



Artigo de Revisão

e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v15n12021p36-51

Submetido em: 20 nov. 2020

Aceito em: 16 jun. 2021

*Uso de digestores anaeróbicos de pequena escala como solución ambiental y energética*

**Letícia Ribeiro Machado**  <https://orcid.org/0000-0002-3053-800X>

Tiene una Maestría Profesional en Ingeniería Ambiental del Instituto Federal Fluminense (IFF) (2019). Trabaja en la Secretaría Municipal de Desarrollo Ambiental de Campos dos Goytacazes - Brasil. E-mail: leticiaribeiromachado0@gmail.com

**Adriano Henrique Ferrarez**  <https://orcid.org/0000-0003-3771-9564>

Doctor en Ingeniería Agrícola de la Universidad Federal de Viçosa. Doctor por la Universidad de Valladolid – España. Profesor en el Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología Fluminense (IFFluminense), Campus Itaperuna / RJ. Profesor titular del Doctorado Profesional en Modelización y Tecnología para el Medio Ambiente Aplicado a los Recursos Hídricos (AmbHidro) de IFFluminense y profesor colaborador de la Maestría Profesional de Ingeniería Ambiental en IFFluminense - Brasil. E-mail: adrianoherrarez@gmail.com

**Edwin Alfonso Zelaya-Benavidez**  <https://orcid.org/0000-0003-2043-7747>

Maestro en Ciencias en Estrategias para el Desarrollo Agrícola Regional por el Colegio de Postgraduados, campus Puebla, México. Estudiante de Doctorado en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de Recursos Naturales en el Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional del Instituto Politécnico Nacional (CIIDIR IPN), Oaxaca, México. E-mail: edwinzelayab@gmail.com

**Jader Lugon Junior**  <https://orcid.org/0000-0001-8030-0713>

Postdoctoral en Modelado Computacional en el Instituto Politécnico de la Universidad Estatal de Río de Janeiro. Trabaja en el Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) como Coordinador del Doctorado Profesional en Modelización y Tecnología para el Medio Ambiente Aplicado a los Recursos Hídricos, como Profesor en el Máster Profesional en Ingeniería Ambiental - Campos dos Goytacazes - Brasil. E-mail: jlugonjr@gmail.com

**Fernando César Alves**  <https://orcid.org/0000-0002-7561-9233>

Ingeniería de Control y Automatización en el Instituto Federal Fluminense - Campos dos Goytacazes - Brasil. E-mail: fernandocalvesiff@gmail.com

Resumen: La energía juega un papel central en el desarrollo de la sociedad y la búsqueda de fuentes renovables y sostenibles aumenta cada día. La digestión anaeróbica es una tecnología que permiten producir energía limpia a partir de residuos orgánicos mejorando la calidad medio ambiental y de vida de la población. El objetivo de este trabajo fue evaluar la publicación de artículos científicos sobre digestión anaeróbica a pequeña escala. Se realizó una búsqueda de trabajos científicos en bases de datos como Scielo, Scopus, Science Direct y Google Scholar, con base en las palabras clave: small scale anaerobic digestion, biogas, small scale biodigester, small scale anaerobic codigestion e renewable energy. Se evaluaron veinte artículos científicos publicados entre 2008 y 2019 en nueve revistas diferentes, con énfasis en la revista Renewable Energy. En relación con los países donde se desarrollaron los estudios, Bolivia, Costa Rica, China y Colombia se destacaron. Es importante señalar la necesidad de realizar más trabajos científicos con el objetivo de difundir y popularizar el conocimiento sobre la tecnología de la digestión anaeróbica de pequeña escalas, principalmente en los países em desarrollo.

Palabras clave: Digestión anaeróbica. Energías renovables. Biogás.

## *Uso de digestores anaeróbicos de pequena escala como solução ambiental e energética*

Resumo: A energia desempenha um papel central no desenvolvimento da sociedade e a busca por fontes renováveis e sustentáveis aumenta a cada dia. A digestão anaeróbica é uma tecnologia que permite produzir energia limpa a partir de resíduos orgânicos, melhorando o meio ambiente e a qualidade de vida da população. O objetivo deste trabalho foi avaliar a publicação de artigos científicos sobre digestão anaeróbica em pequena escala. A busca de artigos científicos foi realizada em bases de dados como Scielo, Scopus, Science Direct e Google Scholar, com base nas palavras-chave: small scale anaerobic digestion, biogas, small scale biodigestor, small scale anaerobic codigestion e renewable energy. Foram avaliados 20 artigos científicos publicados entre 2008 e 2019 em nove periódicos diferentes, com destaque para o periódico Renewable Energy. Em relação aos países onde os estudos foram realizados, Bolívia, Costa Rica, China e Colômbia se destacaram. É importante ressaltar a necessidade de realização de mais trabalhos científicos com o objetivo de disseminar e popularizar o conhecimento sobre a tecnologia da digestão anaeróbica de pequena escala, principalmente nos países em desenvolvimento.

Palavras-chave: Digestão anaeróbica. Energias renováveis. Biogás.

## *Use of small-scale anaerobic digestors as an environmental and energetic solution*

Abstract: Energy plays a central role in society's development, and the search for renewable and sustainable sources is increasing every day. Anaerobic digestion is a technology that allows the production of clean energy from organic waste, improving the environment and the quality of life of the population. This work's objective was to evaluate the publication of scientific articles on a small scale anaerobic digestion. The search for scientific articles uses databases such as Scielo, Scopus, Science Direct, and Google Scholar, based on the keywords: small scale anaerobic digestion, biogas, small scale digestor, small scale anaerobic co-digestion, and renewable energy. Twenty scientific articles published between 2008 and 2019 were evaluated in nine different journals, emphasizing the journal Renewable Energy. Concerning the countries where the studies, Bolivia, Costa Rica, China, and Colombia stood out. It is essential to emphasize the need to carry out more scientific work to disseminate and popularize knowledge about small-scale anaerobic digestion technology, especially in developing countries.

Keywords: Anaerobic digestion. Renewable energies. Biogas.

