

Aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria en Colombia

Livestock residual biomass uses in Colombia

Jorge Tierradentro Cruz*
Katherine Montaña Oviedo**

Artículo de investigación

Recepción: 13 de enero de 2020
Aceptación: 06 de marzo de 2020

Como citar:

Tierradentro, J; Montaña Oviedo, K. 2019. Aprovechamiento de la biomasa residual pecuaria en Colombia. *Mare Ingenii. Ingenierías* 1 (2), pp. 46-55. Disponible en: <http://cipres.sanmateo.edu.co/index.php/mi>

*Docente adscrito a la Facultad de Ingenierías y Afines de la Fundación Universitaria San Mateo. Correo electrónico: jtierradentro@sanmateo.edu.co

** Coordinadora de investigación y docente del programa de ingeniería en salud y seguridad para el trabajo Fundación Universitaria San Mateo. Correo electrónico: kmontana@sanmateo.edu.co

Resumen:

La biomasa pecuaria es una alternativa para cubrir la demanda energética de las zonas rurales en Colombia amigables con el ambiente, implementando técnicas y tecnologías adecuadas. El objetivo de esta revisión es verificar perspectivas frente al potencial técnico de la biomasa residual, las tecnologías de conversión de biomasa residual en biogás y los beneficios del uso de este tipo de tecnologías. Se evidencia que la biomasa pecuaria ha sido estudiada evaluando tecnologías como la digestión anaerobia y cuenta con nuevos campos de estudio como la gasificación. Se hallaron beneficios del uso de este tipo de tecnologías a afiliación nivel ambiental y social, y barreras de tipo político. El uso de estas tecnologías brindaría a las naciones energías alternativas en zonas apartadas del país.

Palabras claves:

Biogás; biomasa residual pecuaria; digestores anaeróbicos; gasificación.

Abstract:

The livestock residual biomass is an alternative to cover the energetic demand in Colombia's eco-friendly rural zones, through an implementation of adequate techniques and technologies. The purpose of this review is to verify some perspectives face to the residual biomass technical potential, the conversion technologies from residual biomass to biogas and the uses benefits of this type of technologies. It is evidenced that livestock biomass has been studied by a technology evaluation as anaerobic digestion and count with new fields of study as gasification. It is found benefits in the use of this type of technologies at a social and environmental level, and political barriers. The use of this technologies would bring alternative energies in pulled apart national zones.

Keywords:

Biogas; Livestock residual biomass; anaerobic digesters; gasification.

Introducción

La biomasa se define como todo material de origen biológico, con excepción de aquellos englobados en formaciones geológicas, sufriendo un proceso de mineralización (carbón, gas natural y petróleo) [1]. A partir de la biomasa se puede emplear para la obtención de energía por la alta presencia de enlaces carbono – carbono (su fórmula química es $C_xH_yO_z$). Es un recurso que presenta características que la clasificaría como energía renovable, amigable con el medio ambiente y sustentable. Recursos necesarios para combatir el cambio climático, el agotamiento de los recursos fósiles en Colombia y alternativas de obtención de energía amigables con el medio ambiente.

Entre los tipos de biomasa se encuentran: biomasa natural, recursos generados espontáneamente sin la intervención del hombre y provienen de masas forestales. Biomasa residual, generada a partir actividades de producción como subproductos; pueden ser transformadas y luego reutilizadas (por ejemplo, estiércol de animales, residuos de cosechas y podas, residuos sólidos orgánicos urbanos, residuos de industrias). Cultivos energéticos, son empleados para uso alimenticio y energético, por ejemplo, palma, caña de azúcar, semillas con altos contenidos de grasas [2], [3]. Para el aprovechamiento del potencial energético de la biomasa, existen dos (2) métodos: los bioquímicos, que realizan la descomposición de la biomasa por digestión anaerobia o fermentación alcohólica, y los termoquímicos, que emplean altas de temperaturas y diferentes variables de oxidación, entre estos, combustión, gasificación y pirolisis [1], [4], [5]. En la mayoría de los casos este tipo de biomasa son desechadas sin ningún tipo de transformación.

