación carbono/nitrógeno, entre otros; una vez se obtengan los valores de cada parámetro se puede establecer el índice de producción de metano de acuerdo a la información extraída de los estudios.

Así mismo, los cálculos estequiométricos de cada reacción bioquímica presente en la digestión anaeróbica brindan una referencia teórica para la cantidad de metano que se puede producir. De este modo, se logra observar en **la Tabla 3** las 7 ecuaciones que se plantean para analizar el potencial de metano por medio de la estequiometria bioquímica.

Tabla 3. Reacciones bioquímicas de la digestión anaeróbica de la materia orgánica.

Tipo de reacción	Ecuación	
Fermentación de glucosa a acetato	$Glucosa + 4H_2O \rightarrow CH_3COO^- + 4H^+ + 4H_2$	(1)
Fermentación de glucosa a butirato	$Glucosa + 2H_2O \rightarrow C_4H_7O_2 + 4HCO_3^- + 3H^+ + 2H_2$	(2)
Fermentación de butirato a acetato e hidrogeno	$Butirato + 2H_2O \rightarrow 2CH_3COO^- + H^+ + H_2$	(3)

Tipo de reacción	Ecuación	
Fermentación del propionato a acetato	$Propionato + 3H_2 \rightarrow CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + H_2$	(4)
Acetogénesis a partir de hidrogeno y dióxido de carbono	$HCO_3^- + H^+ + 4H_2 \rightarrow CH_3COO^- + 2H_2O$	(5)
Metanogénesis a partir del dióxido de carbono e hidrogeno	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	(6)
Metanogénesis a partir del acetato	$Acetato + H_2O \rightarrow CH_4 + HCO_3^- + H^+$	(7)

Adaptado de Cárdenas Rincón y Zapata Villareal (2016) y Ochoa, et al. (2021)

6. Resultados y Discusión

6.1 Vigilancia tecnológica

En la elección de las palabras claves se estructuraron en tres ejes temáticos, el primero tema sería el metano, incluyendo la producción, el rendimiento, el potencial y la fermentación de este, el segundo se basa en la digestión anaeróbica, teniendo en cuenta el reactor y los microorganismos, y el último, se desarrolló entorno al sustrato, en este caso, los residuos alimentarios. La ecuación de búsqueda se realizó con los términos en inglés, porque la base de datos de Scopus, tiene un repertorio más amplio en dicho idioma.

La ecuación plateada es la siguiente “(TITLE-ABS-KEY ("methane production" OR "methane potential" OR "methane yield" OR "biogas production" OR "methan* fermentation") AND TITLE-ABS-KEY (methanogen* OR bioreactor* OR digester OR reactor* OR anaerob*) AND TITLE-ABS-KEY ("food waste*")) AND PUBYEAR > 2010 AND PUBYEAR < 2022 AND PUBYEAR > 2010 AND PUBYEAR < 2022”, en ella se evidencian los ejes ya mencionados, sus respectivos conectores lógicos y esta adecuada a la búsqueda avanzada de Scopus, también, cabe resaltar el periodo de tiempo de búsqueda abarca desde 2011 a 2021, es decir, un periodo de diez años.

La ecuación se formuló de esa manera por los objetivos del proyecto, ya que, siguiendo dichas temáticas se lograría conseguir un resultado aceptable, para generar un análisis del panorama científico con respecto al potencial teórico del metano por medio de la digestión anaeróbica.

6.1.1 Indicadores cientiométricos

Los resultados alcanzados con la ecuación de búsqueda en Scopus, nos arrojó una densa cantidad de estudios e investigaciones que se han ejecutado desde 2011 a 2021, dentro de estos tenemos, artículos, documentos de conferencias, revisiones, capítulos de libros, entre otros. Ahora, teniendo dicha información en bruto procedemos a tratarla para generar un análisis con los indicadores cientiométricos.

Tabla 4. *Indicadores cientiométricos del proyecto*

Tipo de revisión	Actividad científica
Tipo de documento	Artículos científicos.
Bases de datos	Scopus
Estructurar la ecuación de búsqueda	(TITLE-ABS-KEY ("methane production" OR "methane potential" OR "methane yield" OR "biogas production" OR "methan* fermentation") AND TITLE-ABS-KEY (methanogen* OR bioreactor* OR digester OR reactor* OR anaerob*)) AND TITLE-ABS-KEY ("food waste*")) AND PUBYEAR > 2010 AND PUBYEAR < 2022 AND PUBYEAR > 2010 AND PUBYEAR < 2022
Número de documentos	1.333
Dinámica de publicaciones	2011: 24; 2012: 47; 2013: 52; 2014: 74; 2015: 89; 2016: 106; 2017: 133; 2018: 185; 2019: 181; 2020: 221; 2021: 220
Autores	Li, Y.; Zhang, J.; Wang, X; Liu, Y.; Zhang, L.
Afiliación por país	China; Estados Unidos; Corea del Sur; India; Italia
Afiliaciones por institución	Ministerio de educación de China, Universidad de Tsinghua, Universidad Jiao Tong de Shanghái, Universidad de Tohoku, Academia de China de Ciencias
En qué tema	Ciencias Ambientales y Energía
Donde se publica	Bioresource Technology, Waste Management, Journal of Cleaner Production, Science of the Total Environment, Chinese Journal of Environmental Engineering.

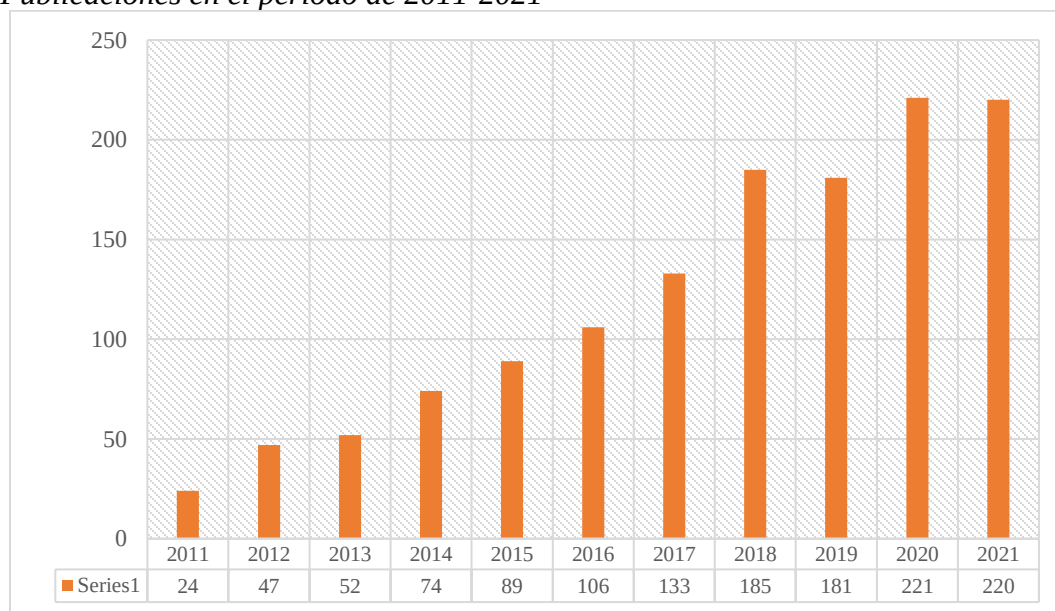
Adaptado de Unidad de Bibliometría – USTABUCA (2023).

En la Tabla 4 se puede observar de manera resumida los resultados obtenidos con la búsqueda, donde se puede observar el número de documentos arrojados, los países y las instituciones donde se han hecho más investigaciones del tema en cuestión, entre otros aspectos.

6.1.1.1 Publicaciones por año

El estudio bibliométrico se realizó en un periodo comprendido entre 2011 y 2021, presentando un comportamiento de crecimiento continuo a lo largo de los años, llegando a reportar más de 400 publicaciones en los últimos años, sin embargo, en el 2019 tuvo un pequeño decrecimiento, debido a la pandemia que todo el mundo tuvo que vivir.

Figura 4. *Publicaciones en el periodo de 2011-2021*



Adaptado de Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2023), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, Search Technology).