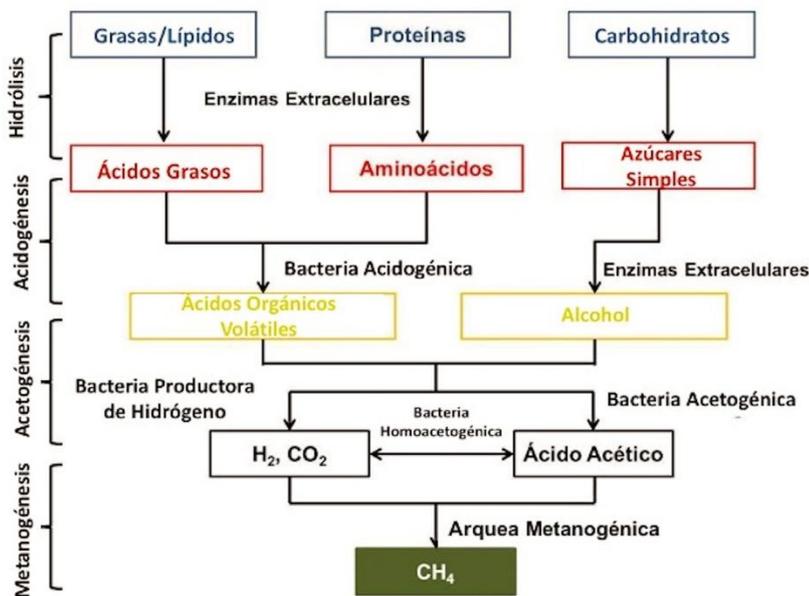
### ***1 Introdução***

El papel central de la energía es promover el desarrollo de todos los aspectos intrínsecos de la sociedad: económicos, políticos y ambientales, relacionados con el acceso al saneamiento, el agua, la alimentación, la salud y la educación, en resumen, que mejoren la calidad de vida de los seres humanos (AMIGUN et al., 2012). Por lo tanto, las preocupaciones sobre las nuevas fuentes de energía son cada vez más evidentes en los muchos acuerdos y esfuerzos para reducir la dependencia de los combustibles fósiles, la emisión de gases de efecto invernadero y promover la eficiencia energética. El biogás, el bioetanol y el biodiesel son ejemplos de biocombustibles, un tipo de energía de la biomasa (ADELEKAN, 2012).

La digestión anaeróbica se conoce como un proceso de bioconversión, en el cual los desechos o efluentes se transforman en biogás y biofertilizante a través de la acción biológica de varios microorganismos en ausencia de oxígeno. El uso y el desarrollo de sistemas de bajo costo, con materiales resistentes y efectivos, agregan una mayor sostenibilidad; además de ser una alternativa para gestionar los desechos de los más variados tipos y grados de contaminación en pequeñas propiedades (DEL REAL OLVERA Y LÓPEZ-LÓPEZ, 2012). Según Rohstoffe (2010), muchos sustratos se pueden utilizar como biomasa para el proceso de digestión anaeróbica, como los desechos animales (bovinos, porcinos, aves y otros), ensilaje de residuos agrícolas (como el ensilaje de maíz y otros), efluentes y residuos agroindustriales (como suero, vinaza, aguas residuales de producción y otros) y residuos verdes y pasto (como ramas y podas).

La formación de biogás ocurre en fases. La primera fase es la hidrólisis en la que actúan las bacterias hidrolíticas que transforman compuestos orgánicos complejos, como carbohidratos y proteínas, en compuestos simples, como azúcares y aminoácidos. En la siguiente fase, la acidogénesis, las bacterias acidogénicas actúan formando alcoholes, ácido láctico y ácidos grasos de cadena corta. La acetogénesis comienza después de la acidogénesis, formando ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono. La última etapa es la formación de metano (CH<sub>4</sub>) por la acción de arqueas metanogénicas, que son organismos estrictamente anaeróbicos (SALMINEN & RINTALA, 2002). La Figura 1 resume las fases de la digestión anaeróbica.

**Figura 1. Esquema de digestión anaeróbica**



Fuente: Adaptado de (FERRAREZ et al., 2020)

Este proceso ocurre de manera controlada en digestores, cámaras herméticas que realizan la fermentación anaeróbica de la materia orgánica, la elección adecuada del biodigestor es fundamental para el correcto desarrollo del proceso, ya que está directamente relacionado con la producción de biogás (STEINSBERGER e SHIH,1984). Entre los principales modelos de digestores de pequeña escala están: tubular, Chino e Indio.

### 1.1 Modelo Tubular

Este modelo de digestor está montado horizontalmente y tiene una cúpula de plástico, generalmente hecha de material de PVC, que se llena cuando la mezcla de gases lo alcanza. Tiene la ventaja de una gran exposición a la luz solar, lo que provoca una mayor producción de biogás debido al calentamiento. Otras

ventajas son: (i) bajo costo de instalación; (ii) flexibilidad para colocarse en la superficie o bajo tierra; (iii) fácil conservación y limpieza. Como desventajas se pueden enumerar: (i) vida útil corta (5 años); (ii) mantenimiento constante; y (iii) sensibilidad a los cambios de temperatura (TEPERINO et al., 2017).

## 1.2 Modelo Chino

El digestor modelo chino tiene una alimentación de sustrato semicontinua y su reactor de fermentación se encuentra bajo tierra para minimizar las variaciones de temperatura. Este modelo tiene forma de cúpula y funciona con los principios de la prensa hidráulica, es decir, cuanto más gas se produce, mayor es la presión dentro del digestor, lo que hace que los desechos sean empujados hacia el área de salida. Está construido en albañilería con una cámara de fermentación abovedada e impermeable para almacenar el biogás producido. Entre las desventajas del modelo chino está el hecho de que debido a problemas en la construcción de mampostería y la gran variación de presión dentro del digestor, pueden ocurrir fugas (TEPERINO et al., 2017).

## 1.3 Modelo Indio

El modelo indio tiene una campánula de metal para almacenar el gas producido, esta campánula flota sobre los desechos usados o sobre un sello de agua. Esta parte del sistema puede estar debajo del sustrato o sumergida en una capa de agua para reducir las pérdidas por fugas. Este tipo de biodigestor funciona con presión constante porque el gasómetro se mueve cuando recibe el biogás producido y requiere alimentación continua. Entre las desventajas de este modelo están el costo de construcción del digestor y la corta vida útil debido a la corrosión del gasómetro de metal (TEPERINO et al., 2017).

Hay la necesidad, principalmente en los países en desarrollo, de elevar las condiciones de vida de su población a niveles adecuados, lo que requiere un aumento significativo en el consumo de energía. Es esencial que se desarrollen tecnologías para lograr este objetivo. El uso energético de residuos orgánicos a través de la digestión anaeróbica es un desafío en este sentido.

En vista de la Agenda 2030, establecida en 2015 por varios líderes mundiales, reunidos en las Naciones Unidas (ONU), que comprende 17 objetivos para lograr el desarrollo sostenible, incluida la erradicación de la pobreza, la agricultura sostenible y el acceso a la energía limpia, se intensificaron las alianzas para promover la cooperación técnica entre países para lograr estos objetivos.

El objetivo de este artículo fue evaluar trabajos publicados en revistas científicas sobre digestión anaeróbica a pequeña escala. Se realizó una revisión de la literatura que dio como resultado datos bibliométricos, que según Mugnaini et. al. (2004), son valores estadísticos, medidos cuantitativamente, basados en la producción científica.

## **2 Material e Método**

El método utilizado en este trabajo fue la encuesta bibliográfica, basada en artículos científicos publicados en revistas internacionales indexadas. Se generaron datos bibliométricos cuantitativos para caracterizar las referencias bibliográficas utilizadas teniendo en cuenta el año, el nombre de la revista y el país en el que se realizó el trabajo.