A través de la importancia del uso de la biomasa y las diversas técnicas para el aprovechamiento del recurso y superación de problemáticas sobre agotamiento de recursos de tipo fósil, Colombia no puede ser ajena a dichas tecnologías. Así, es creada la Ley 1725 de 2014; promueve el uso de energías renovables en el país, provenientes de fuentes de convencionales. De esta forma, es necesario analizar el potencial de la biomasa residual pecuaria en Colombia. De acuerdo con el tercer Censo Nacional Agropecuario (CNA) realizado durante el 2014, el 38,6% del territorio nacional está siendo utilizado para actividades agropecuarias. En este espacio territorial están las Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) dedicadas a las actividades agrícolas, de las cuales 34,5% realizan actividades agropecuarias y 56,6% realizan actividades pecuarias. Las UPA cuentan con 772`724.705 cabezas de animales de tipo bovino, porcino, búfalos, equino, asnal, mular, ovino y caprino, avícola y otras especies [6]. La cantidad de desechos originados por estos animales se puede emplear como biomasa de tipo residual.

El aprovechamiento de estos residuos pecuarios [7] es una solución para regiones de Colombia que están apartadas, como las zonas rurales; además de no producir costos adicionales en la producción de biomasa. A nivel nacional e internacional se han generado proyectos con el fin de encontrar y comprender la forma de obtener el máximo aprovechamiento de este recurso [8]. A partir de lo anterior, el presente artículo pretende revisar los potenciales técnicos de la biomasa residual, las tecnologías de conversión de biomasa residual en biogás y los beneficios del uso de biomasa residual, de forma exploratoria.

Potenciales técnicos de la biomasa residual

El uso de la biomasa residual pecuaria en Colombia debe contemplar aspectos

geográficos, climáticos, estados de los animales, hábitos alimenticios, datos que permitan caracterizar la biomasa frente a su relación Carbono/Nitrógeno (C/N), contenido de humedad y potencial energético. El factor determinante en la selección de una de las técnicas para el aprovechamiento de la biomasa es el contenido de húmeda, por ejemplo, para un proceso de combustión se requiere que la biomasa contenga un valor menor de 40% en humedad. En cambio, para un proceso termoquímico como la gasificación, requiere que contenga entre 10 % y 30 % de humedad [8], [9]. Para que la biomasa cumpla con las características de humedad, es necesario recurrir a procesos adicionales de secado o la combinación de otro de tipo de recursos incurriendo en costos adicionales.

Los principales mecanismos para el aprovechamiento de biomasa se observan en la Tabla 1; contempla algunas características técnicas de los procesos. En este sentido, el mecanismo de combustión no es favorable con el medio ambiente; es una práctica que no explota el potencial energético de la biomasa. Además, produce altas concentraciones de dióxido de carbono, monóxido de carbono y material particulado [10]; afecta a la población y no aporta a la disminución de gases de efecto invernadero.

Frente a la técnica de pirolisis, genera subproductos como el bioaceite con una compleja composición, tales como, compuestos fenólicos, alcoholes, ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas e hidrocarburos poliaromáticos; conllevan un proceso de purificación y añaden al producto un mayor valor agregado [11]. Por su parte, los residuos pecuarios no generan este tipo de características químicas; adicionalmente generan carbón vegetal con un alto poder calórico. Sin embargo, la carbonización representa una pérdida importante de la energía presente en la materia prima [12] y el uso de altas temperaturas genera problemas con el alquitrán [13]. Por lo anterior, resulta inviable aplicar este tipo de tecnologías

haciendo uso de residuos pecuarios, para el campo colombiano.

PROCESO	TÉCNICA	CARACTERÍSTICAS
Termoquímicos – tipo de biomasa: seca [4], [12], [14]	Combustión	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidación de biomasa a altas temperaturas • Temperaturas 800°C – 1000°C. • Genera agua, dióxido de carbono, monóxido de carbono, cenizas, calor y vapor.
	Gasificación	<ul style="list-style-type: none"> • Combustión parcial • Altas temperaturas y bajas concentraciones de oxígeno o aire. • Genera gas de bajo poder calorífico (gas pobre) o gas medio. El gas se compone de hidrógeno, metano y monóxido de carbono. • El gas se emplea en motores de combustión interna o para la obtención de energía mecánica o eléctrica.
	Pirólisis	<ul style="list-style-type: none"> • Descomposición de la biomasa en ambientes anaerobios. • Combustión parcial (350°C – 550°C) generando combustible sólido, carbón vegetal y gas pobre. • Gasificación total (650°C – 850°C) se obtiene gas rico usado para producción de metanol.
Bioquímicos – tipo de biomasa: húmeda [12], [15]	Fermentación o digestión aerobia	<ul style="list-style-type: none"> • Descomposición de la biomasa en presencia de oxígeno. • Transformación de moléculas complejas a moléculas simples. • Generación de moléculas de alcohol por medio de microorganismos.
	Fermentación o digestión anaerobia	<ul style="list-style-type: none"> • Descomposición de la biomasa en ausencia de oxígeno. • Se realiza en digestores obteniendo un biogás (compuesto por dióxido de carbono y metano) y fertilizantes.