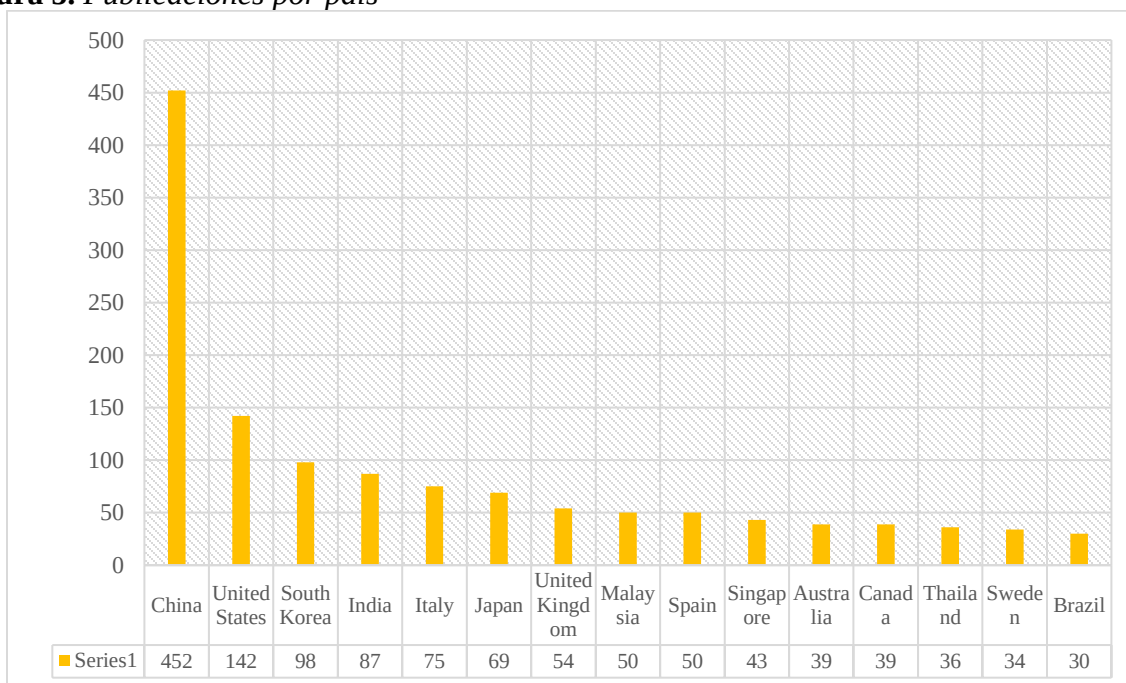
Como se puede observar en la Figura 4, el tema de la producción de metano por medio de la digestión anaeróbica ha generado gran interés en la comunidad científica, lo cual nos indica que

los países están comenzando a buscar alternativas entorno al desarrollo sostenible, además, es un tema que se va a seguir expandiendo por los beneficios que genera dicha técnica.

6.1.1.2 Publicaciones por país

La tendencia de investigación de artículos científicos se encuentra en países desarrollados como se muestra en la Figura 5, destacando países como China y Estados Unidos, los cuales encabezan la gráfica con un 452 y 142, respectivamente. Esto en parte radica en la importancia, apoyo e impulso que los gobiernos de dichos países les dan a las energías renovables y brindar un aprovechamiento a los residuos generados.

Figura 5. *Publicaciones por país*



Adaptado de Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2023), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, Search Technology).

La digestión anaeróbica y aprovechamiento de residuos es un tema conocido desde 1970 en China, siendo este un país pionero en la generación de metano y biogás, sin embargo, Estados

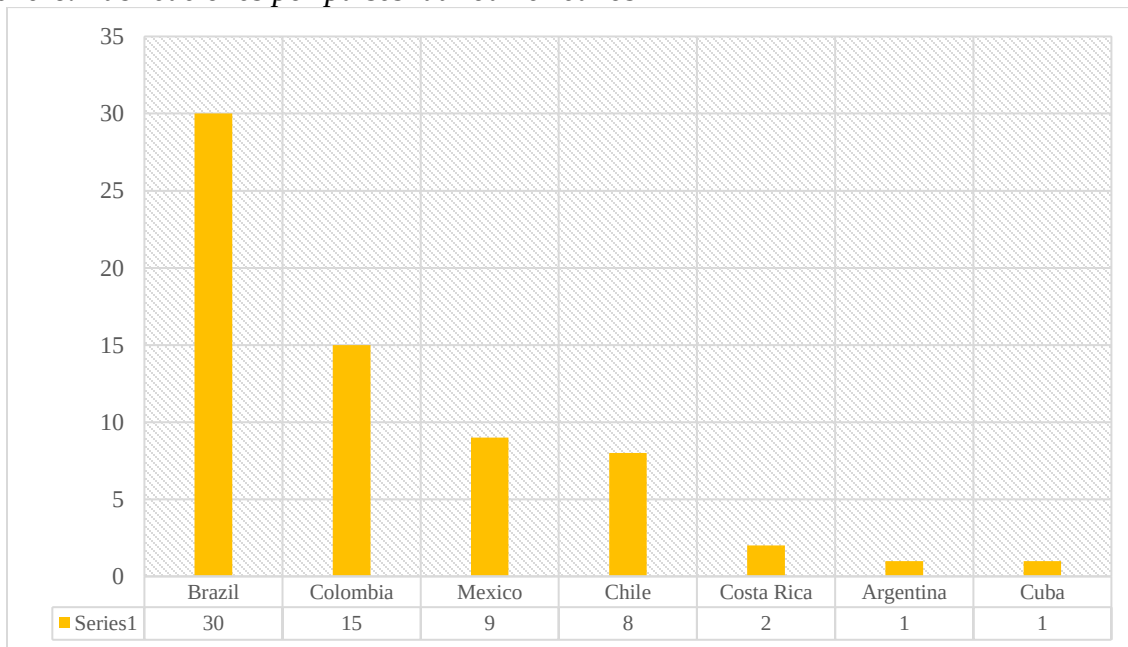
Unidos cuenta con un gran número de biodigestores actualmente; de igual forma, estos países tienen demasiados habitantes y siguen en crecimiento, por consiguiente la generación de residuos tiende a ir aumentando, esto causa que los investigadores estén día a día buscando soluciones a las problemáticas que se están presentando.

6.1.1.3 Publicaciones por países latinoamericanos

El país latinoamericano que encabeza la lista de publicaciones realizadas sobre la digestión anaeróbica para obtener metano es Brasil con 30 reportes como lo muestra la

Figura 6, también es catalogado como el mayor exponente en ciencia y tecnología a nivel de América Latina en los últimos años, lo cual lo ha llevado a colaborar con los países que veíamos en la Figura 5.

Figura 6. *Publicaciones por países latinoamericanos*



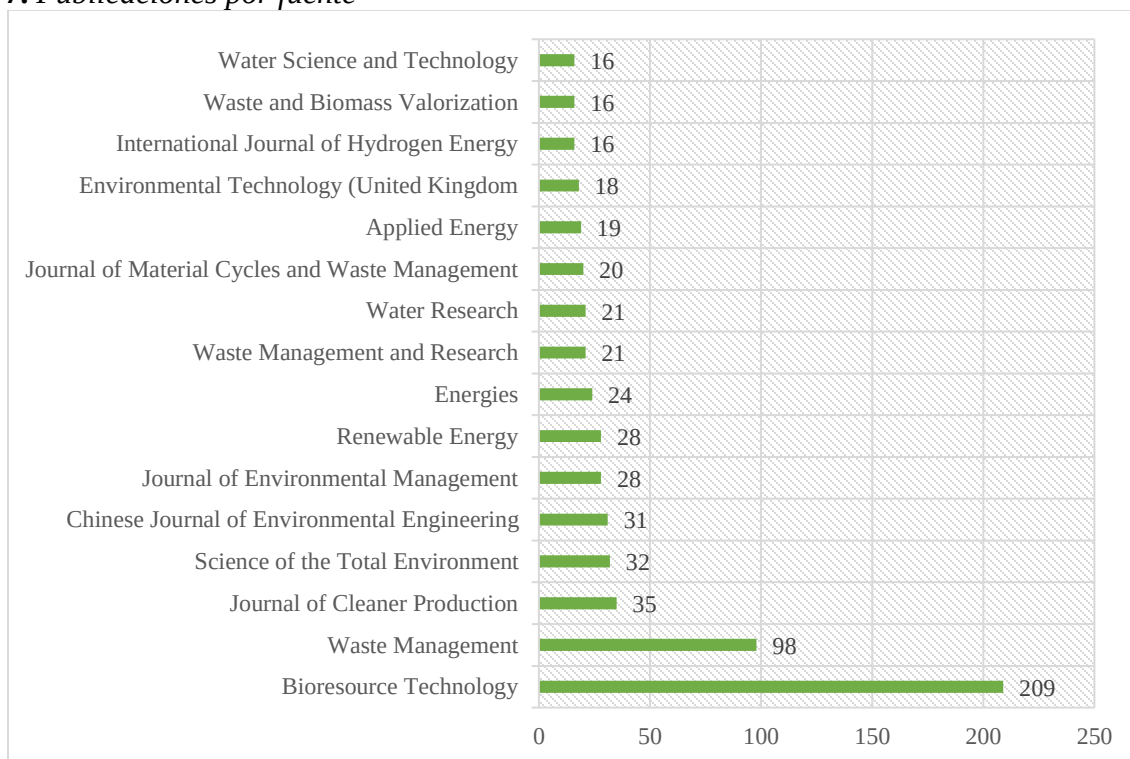
Adaptado de Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2016), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, Search Technology).