Las bases de datos consideradas para la búsqueda de artículos fueron Scielo, Scopus, Portal de revistas CAPES, Science Direct y Google Scholar, basadas en las palabras clave: *small scale anaerobic digestion*, *biogas*, *small scale biodigestor*, *small scale anaerobic codigestion e renewable energy*.

## **3 Resultados**

### **3.1 Digestión anaeróbica a pequeña escala**

Lansing et al. (2008) evaluaron la capacidad de siete digestores de pequeña escala para producir niveles considerables de metano al tratar las aguas residuales de cerdos en pequeñas propiedades rurales en Costa Rica. La TRH varió de 11 a 91 días. La eficiencia promedio en la tasa de eliminación de DQO fue 84,1%, de 2970 mg L<sup>-1</sup> a 472 mg L<sup>-1</sup>, y la DBO5 fue 79,4%. La concentración promedio de nitrógeno Kjeldahl total disminuyó de 306 mg L<sup>-1</sup> a 166 mg L<sup>-1</sup>. El pH promedio disminuyó de 7,34 a 6,64. La concentración promedio de metano fue del 66,3% y el sulfuro de hidrógeno fue inferior a 100 ppm. Los análisis estadísticos (MANOVA y ANOVA) revelaron diferencias significativas entre los datos de afluentes y efluentes de los siete digestores; es decir, señalaron que los digestores a pequeña escala eran eficientes en el tratamiento de residuos y la producción de biogás.

Lansing et al. (2010) evaluaron el proceso de codigestión del estiércol porcino con aceite de cocina usado, utilizando 12 digestores de bajo costo de 200 L de capacidad en una granja en Costa Rica, en condiciones climáticas tropicales/subtropicales con cuatro proporciones de mezcla: T<sub>0</sub>, solo estiércol, T<sub>2,5</sub>, T<sub>5</sub> y T<sub>10</sub>, con 2,5%, 5% y 10% de aceite de cocina, respectivamente, todo por triplicado. Encontraron que para un pequeño aumento de grasa, es decir, en T<sub>2,5</sub>, hubo un aumento de 113% en materia orgánica y 124% en la producción de metano. En otras proporciones, hubo una disminución en la producción de metano y el pH. En general, señalaron que este proceso puede ser utilizado por pequeños y medianos productores, aumentando los ingresos y disminuyendo los costos de energía.

Rajendran et al. (2013) verificaron la viabilidad técnica y económica de un nuevo digestor con estructura textil para digerir los desechos orgánicos urbanos, comparándolo con los combustibles que se usan generalmente en la cocina en los países menos desarrollados: GLP y queroseno. Se llevaron a cabo dos experimentos semicontinuos, el primero alimentado con un sustrato sintético (ácido acético, ácido propiónico

y ácido butírico en la proporción 3:1:1), y el segundo con la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. La acumulación de ácidos grasos volátiles fue inferior a  $2 \text{ g.L}^{-1}$ , y la composición del biogás fue de 76% de metano. La cantidad de biogás requerida para un día de cocción fue de  $0,21 \text{ m}^3$  por persona, es decir,  $19 \text{ m}^3.\text{mes}^{-1}$  para una familia de 3 personas. La cantidad de biogás producido a partir del digestor de  $1,5 \text{ m}^3$  fue de  $26 \text{ m}^3$  de biogás por mes. En términos de combustibles fósiles, una familia de 3 a 4 personas necesita 13 kg de GLP por mes o 17,5 L de queroseno por mes. Considerando los costos operativos, los gastos mensuales con biogás serían de US \$ 10 con biogás, de US \$ 71 con GLP y de 49 dólares con queroseno, ambos con subsidios. Los gastos de GLP y queroseno son 85,9% y 79,5% más altos que para el biogás, respectivamente.

Cheng et al. (2013) realizaron una encuesta sobre el uso de digestores de biogás prefabricados (PBD), sus ventajas y desventajas. La historia comercial de estos digestores comenzó en la década de 2000 y se clasificó en: (i) digestores de plástico reforzado con fibra de vidrio (FRP), (ii) digestores de plástico (PS) y (iii) digestores de plástico rígido (PH). Alrededor de 200.000 digestores de FRP se instalaron en China entre 2000 y 2010, con un rango de  $2,5$  a  $10 \text{ m}^3$ , pero los más comunes son  $4$ ,  $6$  y  $8 \text{ m}^3$ . El modelo de digestor de FRP más extendido se asemeja a un "hervidor", con materia prima de poliéster insaturado, resina recubierta de gel, alfombra de cordón cortado y tela de fibra de vidrio de alta calidad. En general, encontraron un aumento en los PBD en China, pero hay muchas limitaciones para este sistema, como la falta de estandarización y proyectos de demostración, que requieren la implementación de una política para aprovechar este reciente sector industrial chino.

Pérez et al. (2014) compararon el desempeño, el costo y el impacto ambiental de dos tipos de digestores, el domo fijo y el tubular en las regiones rurales del altiplano andino. Bajo el ciclo de vida de los digestores, se observó que durante una vida útil de 20 años, el costo fue 12% menor para el digestor tubular de plástico en comparación con el digestor de cúpula fija. Además, el costo de inversión inicial del digestor tubular fue 3 veces menor que el del digestor de domo fijo. El digestor tubular tenía la ventaja de bajo costo y fácil manejo y operación; sin embargo, su ciclo de vida fue menos beneficioso para el medio ambiente debido a la corta vida útil de los materiales que lo componen, como las geomembranas y el plástico.

Por su parte, Martí-Herrero et al. (2014) documentaron las experiencias de EnDev-Bolivia, un programa formado por un consorcio internacional con el objetivo de promover y ayudar a los pequeños agricultores bolivianos que sufren de pobreza energética, abordando lecciones económicas, técnicas y socioculturales. El trabajo se realizó durante 4,5 años y se encuestó a tres tipos de escalas de uso del digestor: (i) 740 digestores domésticos, (ii) 5 para centros comunitarios y (iii) 2 para escuelas, con un total de 747. La mayoría de estos digestores, el 48,6% del total, se instalaron en regiones de valles, donde predominan temperaturas cálidas, generalmente con altos niveles de pobreza. En estos lugares, el sustrato con mayor uso en digestores fue el estiércol de ganado. A pesar de la corta vida útil, los digestores tubulares han ganado fuerza debido al bajo costo de implementación en los lugares más desfavorecidos, sirviendo a los pequeños

agricultores con pocos recursos; sin embargo, la efectividad y la influencia del gobierno sobre la disponibilidad de la subvención para ellos es importante.

Cheng et al. (2014) realizaron una encuesta sobre los beneficios de implantar digestores de biogás prefabricados (PBD) para uso a pequeña escala en países en desarrollo, y observaron que eran una tecnología apropiada para ellos porque son de bajo costo, buena durabilidad, alto aislamiento y resistencia a la corrosión, optimizando la producción y el transporte en relación con los digestores convencionales, que se construyen en el sitio, con desventajas relacionadas con la durabilidad de los materiales y la dificultad en la logística porque están hechos de materiales pesados. A pesar de las grandes ventajas, los PBD presentaron desafíos importantes, como la falta de estandarización, la falta de seguimiento y problemas de servicio, limitaciones en la conciencia pública de estos digestores y otros, lo que resultó en problemas importantes que deben superarse.