Tabla 1. Características técnicas de los procesos de aprovechamiento de biomasa

El aprovechamiento residuos pecuarios se deben realizar a través de tecnologías gasificación y digestión anaerobia, como se ha evidenciado en diferentes investigaciones [2], [3], [8], [9], [13], [16], [17]. Uno de los productos más importantes originados en los procesos de gasificación o digestión anaerobia es el biogás. Es formado por metano (55% - 65%), dióxido de carbono (35% - 45%), nitrógeno (0% - 3%), hidrógeno (0% - 1%) y en forma de trazas los sulfuros. Este gas puede reemplazar el gas natural en la mayoría de aplicaciones; entre tanto, la composición del biogás puede variar dependiendo de la biomasa y la estrategia de obtención [18], [19].

Trabajos desarrollados en Colombia proponen que el sector avícola presenta un alto potencial energético a través de la polinaza (bosta de pollos en engorde, junto con cascarilla de arroz, café, aserrín, etc.) [20]. La cantidad de cabezas de tipo avícola es de 737'206.111; corresponde al 95% de los animales contabilizados en el tercer CNA, durante el 2014 [6]. Sin embargo, es necesario considerar el potencial energético que presenta la biomasa residual producida en bovinos y porcinos, evaluado en diferentes trabajos de investigación [8], [16], [21], [22].

Algunas investigaciones han revisado el potencial energético de la biomasa bovina y porcina [2], [4], [8], [20], [23]. Proponen la gasificación como método principal para el aprovechamiento de los residuos pecuarios. La gasificación es un proceso de conversión de sólidos carbonosos a combustibles gaseosos; permite obtener mejores resultados que la digestión anaeróbica y disminuye la generación de gases de efecto invernadero [24]. Aunque es indispensable realizar estudios previos de caracterización de biomasa, con el fin de estimar la factibilidad y viabilidad del proceso; implica obtener resultados que dependerán de la región geográfica, época del año, alimentación, cantidad y estado de los animales. Lo anterior conlleva a caracterizar las propiedades de la biomasa (como el calor específico, la densidad y la humedad).

No se debe descartar el aprovechamiento de la biomasa pecuaria por digestión anaeróbica; ha mostrado un alto potencial energética para el caso de los residuos bovinos [8], [9]. De esta manera, será necesario caracterizar la biomasa mediante un análisis microbiológico, con el fin de conocer las cantidades de levaduras, mohos, coliformes, etc. [17]. Otro aspecto relevante es la temperatura a la que se realizan estos procesos; la mejor temperatura ambiente debe oscilar entre 20°C a 28°C [2].

Tecnologías de conversión de biomasa residual

El aprovechamiento de la biomasa residual, utilizando la digestión anaerobia, conlleva una serie de pasos observables en la Figura 1. Inicialmente la materia prima (biomasa residual) se debe someter a un pretratamiento; incluye la adición de aserrín, cascarilla de arroz, residuos de café o arena que puede disminuir el contenido de humedad [20]. Se recomienda que la biomasa residual cuente con una proporción de C/N de 20% - 30%; mantener un pH de 7 - 8.5 y una temperatura en el biodigestor entre 20°C a 28°C [2], [21]. También se pueden someter a pretratamientos de tipo térmico, químico o mecánico para mejorar la calidad del tamaño de la biomasa y así aumentar el área superficial de contacto [25].

El proceso continúa con la digestión anaeróbica; contempla tres (3) etapas. Hidrólisis: la materia orgánica compuesta por

proteínas, carbohidratos y lípidos; se transforman en moléculas menos complejas (aminoácidos, azúcares, alcoholes y cadenas largas de ácidos grasos), a través bacterias hidrolíticas. Acidogénesis: los compuestos menos complejos generados en la hidrólisis se transforman en ácidos grasos volátiles (ácido propiónico, butírico, entre otros); contempla una subetapa, la acetogénesis, los ácidos grasos volátiles se transforman en ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno. Metanogénesis: las bacterias metanogénicas transforman en metano, dióxido de carbono y agua a las sustancias generadas en la anterior etapa. Además genera un subproducto llamado digestato o remanente rico en nutrientes que puede ser usado como fertilizante o abono orgánico [15], [25], [27].