A nivel de América Latina, todavía se sigue investigando y haciendo pruebas piloto a una pequeña escala, puesto que la implementación y distribución de la información es entrecortada, por lo tanto, no permite que se llegue a mucha gente para seguir apoyando las energías renovables. Pero, en Colombia, ya están reguladas las políticas del uso y distribución de biogás, de modo que ya hay una oportunidad para impulsar los procesos como la digestión anaeróbica en zonas rurales.

6.1.1.4 Publicaciones por fuente

Las revistas con más relevancia en el potencial de metano a partir de los residuos alimentarios por medio de la digestión anaeróbica son Bioresource Technology y Waste Management, teniendo 209 y 98 publicaciones, respectivamente, y ambas son dirigidas desde Science Direct.

Figura 7. *Publicaciones por fuente*



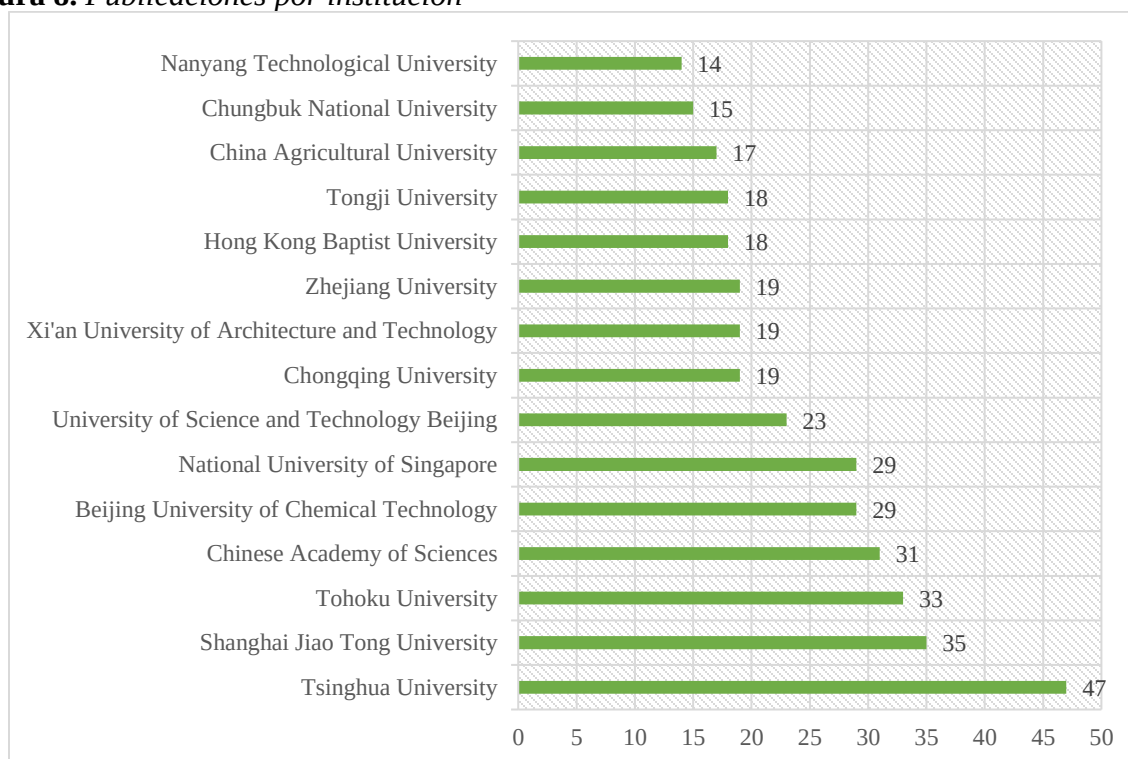
Adaptado de Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2023), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, Search Technology).

Ahora, Bioresource Technology, es una revista que se enfoca en darle prioridad a difundir información acerca de la biomasa, el tratamiento biológico de residuos, la bioenergía, las biotransformaciones y las tecnologías asociadas a la producción, eso quiere decir que va incluido el tema de biocombustibles y los bioprocesos, por otro lado, Waste Management, es una revista dedicada a la presentación y discusión sobre la política de gestión de residuos, la educación y las evaluaciones económicas y ambientales.

Como se puede apreciar, ambas revistas están enfocadas en darle prioridad a los residuos y a las tecnologías sostenibles, siendo dos grandes fuentes para esparcir información referente al aprovechamiento de los residuos alimentarios por medio de la digestión anaeróbica, no obstante, el tema de biocombustibles se comparte más en Bioresource Technology.

6.1.1.5 Publicaciones por institución

Las universidades más relevantes son aquellas de China, como lo veíamos anteriormente (Figura 5), China tiene un amplio registro y conocimiento sobre el tema, por ende, es coherente que sus universidades estén punteando la Figura 8 y la más destacable sea Tsinghua University con 47 publicaciones.

Figura 8. Publicaciones por institución


Adaptado de Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2023), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, Search Technology).

- Tsinghua University:** La escuela fue fundada en 1911 y se ha convertido en una de las más famosas del país. Se encuentra ubicada en los antiguos jardines imperiales de la dinastía Qing, Cuenta con 14 escuelas y 56 departamentos, dentro de ellos está la facultad de derecho, medicina, historia, ingeniería, ciencias, administración, economía, filosofía y arte. En el Ranking mundial de universidades, ocupo el puesto 24, además, se dedica a la investigación y la innovación empleando a 32 miembros de la Academia China de Ingeniería y 26 miembros de la Academia China de Ciencias (Tsinghua University, 2022).
- Shanghai Jiao Tong University:** Después de 125 años, se ha convertido en una universidad nacional de primera clase y de renombre internacional, además, se ha convertido en una de las 100 mejores universidades del mundo. Cuenta con 33 escuelas/departamentos, 2 institutos de investigación médica afiliados, 17.460 estudiantes universitarios, 14.670

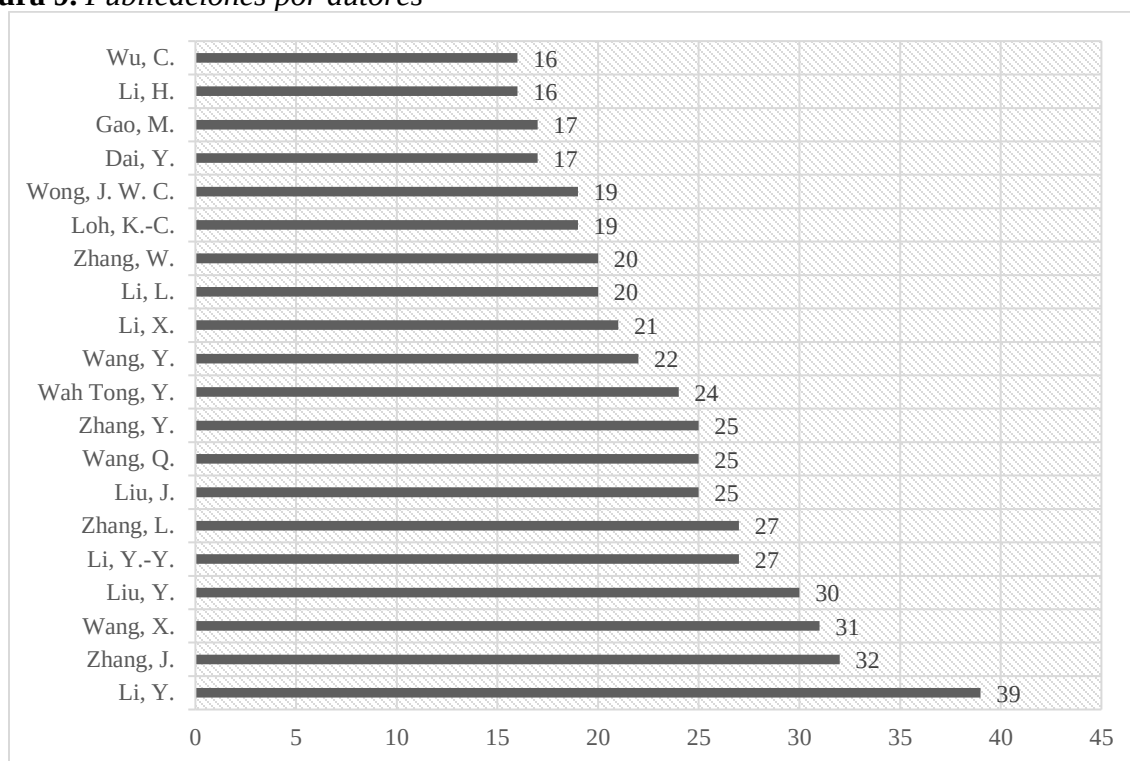
candidatos a maestría, 11.031 candidatos a doctorado, y 2.291 estudiantes extranjeros La facultad de SJTU incluye 3512 maestros, 27 miembros de la Academia China de Ciencias y 25 miembros de la Academia China de Ingeniería. La universidad ofrece 71 programas de pregrado que cubren 9 disciplinas principales: economía, derecho, literatura, ciencias, ingeniería, agricultura, medicina, administración y artes (Shanghai Jiao Tong University, 2022).