Martí-Herrero et al. (2015) analizaron el comportamiento del usuario en relación con los digestores tubulares y la influencia generada en varias familias bolivianas. Se utilizaron 15 digestores tubulares de bajo costo, 6 en los valles andinos y 6 en las tierras altas, para recopilar datos sobre la temperatura del sustrato, la materia prima y la calidad del biogás. Los otros tres digestores se instalaron en la región del valle para medir la producción diaria de biogás y el patrón de alimentación. Hubo una disminución en la producción específica de biogás con un aumento en la carga orgánica, pero con valores constantes para la tasa de producción de biogás, alrededor de 0,08 a 0,09 m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup> con el rango de carga orgánica entre 0,18 a 0,52 kg.m<sup>-3</sup>día<sup>-1</sup>, en condiciones normales de temperatura y presión. En cuanto al uso de los subproductos generados, las familias estudiadas en este trabajo utilizaron poca energía, y muchos continúan usando madera y estiércol seco combinados con GLP en sus actividades, como cocinar, principalmente debido a que reciben subsidios gubernamentales en relación con el GLP, por lo que hubo un mayor enfoque en el uso agronómico que energético de las familias entrevistadas.

Sovacool et al. (2015) investigaron los beneficios y desafíos del programa de desarrollo agrícola (FIDA) en asociación con "Biogas International" en comunidades rurales en Kenia con la instalación del sistema flexible de biogás (FBS). Este sistema permitía a los usuarios ahorrar, en comparación con las fuentes tradicionales de biomasa, era posible ahorrar hasta \$ 17 por mes en combustibles tradicionales, como leña, carbón, aserrín, queroseno y GLP. Los ahorros generados resultaron en la compra de animales, la compra de libros y medicinas. En términos ambientales, según los datos de los entrevistados, un FBS puede reemplazar hasta 4,5 toneladas de madera anualmente, lo que equivale a aproximadamente 6,75 toneladas de CO<sub>2</sub> por año. A pesar de esto, los autores señalaron que el proyecto podría lograr resultados más expresivos en el país. La desconfianza de la población hacia la tecnología debido al fracaso de otras iniciativas para introducir biogás contribuyó a este hecho. Por lo tanto, mayores incentivos y esfuerzos políticos son fundamentales.

Kinyua et al. (2016) llevaron a cabo una revisión bibliográfica para abordar el uso del digestor tubular comúnmente utilizado en los países en desarrollo. Señaló 5 beneficios de su uso: (i) energía, debido a la generación de biogás (por ejemplo, Monteverde, Costa Rica, el biogás producido a través de los desechos de

2 a 4 cerdos fue suficiente para 3 a 4 horas de cocción para una familia de 4 a 5 personas, lo que ahorró alrededor de US\$ 20 al mes en comparación con otras familias que usaban propano para cocinar); (ii) agrícola, debido al efluente rico en nutrientes, con niveles de nitrógeno y fósforo fácilmente asimilables por los vegetales; (iii) ambiental al preservar los bosques que fueron explotados previamente para suministrar leña, además de reducir la contaminación de los recursos hídricos; (iv) en salud pública debido a la mejora en la calidad del aire con la combustión de biogás en comparación con la leña; y (v) social, ayudando a la igualdad de género, especialmente para mujeres y niños en países donde compraron leña. A pesar de todos estos beneficios, todavía hay muchas limitaciones, y por lo tanto, los programas de incentivos y subsidios del gobierno a favor de este sistema son de vital importancia para garantizar la continuidad de la implementación, uso y operación de los sistemas.

Así también, Garfí et al. (2016) realizaron una revisión bibliográfica con el objetivo de analizar el panorama de los digestores domésticos implementados en América Latina, incluidos los aspectos técnicos, ambientales, sociales y económicos. Los primeros digestores de este tipo aparecieron en las décadas de 1970 y 1980. En América Latina era factible utilizar biogás para cocinar y, en algunos casos, generar electricidad. En cuanto al uso de biofertilizantes, se necesitan más estudios para informar la aplicación en otros tipos de cultivos. Otro desafío observado fue el uso de biogás para el confort térmico en regiones frías. En América Latina, la barrera más importante son los altos costos de inversión. Desde el aspecto social, estos sistemas han mejorado la calidad de vida y la salud de las personas, sin embargo, las fallas podrían evitarse si hubiera un mayor control y capacitación de los usuarios en relación con esta tecnología, para que pudieran conocer los beneficios, limitaciones y seguridad de plantas de biogás, así como posibles correcciones de operación y mantenimiento para evitar abandonar el sistema.

Martí-Herrero et al. (2016) tenían como objetivo estandarizar los experimentos llevados a cabo en tres reactores de bajo costo alimentados con aguas residuales del matadero, en Bolivia. Los reactores se conectaron entre sí, de modo que el efluente de uno, por gravedad, ingresaba al otro, con una TRH de 8,3 días para cada uno. La producción de biogás se monitoreó cada 30 minutos, todos los días, de 6:00 a.m. a 7:00 p.m., así como la temperatura ambiente, la del sustrato dentro del reactor y en el tubo de biogás. La temperatura ambiente promedio fue de 295,15 K, la temperatura máxima fue de 305,15 K y la mínima de 288,65 K. Las temperaturas máximas para biogás fueron 313,25 K, 308,75 K y 308,35 K para el primer, segundo y tercer digestor, respectivamente. Para estandarizar estos datos y establecer los más precisos, el trabajo consideró tres situaciones de temperatura, con  $30 \text{ min}T_{\text{gas}}$ , en las que se obtuvo la temperatura del gas cada 30 minutos. Por lo tanto, señalaron que el caso ideal corresponde a  $30 \text{ min}T_{\text{gas}}$ , ya que las mediciones precisas de la producción de biogás y la temperatura del biogás están disponibles cada 30 min. Destacaron que no hay diferencia en usar la temperatura promedio del biogás o la temperatura ambiente, porque en ambos casos, el error generado en relación con el mejor de los casos fue totalmente aceptable.

Silva y Araújo (2016) realizaron un estudio en la región rural de la región semiárida brasileña. El objetivo era evaluar la viabilidad de implementar biodigestores en estas áreas. El biodigestor en cuestión era del tipo indio con flujo continuo. El sustrato utilizado fue estiércol de bovino, agregado con agua para homogeneizar el sustrato (20 kg de estiércol + 20 L de agua). Las ventajas de este proceso en la comunidad fueron: (i) reducción de la deforestación; (ii) destino correcto de los residuos; (iii) reutilización de materia orgánica; (iv) reducción de tareas domésticas; y (v) producción de biofertilizante. Las desventajas fueron: (i) asistencia técnica insuficiente; (ii) monitoreo de la producción de biogás; y (iii) falta de análisis de los subproductos generados. El uso de biogás generó ahorros de 600,00 reales por año para una familia de 4 personas con el reemplazo de GLP y leña que se utilizaron. En general, ésta tecnología condujo a mejoras sociales, ambientales y económicas; sin embargo, la falta de asistencia calificada y mantenimiento fue un problema grave detectado.