A continuación, se procede a un proceso de purificación y desulfuración de biogás. Este paso es necesario antes de que el biogás pueda quemarse directamente o usarse para generar electricidad afectando el potencial energético. El biogás debe tratarse previamente mediante un proceso de desulfuración, por ejemplo, tratamientos biológicos [26], fregado de agua, adsorción por oscilación de presión y método de membrana [28], [29]. El método biológico se realiza a través de bacterias incoloras de azufre; los contaminantes de azufre se transforman en sulfuro (H₂S) por bioreducción y luego se convierte en azufre, a través de un proceso de oxidación biológica [26].



Figura 1. Pasos del aprovechamiento de la biomasa residual usando la digestión anaeróbica. [25], [26]

Al comparar el biogás obtenido de procesos de digestión anaeróbica y el gas natural, se evidencia la importancia del proceso de purificación para aumentar la cantidad de la concentración de metano en la composición del biogás. Por lo regular, el biogás cuenta con un porcentaje de metano que oscila entre el 40% - 75%. En cambio, el gas natural cuenta con un porcentaje de metano del 87% - 97% [18], [30]; el potencial energético del gas natural es necesario.

Finaliza el proceso de obtención del biogás, es almacenado y usado para la generación de calor o electricidad. Para el almacenamiento de biogás se recomiendan tanques de baja presión (5 - 50Pa), son más versátiles y económicos. También se recomienda dejar escapar los gases producidos durante los primeros cinco (5) días, y mantener la biomasa retenida de 25 a 30 días. Por último, la tecnología necesaria para usar el biogás en forma de calor, simplemente, se basa en combustión directa en calderas o quemadores, distribuido en una red de gas convencional. Para la producción de energía eléctrica o mecánica se utilizan motores o motogeneradores de combustión, así como unidades de generación combinada de potencia y calor [25].

Frente al proceso de digestión anaeróbica es necesario establecer el tipo de digestor a usar, se han utilizado principalmente digestores de cúpula fija, de campana flotante, tubular o cubierta flexible (Figura 2). El digestor de cúpula fija (modelo chino) presenta una vida útil más prolongada (alrededor de 20 años con buen mantenimiento), sin embargo, su inversión inicial es costosa. El digestor de campana móvil (modelo hindú) experimenta un aumento de presión debido a que su volumen permanece constante durante la producción de biogás. Los productos (digestato y biogás) se evacúan por tuberías. El biodigestor tubular, fabricado con polietileno, presenta una disminución en el costo inicial. No obstante, presenta inconvenientes; utiliza una "bolsa" de polietileno que puede rasgarse con facilidad; los di-

gestores de cubierta flexible usan una capa delgada de polietileno en forma de domo.



Figura 2. a. Digestor de cúpula fija. b. Digestor de campana móvil. c. Digestor tubular. d. Digestor de cubierta flexible. [31]

A través del uso de la gasificación, el aprovechamiento de la biomasa residual conllevaría una serie de pasos (Figura 3). Cabe aclarar que las biomásas empleados en procesos de gasificación son aserrín, arroz, cascara de café, desechos de aceite de oliva y madera [32]. Sería interesante realizar un proceso de obtención de biogás utilizando biomasa residual. De esta forma, se darán a conocer aspectos técnicos de la gasificación.



Figura 3. Proceso de gasificación. [33], [35]

La biomasa residual se debe someter a un proceso de secado para retirar el contenido de agua. La humedad en la biomasa debe oscilar entre 7% - 20%; el secado inicia, una temperatura sobre los 100°C, para retirar el agua y después calentar paulatinamente hasta llegar a una temperatura de 200°C y volatizar compuestos de bajo peso molecular [24], [34]. Por lo anterior, se hace necesario que la biomasa se someta a un proceso de eliminación de la mayor cantidad de humedad, a través de presecado; los altos contenidos de humedad son un inconveniente para el proceso de gasificación.