- Tohoku University: La universidad se enorgullece de estar clasificada entre las principales universidades de Japón. Originalmente fue conformada por el Colegio de Agricultura y el Colegio de Ciencias. Desde su inicio, fue reconocida como una Universidad abierta y de principios liberales, siendo la primera en admitir estudiantes masculinos y femeninos, también, fue de las primeras en admitir a estudiantes extranjeros, desde el año 1911. La universidad cuenta con 10 escuelas de bachiller, 14 escuelas de graduado y 5 institutos de investigación, además de 4 bibliotecas donde se encuentran temas relacionados con ciencias, ingeniería, agricultura, entre otros (Tohoku University, 2022).

6.1.1.6 Publicaciones por autores

Los registros de publicaciones presentan el aporte Li Yu-You, profesor de protección ambiental del departamento de ingeniería civil y ambiental de la escuela de graduados en la universidad de Tohoku, el 28% de sus investigaciones han sido en Bioresource Technology. Sus investigaciones y avances sobre la digestión anaeróbica vienen desde hace 20 años aproximadamente, se ha enfocado en determinar la eficiencia de los pretratamientos, a su vez, determino los factores de los residuos sólidos que afectan la producción de metano y también, ha analizado tratamiento para los lodos y los lixiviados de los residuos sólidos.

Figura 9. *Publicaciones por autores*



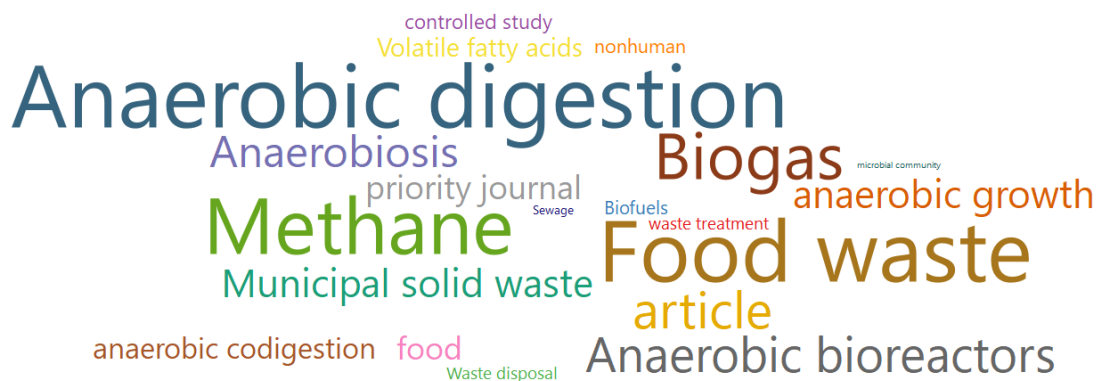
Adaptado de Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2023), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, Search Technology).

6.1.1.7 Palabras claves

En los 1.333 artículo encontrados se encontraron seis palabras claves que superan los seiscientos registros, estas palabras son anaerobic digestion, food waste, methane y biogás, como se muestra en la Figura 10, donde las palabras con un tamaño mayor y más centradas, son las que tienen mayor número de registro.

Estas palabras están relacionadas directamente con la ecuación de búsqueda, debido a que las búsquedas se realizan enlazando los términos de la ecuación con las palabras en los títulos, los resúmenes y palabras claves, indicando las tendencias de búsqueda y teniendo un filtrado de los estudios a analizar.

Figura 10. *Palabras clave*



Adaptado de Unidad de Bibliometría - USTABUCA, cálculos basados en información de Scopus (Elsevier, 2023), procesados con VantagePoint (Versión 9.0, Search Technology).

6.2 Parámetros fisicoquímicos para la producción de metano

El análisis de los parámetros fisicoquímicos presenta un punto vital para la ejecución de la técnica, ya que los microorganismos son sensibles a los cambios del ambiente. Se debe mantener un ambiente equilibrado en sales minerales (azufre, calcio, magnesio, hierro, zinc, entre otros), además, un alto contenido de lignina en el sustrato no se podría aprovechar, tendría que pasar por un pretratamiento.

- **Temperatura:** Uno de los parámetros ambientales más importantes para tener en cuenta, con ella se puede identificar los procesos de la digestión anaeróbica. Dentro del proceso los mejores rangos son el mesofílico (aproximadamente 35°C) y el termofílico (aproximadamente 55°C), cuando la temperatura aumente también incrementa la tasa de metabólica con lo cual se aceleran los procesos, sin embargo, si la temperatura comienza a variar es posible que se tenga menor producción de biogás.

En cuestiones de optimización del proceso, se recomiendan las temperaturas mesofílicas, ya que las bacterias termofílicas también logran mantener su rendimiento en dichas

condiciones. Siendo la temperatura un parámetro relevante para la producción de biogás, no cuenta con muchos estudios en la comunidad científica.

- pH: En la digestión anaeróbica el pH juega un papel importante, porque, puede causar un ambiente ácido afectando negativamente la estabilidad de los microorganismos, puesto que incrementa la generación de amoníaco inhibiendo el crecimiento bacteriano. Para cada grupo microbiano existe un rango óptimo de pH, en cuanto a las bacterias fermentativas el rango va desde 5,0 a 6,0 pero, en el caso de las bacterias metanogénicas el rango comienza en 6,5 y termina en 8,0. El nivel de pH se puede ajustar mediante la ingesta de biomasa, en vista de que las bacterias metanogénicas entran en un estado crítico cuando el pH queda por debajo de 5,0 y si, el pH llega a estar por encima de 8,0, resulta ser tóxico para los organismos anaeróbicos, a tal punto de llegar a inhibir las funciones biológicas.

Dentro de la práctica experimental se ha comprobado que el rango óptimo es 7,0, de ahí que se aleje de dicho valor la producción de metano comienza a verse afectada, pero en rangos extremos el proceso llega a un punto donde se inhibe la actividad microbiana (Reyes Aguilera, 2017).

- Relación C/N: Con la relación carbono/nitrógeno adecuado, se va a conseguir un ambiente lleno de nutrientes para una mejor proliferación y actividad microbiana. Al tener altas concentraciones de carbono, va a tener una reducción de actividad metabólica, y si, se tiene una concentración elevada de nitrógeno aumenta la producción de amoníaco, inhibiendo el crecimiento de las bacterias.

Es un parámetro para tener en cuenta al elegir la biomasa, porque el carbono y el nitrógeno son el alimento fundamental para las bacterias metanogénicas, por esta razón se indica tener esta relación en un rango de 20 a 30 (Simbaqueva Aguilera y Urrego León, 2019).

- Ácidos Grasos Volátiles (AGV's): Se consideran los precursores en la metanogénesis, siendo ácidos grasos de cadena larga lo cual puede llegar a demorar los procesos. La cantidad de AGV's en el biodigestor, indica si el procesó marcha bien y si cuenta con condiciones óptimas o desfavorables.
- Amoníaco: En el proceso de la ruptura de las proteínas, se va generando y acumulando cadenas de amoniaco y amonio. Es considerada una de las sustancias toxicas y problemáticas a la hora de ejecutar la digestión anaeróbica, ya que, en altas concentraciones puede inhibir la actividad microbiana
- Tiempo de Retención Hidráulica (TRH): Es el tiempo esperado para que los microorganismos consuman y realicen la síntesis de la materia orgánica, directamente ligado al volumen de sustrato cargado diariamente, el volumen del biodigestor, aunque, al aumentar la carga volumétrica, el tiempo de retención disminuye.

Ahora, un tiempo prolongado llega a provocar la muerte de los microorganismos, por falta de nutrientes y por el aumento de los AGV's, no obstante, un tiempo corto podría interrumpir el crecimiento microbiano y eso ocasionaría daños al proceso.

6.3 Evaluación del potencial teórico para la producción de metano

La evaluación y análisis de potencial teórico del metano de los residuos alimentarios por medio del proceso de digestión anaeróbica, se realiza a partir de los estudios extraídos de Scopus usando la ecuación de búsqueda, en los artículos se encontraron los parámetros que tuvo en cuenta cada grupo de investigadores, y su indicador de metano y biogás, y también las recomendaciones que dejaron para futuros artículos.