Castro et al. (2017) evaluaron el comportamiento de la digestión anaerobia del estiércol del ganado en un digestor tubular rural en condiciones realistas, en una granja en una región de difícil acceso de Colombia, con el posible uso de biogás para reemplazar otras fuentes de energía. Se construyó un digestor de polietileno de bajo costo con 1,3 m de diámetro, 7,5 m de longitud y 9,5 m<sup>3</sup> de volumen total. El volumen operativo fue de 7,1 m<sup>3</sup>, para una producción promedio de 51 kg de residuos.día<sup>-1</sup>. El tiempo de retención hidráulica, TRH, fue de 35 días con una temperatura que varía alrededor de 23 ±5 °C. Este proceso culminó en una tasa de eliminación del 76% de los sólidos volátiles, considerando una carga orgánica de 0,7 kg de SV.m<sup>-3</sup>.día<sup>-1</sup>. El pH tanto para el afluente como para el efluente fue de 7,47 ± 0.2. Las concentraciones de ácidos grasos volátiles estaban entre 1780 ± 102 y 660 ± 98 mg L<sup>-1</sup> en el afluente y el efluente, respectivamente. El potencial de biometano y el potencial de biometano residual fueron 0,16 y 0,04 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>.kg<sup>-1</sup> SV, respectivamente. La producción de biogás fue de 0,85 Nm<sup>3</sup> de biogás día<sup>-1</sup>, con un 65,6% de metano. En cuanto a las cuestiones energéticas y económicas, el biogás podría reemplazar el propano en un 80%, lo que es suficiente para satisfacer la demanda de cocina de 5 personas durante 5 horas todos los días.

Damrongsak et al. (2017) llevaron a cabo un estudio sobre la incorporación de biogás en casas de una aldea en Tailandia. Del número total de casas, el 19% se unió al programa de biogás. La capacidad total de biogás fue de 160 m<sup>3</sup>.día<sup>-1</sup>, suficiente para abastecer a 100 casas. Fue posible verificar la disminución en la emisión de gas metano a la atmósfera, así como la reducción de los gastos con GLP para cocinar, de 3 a 11 dólares por mes cuando se usa biogás regularmente. Las principales barreras encontradas se debieron a problemas técnicos. En resumen, debido al diseño, construcción y operación del sistema. La red de biogás y las estufas también fueron un desafío para las 50 casas. Los subsidios del gobierno fueron sustanciales para muchos que se unieron al programa, y se puede considerar una reducción en el tiempo de amortización de 11 a 5 años.

Wang et al. (2018) analizaron un sistema de digestión anaeróbica autoalimentado a pequeña escala, en el que se utilizaron tres modos para operar el sistema: (i) sistema base de digestión anaerobia; (ii) unidad de

pretratamiento térmico; y (iii) unidad de recuperación de calor residual. La materia seca varió de 4 a 10% y la temperatura de psicrófila a termofílica. El reactor utilizado era del tipo de tanque agitado continuo (CSTR) y el sustrato era estiércol porcino. La evaluación energética de este sistema tenía tres índices: (i) Tasa neta de producción de energía; (ii) tasa de eficiencia energética y (iii) producción neta de energía. La producción neta máxima de biogás ocurre a aproximadamente 25 °C bajo concentraciones más bajas de materia seca y aproximadamente 50 °C bajo concentraciones más altas.

Garfí et al. (2019) evaluaron el uso de digestores tubulares a pequeña escala en dos granjas en Colombia, una en la región del Caribe (condiciones mesofílicas) y otra en la región andina (condiciones psicrófilas). Consideraron: (i) el escenario anterior, sin el uso del digestor, con el uso de la pocilga y el GLP para cocinar en la granja del Caribe; (ii) escenario con el digestor, utilizando biogás y biofertilizante en la granja del Caribe; (iii) escenario anterior, sin el uso de un digestor, con el uso de la pocilga y el GLP para cocinar en la granja andina; (iv) escenario con el digestor, utilizando biogás y biofertilizante en la granja andina. Los resultados mostraron una reducción de hasta un 80% en los gastos con GLP y fertilizantes sintéticos, en los cuales estas plantas pueden ser un aliado para el desarrollo y la mejora de las comunidades rurales, tanto en las regiones andinas como caribeñas.

Zieliński et al. (2019) evaluaron la producción de biogás a partir de una mezcla de estiércol de ganado y paja de trigo, en una planta a pequeña escala en Polonia utilizando dos pretratamientos, cavitación hidrodinámica y ultrasonido, para preparar sustratos para mejorar la producción de biogás. La tecnología utilizada en la planta fue la fermentación húmeda a temperatura mesofílica y un volumen total de 2,5 m<sup>3</sup>. El diseño experimental tuvo lugar en cuatro etapas diferentes: (i) 90 días de TRH sin pretratamiento; (ii) 60 días de TRH sin pretratamiento; (iii) 90 días de TRH con pretratamiento de la cavitación hidrodinámica; y (iv) 90 días de HRT con pretratamiento ultrasónico. Los pretratamientos contribuyeron a la mejora en la producción de biogás, con 430 L de CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup> cuando se usa cavitación y con 460 L de CH<sub>4</sub> kg SV<sup>-1</sup> con ultrasonido. La producción final de energía neta fue mayor con el proceso de cavitación, con 61 kWh día<sup>-1</sup>, seguido de la planta sin pretratamiento, con 56 kWh día<sup>-1</sup> y el ultrasonido, con 52 kWh día<sup>-1</sup>.