Los procesos de degradación térmica, oxidación o combustión y reducción han sido acotados por varios autores [24], [33], [35]. A continuación, se mencionan algunos aspectos técnicos de los procesos. El proceso de degradación térmica se da en ausencia de oxígeno a una temperatura de 300° - 500 °C; desprende gases combustibles volátiles. Durante esta fase se genera el residuo carbonoso, o carbón vegetal, alquitranes y gases (como vapor de agua, dióxido de carbono, hidrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos de tipo aromático), este proceso también es denominado pirólisis. El residuo carbonoso o carbono vegetal se mezcla con un agente gasificante; cuando se mantiene a temperaturas entre 600°C a 1400°C, entre los agentes gasificantes se encuentra el aire, vapor oxígeno y de agua, generando productos de combustión parcial y completa.

El proceso de gasificación finaliza con la reducción. Durante esta etapa se dan reacciones químicas bastante complejas; genera biogás en diferentes proporciones de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano y nitrógeno. Además, las proporciones dependen de los agentes gasificantes empleados en el proceso de oxidación. La tecnología de gasificación es altamente amigable con el medio ambiente, es económica y eficiente térmicamente; disminuye la emisión de gases de efecto invernadero, así como la emisión de gases relacionados con la lluvia ácida (óxidos de azufre y nitrógeno) [22], [24], [34], [35].

Beneficios del uso de biomasa residual

El uso de la biomasa residual como materia prima para la producción de biogás cuenta con beneficios de tipo ambiental, social e investigativo; ya sea haciendo uso de tecnologías como la digestión anaerobia o la gasificación. A continuación, se enumeran los beneficios que han sido abordados por diferentes autores:

- Sustitución de fuentes combustibles convencionales en zonas rurales como leña, aceite de queroseno, estiércol de ganado y residuos agrícolas usados en estufas rudimentarias. Generan material particulado y altas concentraciones de óxidos; son asociados a diversas enfermedades a nivel pulmonar [10], [22], [36], [37].
- Las energías renovables son una estrategia para combatir el cambio climático y la crisis energética, orientadas a lograr un desarrollo sostenible [26], [38].
- El biogás no genera contaminantes a nivel atmosférico, por ejemplo, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno y óxidos de carbono [22].
- Las fuentes combustibles convencionales en zonas rurales, a menudo, son la única fuente de energía accesible y asequible. Sin embargo, el biogás puede cambiar esta perspectiva; puede proveer de iluminación, calefacción y cocina en zonas rurales apartadas; mejorar sus condiciones y acceso a los servicios básicos [19], [26], [28], [36], [38]; combatir la pobreza y permitir el desarrollo humano [37].
- El establecimiento de granjas en zonas rurales, a pequeña o gran escala, ha llevado a la generación de una alta cantidad de residuos pecuarios que no se disponen de forma adecuada. Así, la transformación en biogás es una alternativa para tratar este tipo de residuo para la generación de energía [38].
- La generación de fertilizantes de tipo orgánico a partir del digestato, como subproducto del proceso de generación de biogás. Sustituye fertilizantes de origen sintético que han atentado contra los ecosistemas [10], [19], [36].
- Las necesidades energéticas han llevado en la destrucción de ecosistemas por el uso indiscriminado de monocultivos (palma, caña de azúcar, maíz), utilizados para la obtención de biocombustibles. El uso de biomasa residual puede sustituir este tipo de materias primas para la generación de energía [10].

- Alternativas investigativas entorno a las energías alternativas, frente a la incorporación de otras tecnologías amigables a tecnologías conocidas; cultivos de bacterias que mejoren la calidad y la producción de biogás; estudios de aplicación de las tecnologías en zonas rurales; implementación de biogás en vehículos de transporte; estrategias educativas para la aceptación de la tecnología por parte de la población [39].

- Colombia cuenta con recursos naturales (biomasa residual) que pueden ser aprovechados en la obtención de energías renovables [39].

Es claro que el uso de este tipo de tecnologías cuenta con barreras para ser adaptadas por los países. A continuación, se acotan algunas barreras:

- Mejoras técnicas, falta de aceptación por parte de las personas de zonas rurales por preconceptos negativos y altos costos de inversión; conllevan a que comunidades residentes en estas zonas no puedan adoptar este tipo de tecnologías. Es necesario que los gobiernos generen políticas para el uso de este tipo de tecnologías [10], [19].

- Las estrategias de desarrollo sostenible en los países deben estar orientadas al uso de energías renovables, así como hacer uso de fuentes no convencionales. Sin embargo, depende de las estrategias nacionales que generen espacios de usabilidad y aceptabilidad de este tipo de tecnologías [36], [40].