Tabla 5. *Revisión bibliográfica (condiciones de la biomasa)*

Titulo	Tipo de residuo	Condiciones	Referencias
Biometanización de residuos sólidos orgánicos.	Residuos Sólidos Orgánicos de comedor universitario	Humedad: 74% ST: 21% SF: 3% SV: 13% Lípidos: 4% Materia orgánica: 23% pH: 5,15 C/N: 2.63	(Berrelleza Robles, 2014)
Codigestión anaeróbica y pretratamientos de residuos agroalimentarios con fangos uasb de depuradora.	Residuo de fruta y verdura	Humedad: 87% ST: 12% SV: 10% Proteínas: 1% Carbohidratos: 8% pH: 4.96 C/N: 20.43	(Morales Polo, 2019)
	Residuo de carne	Humedad: 38% ST: 61% SV: 60% Lípidos: 64% Proteínas: 11% pH: 6.84 C/N: 74.17	
	Residuo de pescado	Humedad: 77% ST: 22% SV: 19% Lípidos: 1% Proteínas: 18% pH: 6.12 C/N: 3.55	
Construcción de un prototipo de biodigestión anaeróbica, para residuos alimentarios y estiércol de cerdo.	Residuos alimentarios y estiércol de cerdo	ST: 17.81 mg/L SF: 5.17 mg/L SV: 12.64 mg/L	(Moo Tadeo, 2018)
Determinación del potencial bioquímico de metano de residuos cítricos mediante digestión anaeróbica.	Residuos cítricos (naranja)	Humedad: 79% ST: 20% SV: 19% Lípidos: 10% Proteínas: 7% Carbohidratos: 75% pH: 3.42	(Urrea Arboleda, 2019)
Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal.	Los biorresiduos orgánicos municipales	Humedad: 76% ST: 113036 mg/L SV: 93016 mg/L Proteínas: 2% Carbohidratos: 9%	(Alexis, et al., 2015)

Titulo	Tipo de residuo	Condiciones	Referencias
		pH: 5.54	
Mejoramiento de la etapa de hidrolisis de los residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM) mediante un pretratamiento ácido, en la producción de bioenergéticos a nivel piloto.	La Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Municipales	ST: 89% SV: 83% Proteínas: 6.88 g/L Carbohidratos: 88.45 g/L	(Salgado Hernández, 2019)
Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaeróbica.	Residuos de mango (RMA), residuos de papaya (RPA) y residuos de plátano (RPL)	ST: RMA: 140 g/L RPA: 78g/L RPL: 226 g/L SV: RMA: 131 g/L RPA: 51g/L RPL: 169 g/L Materia Orgánica: RMA: 94% RPA: 66% RPL: 75% pH: RMA: 4,2 RPA: 5,4 RPL: 4,5	(González-Sánchez, et al., 2015)
Biochemical methane potential assessment of municipal solid waste generated in Asian cities A case study of Karachi, Pakistan	Residuos sólidos urbanos	ST: 44% SV: 82%	(Sohoo, et al., 2021)
Quantitative characterization of carbonaceous and lignocellulosic biomass for anaerobic digestion.	Residuos alimentarios	ST: 25% aprox SV: 75% aprox pH: 30 aprox	(Matheri, et al., 2018)
High-efficiency anaerobic co-digestion of food waste and mature leachate using expanded granular sludge blanket reactor.	Residuos alimentarios	ST: 112.52 g/L SV: 110.11 g/L pH: 5.31	(Liu, et al., 2022)
Performances of anaerobic co-digestion of fruit y vegetable waste (FVW) and food waste (FW) Single-phase vs. two-phase.	Residuos de frutas y verduras	Humedad: 90% ST: 9% SV: 8% Lípidos: 5% Proteínas: 13% C/N: 18	(Shen, et al., 2013)
Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements.	Residuos alimentarios	ST: 18% SV: 17% Lípidos: 23.3 g/L Proteínas: 32.9 g/L Carbohidratos: 111.7 g/L C/N: 13.2	(Zhang y Jahng, 2012)
Assessment of the resource associated with biomethane from food waste.	Residuos alimentarios	ST: 29% SV: 95% Lípidos: 19% Proteínas: 18%	(Browne y Murphy, 2013)

Titulo	Tipo de residuo	Condiciones	Referencias
		Carbohidratos: 59% pH: 4.1 C/N: 14.2	

En la Tabla 5, se puede evidenciar los parámetros que se le midieron al sustrato antes de la digestión anaeróbica, algo que se puede apreciar de estos estudios es que destacan la medición de Solidos Totales (ST), los Solidos Volátiles (SV), el porcentaje de humedad y el pH, dejándolos como indicadores de rendimiento para la producción de metano.

Aunque la mayoría de los estudios no se especifiquen los residuos alimentarios, por medio de los porcentajes de carbohidratos, lípidos y proteínas se puede conseguir un balance adecuado a la biomasa del estudio analizado. Por otro lado, el estudio de Morales Polo llama la atención a la hora de analizar el potencial del metano con los residuos previamente separado, dividiendo lo en residuos de frutas y verduras, residuos de carne y residuos de pescado, es por consecuencia de estos artículos que se puede llegar a una codigestión para optimizar el rendimiento de la digestión anaeróbica. El estudio de “Determinación del potencial bioquímico de metano de residuos cítricos mediante digestión anaeróbica.”, es uno que llama la atención por el sustrato que tomaron para evaluar, ya que al elegir residuos cítricos su pH tendría tendencias de acidez, además, de un pretratamiento para la eliminación de aceites.

Tabla 6. *Revisión bibliográfica (Potencial de metano y biogás)*

Titulo	Tipo de residuo	Potencial de metano	Potencial de biogás	Referencias
Biometanización de residuos sólidos orgánicos.	Residuos Sólidos Orgánicos de comedor universitario	473 mL metano con 1.2 g SVT a los 26 días		(Berrelleza Robles, 2014)
Codigestión anaeróbica y pretratamientos de residuos	Residuo de fruta y verdura	Bruto: 289 mL - Especifico: 26.35 mL/g SV	Bruto: 913.28 mL - Especifico: 82.86 mL/g SV	(Morales Polo, 2019)

Titulo	Tipo de residuo	Potencial de metano	Potencial de biogás	Referencias
agroalimentarios con fangos uasb de depuradora.	Residuo de carne	Bruto: 232 mL - Específico: 4.71 mL/g VS	Bruto: 1337.58 mL - Específico: 22.22 mL/g SV	
	Residuo de pescado	Bruto: 102 mL - Específico: 4.59 mL/g SV	Bruto: 769.23 mL - Específico: 34.06 mL/g SV	
Construcción de un prototipo de biodigestión anaeróbica, para residuos alimentarios y estiércol de cerdo.	Residuos alimentarios y estiércol de cerdo		Bruto: 1212 mL - Específico: 77.86 mL/mg SV	(Moo Tadeo, 2018)
Determinación del potencial bioquímico de metano de residuos cítricos mediante digestión anaeróbica.	Residuos cítricos (naranja)	0.5 L/g SV		(Urrea Arboleda, 2019)
Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal.	Los biorresiduos orgánicos municipales	S/I (0.25): 176 mL/g SV		(Alexis, et al., 2015)
Mejoramiento de la etapa de hidrólisis de los residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM) mediante un pretratamiento ácido, en la producción de bioenergéticos a nivel piloto.	La Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Municipales	35% sin pretratamiento y 37% con pretratamiento	191.63 mL/h sin pretratamiento y 216.89 mL/h con pretratamiento	(Salgado Hernández, 2019)
Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaeróbica.	Residuos de mango (RMA), residuos de papaya (RPA) y residuos de plátano (RPL)	RMA: 53.50 ml CH ₄ /g DQO RPA: 54.80 ml CH ₄ /g DQO RPL: 63.89 ml CH ₄ /g DQO		(González-Sánchez, et al., 2015)
Biochemical methane potential assessment of municipal solid waste generated in Asian cities A case study of Karachi, Pakistan	Residuos sólidos urbanos	209 mL/g SV	309 mL/g SV	(Sohoo, et al., 2021)
Quantitative characterization of carbonaceous and lignocellulosic biomass for anaerobic digestion.	Residuos alimentarios		215,15 NmlCH ₄ /g SV	(Matheri, et al., 2018)
High-efficiency anaerobic co-digestión of food waste	Residuos alimentarios	5.87 L/L/d		(Liu, et al., 2022)

Titulo	Tipo de residuo	Potencial de metano	Potencial de biogás	Referencias
and mature leachate using expanded granular sludge blanket reactor.				
Performances of anaerobic co-digestión of fruit y vegetable waste (FVW) and food waste (FW) Single-phase vs. two-phase.	Residuos de frutas y verduras	Tasa de carga orgánica 0.5: 0.54 L /g VS d		(Shen, et al., 2013)
Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements.	Residuos alimentarios	A partir del día 96, se alimentó la solución de oligoelementos que contenían Co y Fe: 450 ± 25mL/g VS		(Zhang y Jahng, 2012)
Assessment of the resource associated with biomethane from food waste.	Residuos alimentarios	Entre 467 - 529 LCH4 / kg SV		(Browne y Murphy, 2013)

En la **Tabla 6**, se logra evidenciar los potenciales de metano y biogás, lo cual brinda una referencia de rendimiento en cuanto al uso de los residuos alimentarios en la digestión anaeróbica. Sin embargo, en los estudios que se analizaron, no todos usan la misma unidad de media, esto también se debe al método por el cual se esté calculando la producción de los gases.

Se destaca el estudio realizado por Browne y Murpy, consiguiendo una producción de metano entre 467 - 529 LCH4 / kg SV, con los residuos alimentarios, este tipo de planteamiento se puede llevar a gran escala, para proporcionar energía renovable a una parte del sector agropecuario.