Roubík y Mazancová (2019) realizaron una encuesta en 93 casas rurales en dos distritos de Vietnam utilizando un cuestionario, conversaciones con consultores, observaciones y análisis del gas producido a partir del estiércol de cerdo para señalar las dificultades y los puntos positivos sobre ese proceso. El cuestionario incluía información sobre: (i) la planta de biogás y su mantenimiento; (ii) estufas de biogás; (iii) la rutina de cocción; (iv) biogás; (v) el uso de otros combustibles; y (vi) los sustratos. La encuesta mostró que el 96% de las estufas utilizadas en los hogares eran de 2 quemadores, con aproximadamente 2,4 años de durabilidad con un uso diario de 3 horas. Se detectaron altas concentraciones de CO en el biogás, en las formas diluidas (8.705,35 ± 1.790,01 mg m<sup>-3</sup>) y sin diluir (24.758,20 ± 4.860,20 mg m<sup>-3</sup>). Estos valores altos pueden estar asociados con una quema insuficiente, baja calidad de las estufas, mantenimiento inadecuado y la composición

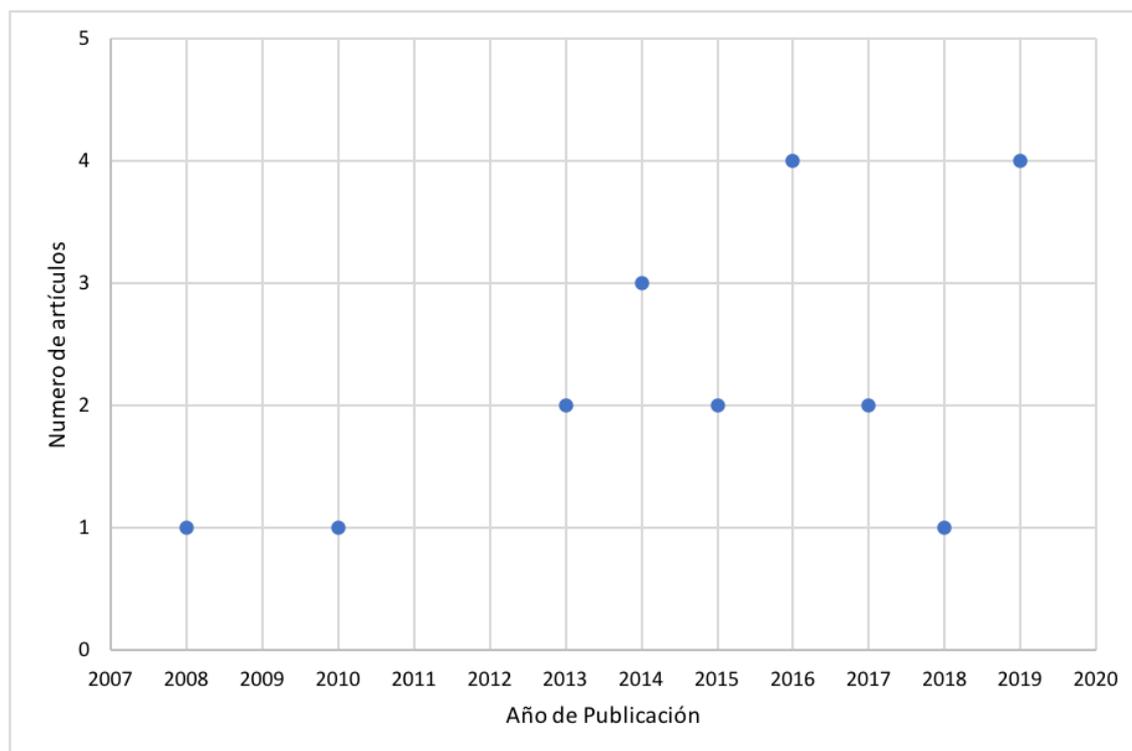
de los sustratos. Señalaron que el proceso anaeróbico contribuyó a una gestión más sostenible de los desechos, sin embargo, se percibieron muchos obstáculos.

Aziz et al. (2019) analizaron el potencial de producción de biogás a partir de seis sustratos diferentes (estiércol de cabra, estiércol de pollo, efluente de la planta de aceite de palma, lodos de depuradora, residuos de arroz y residuos de pescado) utilizando dos diferentes inóculos, bokashi (compuesto orgánico) e inóculo industrial (microorganismo patentado y comercializado). Las plantas a pequeña escala se ubicaron en Malasia, en condiciones mesofílicas durante 20 días. La producción más alta de metano ocurrió con el estiércol de pollo, con 30,2% y la más baja fue de residuos de pescado, con 17,7%, que a pesar de tener mucha concentración de proteínas, lo que aumenta la biometanización, también es responsable de favorecer la inhibición del proceso por amoníaco. La mayor producción de biogás se debió al uso del inóculo industrial, con casi 4.000 ml de biogás acumulado con el uso de residuos de arroz. La mayor producción de biogás utilizando bokashi fue de casi 1.200 ml de biogás acumulado con el uso de residuos de cabra. En general, el inóculo industrial fue mejor como catalizador para todos los tipos de sustratos utilizados.

### 3.2 Gráficos bibliométricos

La Figura 2 muestra los datos bibliométricos para el año de publicación de los artículos, cubriendo el período de 2008 a 2019.

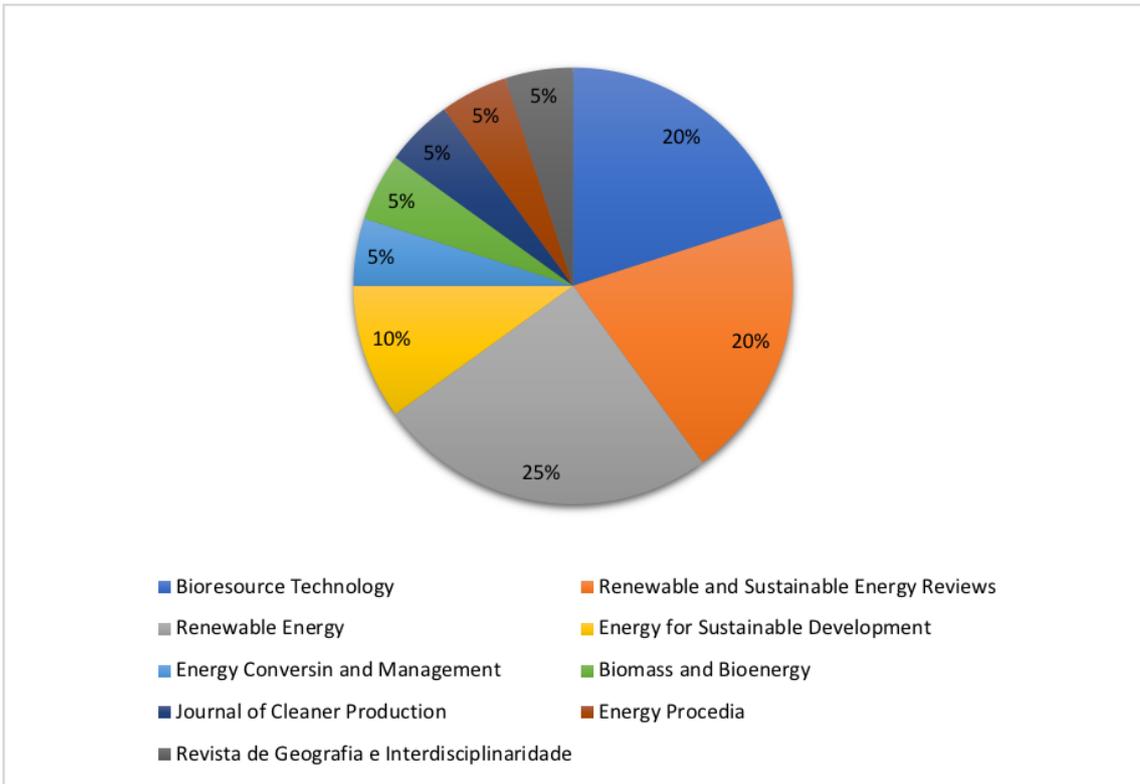
**Figura 2. Número de artículos por año**



Fuente: Los autores

La Figura 3 muestra las revistas científicas en las que se publicaron estos artículos.