- Desconocimiento técnico en las zonas rurales para la implementación de tecnologías basadas en la producción de biogás, por ejemplo, mantener la producción de ganado vacuno o porcino. Por lo tanto, en el diseño de este tipo de tecnologías es necesario tener en cuenta estándares de calidad y factores socioculturales [36].

- Falta generación de licencias, normatividad e incentivos financieros que promuevan la implementación de estas tecnologías en el país, es decir, políticas orientadas al uso de energías alternativas con fuentes no convencionales [37].

Conclusiones

El uso de biomasa residual pecuaria es una alternativa para la sustitución de fuentes convencionales de energía. Los desarrollos tecnológicos entorno a esta biomasa han sido estudiado en diferentes contextos; permiten evidenciar los beneficios a nivel ambiental y social. Es necesario que futuras investigaciones se orienten en la inclusión de la tecnología con la comunidad a beneficiar, con el ánimo de reconocer sus deficiencias técnicas y conceptuales frente al uso de la tecnología. Esto es, realizar una verdadera transferencia tecnológica.

Referencias bibliográficas

- [1] X. E. Castells, *Biomasa y Bionergía: Energía, agua, medioambiente, territorialidad y sostenibilidad*, Ediciones. 2012.
- [2] D. F. Ramírez Balaguera, Luisa Fernanda Barrera Ojeda, "Potencial energético de la biomasa residual pecuaria del departamento de Cundinamarca – Colombia," Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [3] H. Escalante Hernández, J. Orduz Prada, H. J. Zapata Lesmes, M. C. Cardona Ruiz, and M. Duarte Ortega, "Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia," 2010.
- [4] E. Cerdá, "Energía obtenida a partir de biomasa," *Cuad. Económicos ICE*, no. 83, pp. 117–140, 2012.
- [5] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, *Manuales de Energías Renovables - Energía de la Biomasa*. 2007.
- [6] DANE, "3er Censo Nacional Agropecuario," 2016.
- [7] G. A. López Martínez, C. I. Buriticá Arboleda, and E. Silva Lora, "La biomasa residual pecuaria como recurso energético en Colombia," *Visión Electrónica*, vol. 12, no. 2, pp. 180–188, 2018.
- [8] A. Sanchez and V. García, "Evaluación de la prefactibilidad de un sistema de generación eléctrica a partir de biogás con estiércol de ganado vacuno o porcino