Tabla 7. Revisión bibliográfica (Observaciones y recomendaciones)

Titulo	Tipo de residuo	Observaciones y recomendaciones	Referencias
Biometanización de residuos sólidos orgánicos.	Residuos Sólidos Orgánicos de comedor universitario	Elevado contenido de humedad, materia orgánica y nitrógeno, lo cual, favorece la producción de metano. Las concentraciones altas de RSO afectan negativamente a las bacterias metanogénicas acetoclásticas.	(Berrelleza Robles, 2014)
Codigestión anaeróbica y pretratamientos de residuos	Residuo de fruta y verdura	Por su alta solubilidad, la digestión ocurre en dos fases, una primera en la que se	(Morales Polo, 2019)

Titulo	Tipo de residuo	Observaciones y recomendaciones	Referencias
agroalimentarios con fangos uasb de depuradora.		digiere la MO solubilizada, y una segunda, en menor proporción, en la que se digiere el resto de la DQO. No obstante, el nivel de biodegradación puede mejorar mediante pretratamientos, haciendo más accesible la MOP e incrementando la solubilización.	
	Residuo de carne	La digestión ocurre en una única fase, y pese a tener un gran contenido en carbono y DQO, la digestión no es completa. En parte por la inhibición, y en parte por un bajo nivel de biodegradación. Es un buen candidato para tratar mediante codigestión con otro sustrato con el fin de balancear la ratio C/N y evitar la inhibición por acumulación de AGCLs.	
	Residuo de pescado	La digestión ocurre en una única fase, y pese a tener un gran contenido en carbono y DQO, la digestión no es completa. En parte por la inhibición, y en parte por un bajo nivel de biodegradación. Es un buen candidato para tratar mediante codigestión con otro sustrato con el fin de balancear la ratio C/N y evitar la inhibición por acumulación de AGCLs.	
Construcción de un prototipo de biodigestión anaeróbica, para residuos alimentarios y estiércol de cerdo.	Residuos alimentarios y estiércol de cerdo	Las proporciones 20% E y 80% RA, resulta una mezcla eficiente.	(Moo Tadeo, 2018)
Determinación del potencial bioquímico de metano de residuos cítricos mediante digestión anaeróbica.	Residuos cítricos (naranja)	Debido a que no se realizó el pretratamiento para la eliminación de los aceites esenciales de los cítricos, se cree que éstos pudieron intervenir durante el proceso de producción de biogás.	(Urrea Arboleda, 2019)
Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal.	Los biorresiduos orgánicos municipales	La relación sustrato/inoculo influye en la digestión anaeróbica de los biorresiduos orgánicos municipales, se encontró mejores resultados en las relaciones menores a 2. El proceso se desestabiliza por la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV)	(Alexis, et al., 2015)
Mejoramiento de la etapa de hidrolisis de los residuos sólidos orgánicos municipales (RSOM) mediante un pretratamiento ácido, en la producción de	La Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Municipales	Se recomienda operar por un tiempo más prolongado el Reactor de Lecho Semi Fluidizado Inverso (RLSFI) con el sustrato pretratado para obtener mejores resultados y poder evaluar su rendimiento.	(Salgado Hernández, 2019)

Titulo	Tipo de residuo	Observaciones y recomendaciones	Referencias
bioenergéticos a nivel piloto.			
Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaeróbica.	Residuos de mango (RMA), residuos de papaya (RPA) y residuos de plátano (RPL)	Los residuos agroindustriales de plátano, papaya y mango pueden ser aprovechados como materia prima en la digestión anaeróbica para producir biogás y metano. A través del estudio del BMP se pudo conocer la biodegradabilidad y el potencial de metalización de cada residuo.	(González-Sánchez, et al., 2015)
Biochemical methane potential assessment of municipal solid waste generated in Asian cities A case study of Karachi, Pakistan	Residuos sólidos urbanos	Junto con los beneficios económicos de los proyectos de conversión de residuos en energía a base de biometano, existe la oportunidad de reducir anualmente casi 0,13 Mt CO ₂ -eq de potencial de calentamiento global debido a la fuga de metano al medio ambiente debido a la eliminación abierta de RSU en la ciudad.	(Sohoo, et al., 2021)
Quantitative characterization of carbonaceous and lignocellulosic biomass for anaerobic digestion.	Residuos alimentarios	Nuestros hallazgos demostraron la viabilidad de la recuperación de energía a partir de biomasa carbonácea y lignocelulósica que sea asequible, sostenible y con cero emisiones de carbono.	(Matheri, et al., 2018)
High-efficiency anaerobic co-digestion of food waste and mature leachate using expanded granular sludge blanket reactor.	Residuos alimentarios	Al agregar lixiviado maduro, se proporcionaron NH ₄ ⁺ -N para evitar la acidificación y para el crecimiento microbiano, y se mejoraron las eficiencias de las cuatro etapas de la digestión anaeróbica. El cambio de los géneros metanogénicos predominantes estabilizó el proceso de la digestión anaeróbica. Los resultados respaldan un tratamiento residuos alimentarios efectivo para aplicación industrial.	(Liu, et al., 2022)
Performances of anaerobic co-digestion of fruit y vegetable waste (FVW) and food waste (FW) Single-phase vs. two-phase.	Residuos de frutas y verduras	En general, el sistema bifásico presentó una mayor recuperación de bioenergía que el monofásico para mejorar la producción de metano e hidrógeno adicional.	(Shen, et al., 2013)
Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements.	Residuos alimentarios	Entre los oligoelementos examinados, el Fe se identificó como el más eficaz para estabilizar la digestión anaeróbica de los residuos de alimentos. Estos resultados ofrecieron una manera simple y fácil de tratar con éxito los desechos de alimentos a través de la digestión anaeróbica en un reactor de una sola etapa.	(Zhang y Jahng, 2012)

Titulo	Tipo de residuo	Observaciones y recomendaciones	Referencias
Assessment of the resource associated with biomethane from food waste.	Residuos alimentarios	Según este estudio, el desperdicio de alimentos tiene el potencial de proporcionar un suministro de energía renovable del 2,8% en el transporte. Las Regulaciones de subproductos animales no permiten que el digestato de los desechos de alimentos se aplique a las tierras agrícolas a menos que se segregue en la fuente. Por lo tanto, para obtener el recurso biológico completo a partir de la fuente de desechos alimentarios, la segregación de los desechos municipales debe implementarse completamente a nivel nacional.	(Browne y Murphy, 2013)

En la Tabla 7, se tendrían las recomendaciones y conclusiones de cada estudio, dentro de ellas varios estudios compartían la misma recomendación en entorno a los parámetros de control en el proceso de la digestión anaeróbica, puesto que se presentaron inconvenientes con el pH ácido, también con la abundancia de amonio que inhibe a los microorganismos. Por otro lado, la implementación de un pretratamiento, ayudo al rendimiento del proceso, además, ven la técnica como una alternativa rentable para comenzar a implementarla.

6.3.1 Tipo de reactor

Los reactores usados para las pruebas suelen ser de volumen pequeño, si el sustrato es homogéneo se trabaja en 100 mL aproximadamente y para sustratos heterogéneos se maneja un volumen de 500 mL a 2.000 mL, esto en escalas de laboratorio, ahora, si se habla de un reactor a escala piloto o industrial, se tendría en cuenta la cantidad de residuos que se va a tratar y de este dato se parte para el diseño del reactor.

En general, los reactores se pueden clasificar en:

- Reactor de filtro anaerobio de flujo ascendente: El cual se identifica por soportar cargas orgánicas elevadas, lo cual resulta en una mayor tolerancia a la presencia de tóxicos.

- Reactor de filtro anaerobio de flujo descendente: El reactor cuenta con un lavado descendente de la biomasa, evitando obstrucciones y permite una mejor circulación, además, impide la aglomeración de ácidos grasos volátiles entre otros inhibidores.
- Reactor batch o discontinuo: Se caracteriza por ser alimentado solo una vez y su facilidad de ser utilizado para degradar materia orgánica sólida, resulta ser una opción llamativa por sus buenos resultados a nivel volumétrico de gas, una vez finalizado el proceso, se vacía y se limpia para iniciar nuevamente.

6.3.2 Estimación de la producción teórica de metano y biogás

La digestión anaeróbica tiene como fuente principal los carbohidratos, las proteínas y los lípidos, y estos van a terminar en siendo gases y digestato, entonces, de manera química se puede formular cuanto es el porcentaje de meta y la cantidad de biogás obtenida de la biomasa. En la Tabla 8, se logra observar la reacción que se utiliza para cada uno (carbohidratos, proteínas y lípidos).

Tabla 8. Potencial teórico del metano y el biogás

Componente	Reacción metanogénica	Biogás (1g ¹)	Metano (CH ₄)
Lípidos	$C_{50}H_{90}O_6 + 24 \cdot 5H_2O \rightarrow 34.75CH_4 + 15.25CO_2$	1.425	69.5%
Carbohidratos	$C_6H_{10}O_5 + H_2O \rightarrow 3CH_4 + 3CO_2$	0.830	50%
Proteínas	$C_{16}H_{24}O_5N_4 + 14 \cdot 5H_2O \rightarrow 8.25CH_4 + 3.75CO_2 + 4NH_{4+} + 4NH_{3-}$	0.921	68.8%

Adaptado de P. Wang, et ál., (2018).