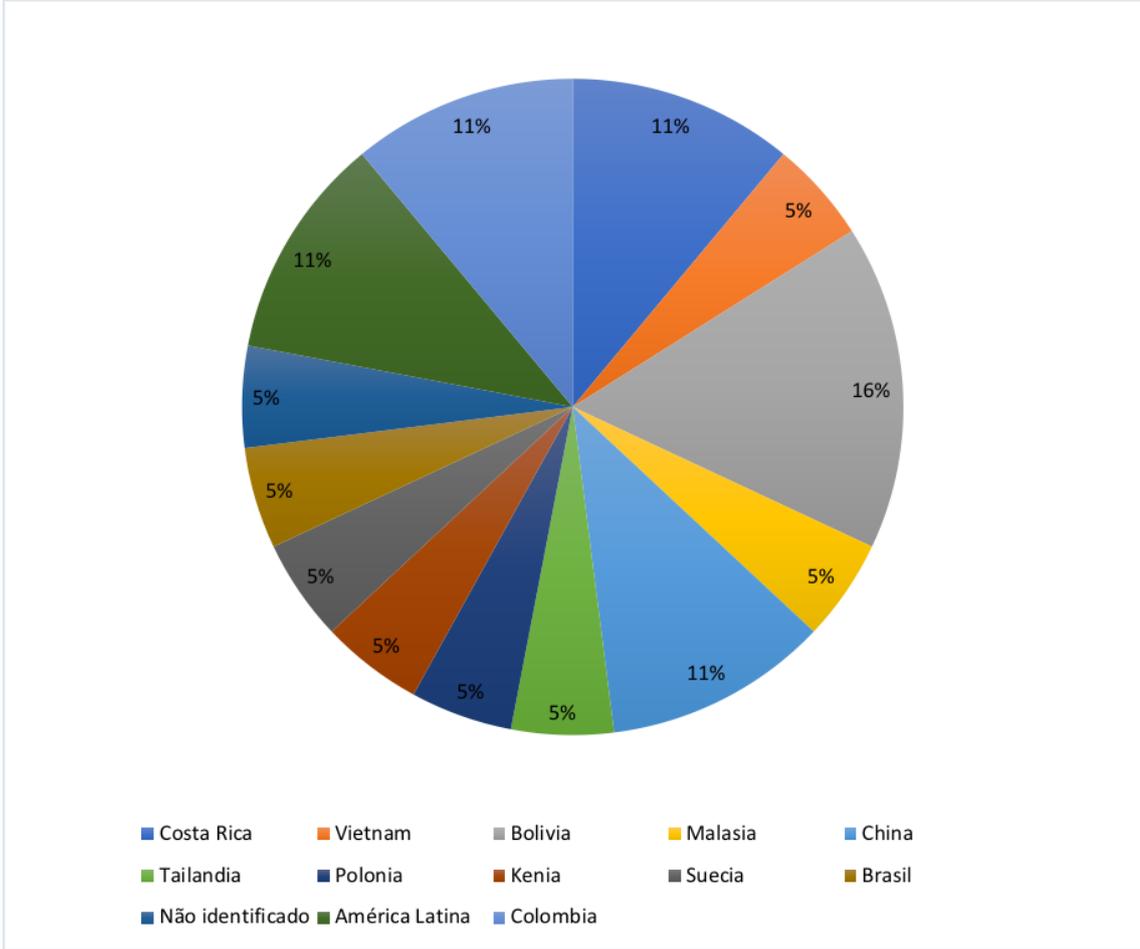
**Figura 3. Lista de revistas en las que se publicaron los artículos**



Fuente: Los autores

La Figura 4 muestra los países donde se desarrolló el trabajo.

**Figura 4. Países de origen de los artículos**



#### ***4 Discussão***

Se observó un mayor número de trabajos entre 2016 y 2019, años que siguieron a la reunión de Naciones Unidas sobre los objetivos de desarrollo sostenible.

La revista científica con mayor número de publicaciones sobre digestores de pequeña escala fue *Renewable Energy* con el 25% del trabajo total, seguida de *Bioresource Technology* y *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, con un 20% cada una.

En relación a los países donde se desarrollaron los estudios, se destacaron Bolivia, Costa Rica, China y Colombia. Otros países como Vietnam, Tailandia, Kenia y Brasil también han descubierto dónde se ha desarrollado la tecnología de digestores anaeróbicos a pequeña escala.

La diversificación de la matriz energética ha sido guiada por reuniones y conferencias de la ONU, destacando la energía como un factor fundamental para la sostenibilidad de las naciones (FREITAS y GHABRIL, 2013). El biogás se presenta de manera prometedora en este escenario, ya que se considera una fuente renovable versátil, con beneficios tanto sociales como económicos debido al amplio uso (eléctrico, térmico, mecánico), para promover la energía limpia a familias necesitadas y ambientalmente ubicadas para reducir la emisión de gases de efecto invernadero y para ser una forma eficiente de tratamiento y gestión de residuos orgánicos, con un alto potencial contaminante. Además, el biofertilizante, generado al final del proceso, tiene un alto valor agronómico, aportando beneficios al cultivo y a los agricultores, al reducir el gasto en fertilizantes (DIAS et al., 2013; BARBOSA y LANGER, 2011).

#### ***5 Considerações finais***

Los artículos presentes en la revisión variaron de 2008 a 2019, con énfasis en los años 2016 y 2019. Se contaron nueve revistas diferentes, con la revista "*Renewable Energy*", con el mayor número de artículos publicados, con un 25% del total. Los estudios analizados fueron representativos de América Latina y Asia, lo que señala la necesidad de cooperación entre estos países en el área de la digestión anaeróbica con la producción de biogás y biofertilizante.

La revisión colaboró para la contextualización de éxitos, fracasos y la eficiencia de los modelos de digestores a pequeña escala que representan una alternativa para las regiones con acceso restringido al saneamiento y la energía. Es importante destacar que los subsidios gubernamentales para la adquisición, mantenimiento y capacitación de los usuarios con respecto al uso de estos sistemas son esenciales para que la tecnología sea difundida.

## *Referências*

- ADELEKAN, B. A. Potentials of Selected Tropical Crops and Manure as Sources of Biofuels. In: Biogas. InTech, 2012.
- AMIGUN, B., PARAWIRA, W., MUSANGO, J. K., ABOYADE, A. O., BADMOS, A. S. Anaerobic biogas generation for rural area energy provision in Africa. In: Biogas. InTech, 2012.
- AZIZ, N. I. H. A., HANAFIAH, M. M., ALI, M. Y. M. Sustainable biogas production from agrowaste and effluents—A promising step for small-scale industry income. *Renewable energy*, v. 132, p. 363-369, 2019.
- BARBOSA, G., LANGER, M. Uso de biodigestores em propriedades rurais: uma alternativa à sustentabilidade ambiental. *Unoesc & Ciência—ACSA, Joaçaba*, v. 2, n. 1, p. 87-96, 2011.
- CASTRO, L., ESCALANTE, H., JAIMES-ESTÉVEZ, J., DÍAZ, L. J., VECINO, K., ROJAS, G., MANTILLA, L. Low cost digester monitoring under realistic conditions: Rural use of biogas and digestate quality. *Bioresource technology*, v. 239, p. 311-317, 2017.
- CHENG, S., LI, Z., MANG, H. P., HUBA, E. M. A review of prefabricated biogas digesters in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 28, p. 738-748, 2013.
- CHENG, S., LI, Z., MANG, H. P., HUBA, E. M., GAO, R., WANG, X. Development and application of prefabricated biogas digesters in developing countries. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 34, p. 387-400, 2014.
- DAMRONGSAK, D., CHAICHANA, C., WONGSAPAI, W. Small-Scale Biogas Plant from Swine Farm in Northern Thailand. *Energy Procedia*, v. 141, p. 165-169, 2017.
- DEL REAL OLVERA, J., LOPEZ-LOPEZ, A. Biogas production from anaerobic treatment of agro-industrial wastewater. In: Biogas. InTech, 2012.
- DIAS, M. I. A., COLEN, F., FERNANDES, L. A., SOUZA, R. M. D., BUENO, O. D. C. Viabilidade econômica do uso do biogás proveniente da suinocultura em substituição a fontes externas de energia. *Energia na Agricultura*, p. 155-164, 2013.
- FERRAREZ, A. H., PINTO, E. V., MOREIRA, M. A. C (2020) Estado da arte da produção de biogás a partir dos resíduos do processamento da mandioca. *INOVAE - Journal of Engineering and Technology Innovation*, v. 8, p. 188-208.
- FREITAS, G. S., GHABRIL, E. R. A ONU e sua influência na questão energética: uma análise sobre a evolução e os rumos concedidos ao longo de 40 anos de debates. *Conjuntura Austral*, v. 4, n. 17, p. 54-69. 2013.
- GARFÍ, M., MARTÍ-HERRERO, J., GARWOOD, A., FERRER, I. Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 60, p. 599-614, 2016.
- GARFÍ, M., CASTRO, L., MONTERO, N., ESCALANTE, H., FERRER, I. Evaluating environmental benefits of low-cost biogas digesters in small-scale farms in Colombia: A life cycle assessment. *Bioresource technology*, v. 274, p. 541-548, 2019.

- KINYUA, M. N., ROWSE, L. E., ERGAS, S. J. Review of small-scale tubular anaerobic digesters treating livestock waste in the developing world, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 58, 2016, Pages 896-910, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.324>.
- LANSING, S., BOTERO, R. B., MARTIN, J. F. Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. *Bioresource technology*, v. 99, n. 13, p. 5881-5890, 2008.
- LANSING, S., MARTIN, J. F., BOTERO, R. B., SILVA, T. N., SILVA, E. D. Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease. *Bioresource technology*, v. 101, n. 12, p. 4362-4370, 2010.
- MARTÍ-HERRERO, J., CHIPANA, M., CUEVAS, C., PACO, G., SERRANO, V., ZYMLA, B., GAMARRA, A. Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from Bolivia. *Renewable Energy*, v. 71, p. 156-165, 2014.
- MARTÍ-HERRERO, J., CERON, M., GARCIA, R., PRACEJUS, L., ALVAREZ, R., CIPRIANO, X. The influence of users' behavior on biogas production from low cost tubular digesters: A technical and socio-cultural field analysis. *Energy for Sustainable Development*, v. 27, p. 73-83, 2015.
- MARTÍ-HERRERO, J., FLORES, T., ALVAREZ, R., PEREZ, D. How to report biogas production when monitoring small-scale digesters in field. *Biomass and Bioenergy*, v. 84, p. 31-36, 2016.
- MUGNAINI, R., JANNUZZI, P., QUONIAM, L. Indicadores bibliométricos da produção científica brasileira: uma análise a partir da base Pascal. *Ciência da informação*, v. 33, n. 2, 2004.
- PÉREZ, I., GARFÍ, M., CADENA, E., FERRER, I. Technical, economic and environmental assessment of household biogas digesters for rural communities. *Renewable energy*, v. 62, p. 313-318, 2014.
- RAJENDRAN, K., ASLANZADEH, S., JOHANSSON, F., TAHERZADEH, M. J. Experimental and economical evaluation of a novel biogas digester. *Energy conversion and management*, v. 74, p. 183-191, 2013.
- ROHSTOFFE, F. N. Guia Prático do Biogás Geração e Utilização. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha, 2010.
- ROUBÍK, H., MAZANCOVÁ, J. Small-scale biogas plants in central Vietnam and biogas appliances with a focus on a flue gas analysis of biogas cook stoves. *Renewable Energy*, v. 131, p. 1138-1145, 2019.
- SALMINEN, E., RINTALA, J. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste – a review, *Bioresource Technology*, v 83, p.13-26, 2002.
- SILVA, M. L. C., ARAÚJO, A. O. Viabilidade de uso de biodigestor contínuo: um estudo de caso na Comunidade Arara, município de Tavares-PB. *InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade*, v. 2, n. 7, p. 179-194, 2016.
- SOVACOOOL, B. K., KRYMAN, M., SMITH, T. Scaling and commercializing mobile biogas systems in Kenya: a qualitative pilot study. *Renewable Energy*, v. 76, p. 115-125, 2015.
- STEINSBERGER, S. C., SHIH, J. C. The construction and operation of a low-cost poultry waste digesters. *Biotechnology and Bioengineering*, v.26, p. 537-543, 1984.

TEPERINO, D. P. M., LADEIRA NETO, M. A., FERRAREZ, A. H., GOMES, A. T., POUBEL, H. S., SILVA, E. S. Desenvolvimento de digestor anaeróbio didático e testes de produção de biogás com resíduos da bovinocultura e cafeicultura. ACTA BIOMEDICA BRASILIENSIA, v. 8, p. 57-70, 2017.

WANG, S., RUAN, Y., ZHOU, W., LI, Z., WU, J., LIU, D. Net energy analysis of small-scale biogas self-supply anaerobic digestion system operated at psychrophilic to thermophilic conditions. Journal of Cleaner Production, v. 174, p. 226-236, 2018.

ZIELIŃSKI, M., DĘBOWSKI, M., KISIELEWSKA, M., NOWICKA, A., ROKICKA, M., SZWARC, K. Cavitation-based pretreatment strategies to enhance biogas production in a small-scale agricultural biogas plant. Energy for Sustainable Development, v. 49, p. 21-26, 2019.