Entonces, por la parte de los lípidos, tenemos que por una mol de lípido se contiene 34.75 mol de metano y a su vez, 15.35, en otras medidas tendríamos un equivalente a 1.425 1g⁻¹ de biogás y al 69.5% de metano, en cuanto a los carbohidratos, por cada mol de un hidrato de carbono se

obtiene 3 mol de metano, en términos de biogás sería el 0.830 g^{-1} y el 50% de metano, ya para finalizar, por cada mol de proteína, se obtiene 8.25 mol de metano, que en palabras de biogás, sería 0.921 g^{-1} y el 68.8% de metano.

6.4 Residuos Sólidos Orgánicos en Bucaramanga

En Bucaramanga y su área metropolitana se genera un 94% de residuos domiciliarios, el otro 6% restante está distribuido en residuos de limpieza urbana y el barrido urbano, este casco urbano cuenta con un relleno sanitario (El carrasco). Para el año 2020, el carrasco tuvo un ingreso del 76% de RSO, dentro de estos se encuentran los residuos de comida y alimentos, pero, los centros de aprovechamiento no les dan valor a estos, por otro lado, los residuos originados en las plazas de mercado, tampoco, están recibiendo un manejo adecuado (Alcaldía de Bucaramanga, 2022).

Para 2021, la producción per cápita de residuos sólidos en Bucaramanga y su área metropolitana es de $0,87 \text{ kg/habitante-día}$; en un supuesto caso, donde los 607.511 habitantes de Bucaramanga, según el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística), estuvieran generando residuos en un día, al finalizar el tiempo se tendría 528.534 kg de residuos y 401.686 kg de RSO. Ahora, si lo RSO se componen del 20% de proteínas (80.338 kg), 20% de lípidos (80.337 kg) y 60% de carbohidratos (241.011 kg), estos porcentajes son aproximaciones ya que puede variar según la composición de la mezcla.

Entonces, teniendo en cuenta la Tabla 8, con respecto a la relación de cada macronutriente con la producción de metano, se genera la proporción de metano de acuerdo con la cantidad de RSO que se produce en un día los habitantes Bucaramanga, entonces, para los 80.338 kg de proteína se genera 30.173 kg de metano, para los 80.337 kg de lípidos se obtiene 56.889 kg de

metano y, por último, los 241.011 kg de carbohidratos se resultan 71.540 kg de metano. Estos resultados salieron de la siguiente manera:

- Primero se multiplico la producción per cápita de los residuos generados en Bucaramanga, por el número de habitantes, para hallar los residuos producidos en un día, es decir,

$$0,87 \frac{kg}{Hab\ día} \times 607.511 = 528.534\ kg$$

- Después, la producción se multiplica por el 76% que serían los RSO de todos los residuos generados,

$$528.534\ kg \times 0,76 = 401.686\ kg\ RSO$$

- Ahora, el total de RSO se fracciona de la siguiente manera, 20% para proteínas, 20% para lípidos y 60% para carbohidratos,

$$Proteinas = 401.686 \times 0.20 = 80.337\ kg$$

$$Lipidos = 401.686 \times 0.20 = 80.337\ kg$$

$$Carbohidratos = 401.686 \times 0.60 = 241.011\ kg$$

- Según la relación de macronutriente de la Tabla 8, y sabiendo que,

$$Mol\ Carbohidrato\ (C_6H_{10}O_5) = 162,141 \frac{g}{mol}$$

$$Mol\ Proteina\ (C_{16}H_{24}O_5N_4) = 352,391 \frac{g}{mol}$$

$$Mol\ Lipido\ (C_{50}H_{90}O_6) = \frac{787,264g}{mol}$$

$$Mol\ Metano\ (CH_4) = 16,043 \frac{g}{mol}$$

- Se puede hacer una relación entre el peso obtenido de la generación y el peso de las reacciones, es decir,

Para los carbohidratos, quedaría

$$\frac{162,141g}{mol} \rightarrow \frac{3(16,043)g}{mol}$$

$$241.011.000g \rightarrow x$$

$$x = \frac{3(16,043) \times 241.011.000}{162,141} = 71.540.316 \text{ g metano}$$

Para los lípidos, quedaría

$$\frac{787,264g}{mol} \rightarrow \frac{34,75(16,043)g}{mol}$$

$$80.337.000g \rightarrow x$$

$$x = \frac{34,75(16,043) \times 80.337.000}{787,264} = 56.889.957 \text{ g metano}$$

Para las proteínas, quedaría

$$\frac{352,391g}{mol} \rightarrow \frac{8,25(16,043)g}{mol}$$

$$80.337.000g \rightarrow x$$

$$x = \frac{8,25(16,043) \times 80.337.000}{352,391} = 30.173.822 \text{ g metano}$$

Y teniendo en cuenta que el litro de metano es equivalente a 465 gramos, se puede obtener los resultados de metano en litros.

6.4.2 Viabilidad de la digestión anaeróbica con residuos alimentarios en Bucaramanga

El panorama de Bucaramanga está valorando alternativas para el aprovechamiento de los RSO puesto que no está reflejada ninguna opción en el PGIRS 2022-2033, ahora, la implementación y la aceptación del uso de la digestión anaeróbica puede llegar a verse como una opción viable, al comienzo puede verse como una ayuda en las zonas rurales y después mirar cómo se implementa a nivel industrial.

Además, se puede brindar aprovechamiento a esos residuos que no se están valorando, y con las cantidades generadas diariamente, significaría un potencial energético para tener en cuenta para seguir implementando energías renovables. En tema de costos e inversión, esta técnica a nivel industrial puede llegar a costar aproximadamente treinta millones de pesos colombianos y esto sin contar la mano de obra (Baquero Cadena y Murillo Malpica, 2019), claro está que, si se hace a prueba piloto, los costos serán inferiores, eso quiere decir que, los costos van ligados a las dimensiones que tenga el digestor.

7. Conclusiones

La ecuación de búsqueda utilizada en Scopus resultó efectiva para la búsqueda de estudios acerca de la digestión anaeróbica con los residuos alimentarios, los cuales pueden ser de referencia para nuevos estudios e implementación de la técnica.

Los parámetros fisicoquímicos son vitales para la ejecución de la técnica, ya que, son la base que definen el rendimiento de la producción de metano, en especial el incremento de amónico, la relación de C/N, la temperatura y el pH.

El potencial teórico del metano es destacable usando los residuos alimentarios, lo cual es una alternativa destacable para la energía renovable, es decir, puede ser aprovechado para generar biogás, sin embargo, se debería hacer un estudio previo con los sustratos que se van a usar y las dimensiones del biodigestor, para tener en cuenta la rentabilidad de la implementación.

En Bucaramanga y su área metropolitana podría utilizar la digestión anaeróbica, empezando por las universidades que pueden usar pruebas piloto e ir aumentando las dimensiones, a pare pueden usar los residuos alimentarios que se generan en la cafetería de estas.

8. Recomendaciones

En este estudio solo se abarcaron estudios con residuos alimentarios, pero no se tuvo en cuenta el codigestión, sería buena opción seguir avanzando los estudios por ese lado, también, observar los residuos poscocción o posconsumo puesto que los estudios homogenizan la mezcla siendo un conjunto de RSO.

Referencias

- Acosta Pabuenta, M., y Pasqualino, J. (2014). Potencial de Uso de Biogás en Colombia. *TEKNOS*, 27–33.
- Alcaldía de Bucaramanga. (2022). *PGIRS 2022-2033*. Alcaldía de Bucaramanga. <https://www.bucaramanga.gov.co>
- Alexis, P.-O. B., Patricia, T.-L., Fernando, M.-R. L., Marcela, C.-C. L., Carlos, V.-F., Alexander, T.-L. W., & Abdón, O.-A. J. (2015). Efecto de la relación sustrato-inóculo sobre el potencial bioquímico de metano de biorresiduos de origen municipal. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(4), 515–526. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.09.004>
- Baquero Cadena, L. R., y Murillo Malpica, C. M. (2019). *Evaluación de la producción de biogás mediante digestión anaerobia a partir de lodos residuales de la PTAR villas del nuevo siglo, en la mesa - Cundinamarca*. Universidad de América.
- BERRELLEZA ROBLES, L. G. (2014). Biometanización de residuos sólidos orgánicos. *Universidad de Sonora*. <http://repositorioinstitucional.uson.mx/handle/20.500.12984/2318>
- Bhat, R. (2017). *Sustainability Challenges in the Agrofood Sector*. John Wiley & Sons, Incorporated. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecausta-ebooks/detail.action?docID=4816180>
- Braguglia, C. M., Gallipoli, A., Gianico, A., y Pagliaccia, P. (2018). Anaerobic bioconversion of food waste into energy: A critical review. In *Bioresource Technology* (Vol. 248, pp. 37–56). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.145>
- Browne, J. D., y Murphy, J. D. (2013). Assessment of the resource associated with biomethane from food waste. *Applied Energy*, 104, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.017>

- Cabrita, T., Santos, M., y Barreiros, A. (2016). Biochemical methane potential applied to solid wastes – review. *Instituto Politécnico de Lisboa*. https://www.researchgate.net/profile/Ana-Barreiros-2/publication/309781207_Biochemical_methane_potential_applied_to_solid_wastes_-_review/links/637f55f048124c2bc66436f7/Biochemical-methane-potential-applied-to-solid-wastes-review.pdf
- Camps Michelen, M. (2008). *Los biocombustibles (2a. ed.)*. Mundi-Prensa. <https://elibro.net/es/lc/usta/titulos/35849>
- Cárdenas Rincón, K. M., y Zapata Villareal, A. F. (2016). *Enseñanza de las reacciones químicas mediante una alternativa renovable que fomente la cultura científica y ambiental*. Universidad Pedagógica Nacional.
- Chávez Porras, Á., y Rodríguez González, A. (2016). Aprovechamiento de residuos orgánicos agrícolas y forestales en Iberoamérica. *Academia y Virtualidad*, 9(2), 90–107. <https://doi.org/10.18359/ravi.2004>
- García García, A. (2021). *Co-Digestión Anaerobia de Lodos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales para Producir Biogás*. Universidad César Vallejo.
- González-Sánchez, M. E., Pérez-Fabiel, S., Wong-Villarreal, A., Bello-Mendoza, R., y Yáñez-Ocampo, G. (2015). Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia. *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3), 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>
- Hagos, K., Zong, J., Li, D., Liu, C., y Lu, X. (2017). Anaerobic co-digestion process for biogas production: Progress, challenges and perspectives. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 76, pp. 1485–1496). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.184>

- Kosseva, M., Webb, C., Kosseva, M., y Webb, C. (2013). *Food Industry Wastes: Assessment and Recuperation of Commodities*. Elsevier Science & Technology. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecausta-ebooks/detail.action?docID=1135741>
- Liu, Y., Lv, Y., Cheng, H., Zou, L., Li, Y. Y., y Liu, J. (2022). High-efficiency anaerobic co-digestion of food waste and mature leachate using expanded granular sludge blanket reactor. *Bioresource Technology*, 362. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.127847>
- Lora Grando, R., de Souza Antune, A. M., da Fonseca, F. V., Sánchez, A., Barrena, R., y Font, X. (2017). Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 80, pp. 44–53). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.079>
- Lorenzo Acosta, Y., y Obaya Abreu, M. C. (2005). La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I. *ICIDCA. Sobre Los Derivados de La Caña de Azúcar*, XXXIX, 35–48. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659006>
- Matheri, A. N., Ndiweni, S. N., Belaid, M., Muzenda, E., y Hubert, R. (2017). Optimising biogas production from anaerobic co-digestion of chicken manure and organic fraction of municipal solid waste. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 80, pp. 756–764). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.068>
- Matheri, A. N., Ntuli, F., Ngila, J. C., Seodigeng, T., Zvinowanda, C., y Njenga, C. K. (2018). Quantitative characterization of carbonaceous and lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 92, pp. 9–16). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.070>

- Moo Tadeo, J. B. (2018). Construcción de un prototipo de biodigestión anaerobia, para residuos alimenticios y estiércol de cerdo. *Exploraciones, Intercambios y Relaciones Entre El Diseño y La Tecnología*, 57–79. <https://doi.org/10.16/CSS/JQUERY.DATATABLES.MIN.CSS>
- Morales Polo, C. (2019). Co-digestión anaerobia y pretratamientos de residuos agroalimentarios con fangos UASB de depuradora. Caracterización BMP y análisis. *Universidad Pontificia Comillas*. <https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/37357>
- Naciones Unidas. (2020a). *Cambio climático - Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/>
- Naciones Unidas. (2020b). *Energía - Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Naciones Unidas. (2020c). *Portada - Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Ochoa, C., Hernández, M. A., Bayona, O. L., Cabeza, I. O., & Candela, A. M. (2021). Value-Added By-Products During Dark Fermentation of Agro-Industrial Residual Biomass: Metabolic Pathway Analysis. *Waste and Biomass Valorization*, 12(11), 5937–5948. <https://doi.org/10.1007/s12649-021-01421-1>
- Office, I. L. (2013). *El desarrollo sostenible, el trabajo decente y los empleos verdes*. International Labour Office. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecausta-ebooks/detail.action?docID=1318463>
- Pacheco Floreza, M., y Melo Poveda, Y. E. (2015). Recursos naturales y energía. Antecedentes históricos y su papel en la evolución de la sociedad y la teoría económica. *Energética*, 45, 107–105.

- Parada Parada, D. Y. (2016). *Evaluación del potencial de hidrógeno a partir de biomasa residual presente en Santander mediante procesos de codigestión anaerobia – estudio de caso*. Universidad Santo Tomás.
- Parra Huertas, R. A. (2015). Digestión anaeróbica: mecanismos biotecnológicos en el tratamiento de aguas residuales y su aplicación en la industria alimentaria. *Producción + Limpia*, 10(2), 142–159.
- Pérez Pariente, J. (2016). *Biocombustibles*. FCE - Fondo de Cultura Económica. <https://elibro.net/es/lc/usta/titulos/110626>
- Raposo, F., de La Rubia, M. A., Fernández-Cegri, V., y Borja, R. (2012). Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 16, Issue 1, pp. 861–877). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.008>
- Reyes Aguilera, A. E. (2017). Generación de biogás mediante el proceso de digestión anaerobia, a partir del aprovechamiento de sustratos orgánicos. *FAREM-Estelí*.
- Rincón-Velásquez, N. Y., y Castiblanco-Rozo, C. (2021). Políticas y normas sobre energías renovables para el desarrollo de biogás en Colombia. Una revisión. *Gestión y Ambiente*, 24(1), 98868. <https://doi.org/10.15446/ga.v24n1.98868>
- Salgado Hernández, E. (2019). Mejoramiento de la etapa de hidrólisis de los Residuos Sólidos Orgánicos Municipales (RSOM) mediante pretratamiento ácido, en la producción de bioenergéticos a nivel piloto. *Tecnológico Nacional de México*. <http://repositorios.orizaba.tecnm.mx:8080/xmlui/handle/123456789/289>
- SEGURA, Á. M., ROJAS, L. A., y PULIDO, Y. A. (2020). Referentes mundiales en sistemas de gestión de residuos sólidos. *ESPACIOS*, 14, 22.

Shanghai Jiao Tong University. (2022). *Información general*.

https://en.sjtu.edu.cn/about/general_information

Shen, F., Yuan, H., Pang, Y., Chen, S., Zhu, B., Zou, D., Liu, Y., Ma, J., Yu, L., & Li, X. (2013).

Performances of anaerobic co-digestion of fruit & vegetable waste (FVW) and food waste (FW): Single-phase vs. two-phase. *Bioresource Technology*, 144, 80–85.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.06.099>

Simbaqueva Aguilera, A. M., y Urrego León, M. A. (2019). *Evaluación de la producción de metano en la digestión anaerobia de la especie invasora retamo espinoso y el residuo agrícola rastrojo de maíz mediante el uso de un biorreactor batch*. Universidad El bosque.

Sohoo, I., Ritzkowski, M., Heerenklage, J., y Kuchta, K. (2021). Biochemical methane potential assessment of municipal solid waste generated in Asian cities: A case study of Karachi, Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110175>

Tohoku University. (2022). *Facultades, Escuelas de Posgrado e Institutos*.

http://www.tohoku.ac.jp/en/about/fact_figures.html

Tsinghua University. (2022). *Información general*.

https://www.tsinghua.edu.cn/en/About/General_Information.htm

Tyagi, V. K., Aboudi, K., y Eskicioglu, C. (2022). *Anaerobic Digestate Management*. IWA Publishing.

<http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecausta-ebooks/detail.action?docID=7048939>

Urrea Arboleda, V. (2019). Determinación del potencial bioquímico de metano de residuos cítricos mediante digestión anaerobia. *Universidad Católica de Manizales*.

<https://repositorio.ucm.edu.co/jspui/handle/10839/2501>

- Vega Martínez, D. J., y Silva Ariza, F. L. (2020). *Estudio para la producción de biogás a partir de residuos orgánicos de búfalo mediante la biodigestión en el municipio de Rionegro, Santander*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA (UNAB).
- Wang, L. (2014). *Sustainable Bioenergy Production*. Taylor y Francis Group.
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecausta-ebooks/detail.action?docID=1575741>
- Wang, P., Wang, H., Qiu, Y., Ren, L., y Jiang, B. (2018). Microbial characteristics in anaerobic digestion process of food waste for methane production—A review. In *Bioresource Technology* (Vol. 248, pp. 29–36). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.152>
- Zhang, L., y Jahng, D. (2012). Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements. *Waste Management*, 32(8), 1509–1515.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.015>