- en Cundinamarca," *Tekhnê*, vol. 11, no. 2, pp. 37–50, 2014.
- [9] M. L. Stronguiló Leturia and L. M. Chacón Febres, "Caracterización de biomasa residual de la región Arequipa para la producción de biocombustibles," *Enfoque UTE*, vol. 6, no. 4, p. 42, Dec. 2015.
- [10] A. Shane, S. H. Gheewala, and S. Phiri, "Rural domestic biogas supply model for Zambia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78. Elsevier Ltd, pp. 683–697, 01-Oct-2017.
- [11] Y. H. Chan, S. Yusup, A. T. Quitain, Y. Uemura, and S. K. Loh, "Fractionation of pyrolysis oil via supercritical carbon dioxide extraction: Optimization study using response surface methodology (RSM)," *Biomass and Bioenergy*, vol. 107, pp. 155–163, Dec. 2017.
- [12] Coordinación de Energías Renovables; Dirección Nacional de Promoción; Subsecretaría de Energía Eléctrica, "Energía Renovables - Energía Biomasa," 2008.
- [13] F. Calise, C. Cremonesi, G. De Notaristefani Di Vastogirardi, and M. Dentice d'Accadia, "Technical and economic analysis of a cogeneration plant fueled by biogas produced from livestock biomass," in *Energy Procedia*, 2015, vol. 82, pp. 666–673.
- [14] J. E. Carrasco García, "Módulo: Biomasa combustión directa de la biomasa," 2007.
- [15] Ministerio de Energías, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Organización de las Unidades para la Alimentación y Agricultura, and Global Environment Facility, "Manual de biogás," 2011.
- [16] D. P. Galvis Pinzón and M. L. Acevedo León, "Evaluación del potencial energético de la biomasa residual proveniente del sector porcino en Colombia," *Universidad Industrial de Santander*, 2008.
- [17] A. F. Ladino Tamayo and J. A. Martínez Rojas, "Metodología para el aprovechamiento energético de recursos de biomasa residual pecuaria en la autogeneración de electricidad: Casos de estudio Briceño, Boyacá y Cajicá, Cundinamarca," *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*, 2016.
- [18] A. Romero Salvador, "Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles," *Cienc.Exact.Fís.Nat. (Esp)*, vol. 104, no. 2, pp. 331–345, 2010.
- [19] M. Garfí, J. Martí-Herrero, A. Garwood, and I. Ferrer, "Household anaerobic digesters for biogas production in Latin America: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60. Elsevier Ltd, pp. 599–614, 01-Jul-2016.
- [20] P. A. Sanguino Barajas, N. A. Téllez Anaya, H. Escalante Hernández, and C. A. Cardozo, Vasquez, "Aprovechamiento energético de la biomasa residual del sector avícola," *Rev. ION*, vol. 22, no. 1, pp. 43–52, 2009.
- [21] K. T. Montenegro Orozco, A. S. Rojas Carpio, I. Cabeza Rojas, and M. A. Hernández Pardo, "Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca," *Rev. Ion, Investig. Optim. y Nuevos procesos en Ing.*, vol. 29, no. 2, pp. 23–36, Jan. 2017.
- [22] T. Abbas, G. Ali, S. A. Adil, M. K. Bashir, and M. A. Kamran, "Economic analysis of biogas adoption technology by rural farmers: The case of Faisalabad district in Pakistan," *Renew. Energy*, vol. 107, pp. 431–439, Jul. 2017.
- [23] J. J. Alonso Mateos, "Las posibilidades energéticas de la Biomasa en la Comunidad Autónoma de Madrid," *Obs. Medioambient.*, no. 7, pp. 195–220, 2004.
- [24] P. Basu, *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=QSy pbUSdkik-C&oi=fnd&pg=PP1&dq=Biomass+Gasification+and+Pyrolysis,+practical+design+and+theory+editorial.&ots=Vg1r4a-Grh8&sig=6LNVf-9n-X4jSWP0e98m-FN_5RQ0#v=onepage&q=Biomass%20Gasification%20and%20Pyrolysis%2C%20 2010.

- [25] D. L. Parra-Ortiz, M. A. Botero-Londoño, and J. M. Botero-Londoño, "Biomasa residual pecuaria: revisión sobre la digestión anaerobia como método de producción de energía y otros subproductos," *Rev. UIS Ing.*, vol. 18, no. 1, pp. 149–160, Feb. 2019.
- [26] L. Chen, R. G. Cong, B. Shu, and Z. F. Mi, "A sustainable biogas model in China: The case study of Beijing Deqingyuan biogas project," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78. Elsevier Ltd, pp. 773–779, 01-Oct-2017.
- [27] J. Hilbert, "Manual para la producción de biogas."
- [28] F. A. Batzias, D. K. Sidiras, and E. K. Spyrou, "Evaluating livestock manures for biogas production: A GIS based method," *Renew. Energy*, vol. 30, no. 8, pp. 1161–1176, Jul. 2005.
- [29] Q. Sun, H. Li, J. Yan, L. Liu, Z. Yu, and X. Yu, "Selection of appropriate biogas upgrading technology-a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51. Elsevier Ltd, pp. 521–532, 06-Jul-2015.
- [30] R. Kadam and N. L. Panwar, "Recent advancement in biogas enrichment and its applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73. Elsevier Ltd, pp. 892–903, 01-Jun-2017.
- [31] J. V. Sánchez Rodríguez, A. E. Hernández Vega, and A. Pavón Hernández, *Uso y mantenimiento de biodigestores de cúpula fija, una forma de contribuir al desarrollo local sostenible*. Matanzas, Cuba.
- [32] J. F. Vélez, F. Chejne, C. F. Valdés, E. J. Emery, and C. A. Londoño, "Co-gasification of Colombian coal and biomass in fluidized bed: An experimental study," *Fuel*, vol. 88, no. 3, pp. 424–430, Mar. 2009.
- [33] X. E. Castells, *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Albasanz, Madrid, 2012.
- [34] L. Emami-Taba, M. F. Irfan, W. M. A. Wan Daud, and M. H. Chakrabarti, "Fuel blending effects on the co-gasification of coal and biomass - A review," *Biomass and Bioenergy*, vol. 57, pp. 249–263, Oct. 2013.
- [35] Y. Neubauer and H. Liu, "Biomass gasification," in *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, Woodhead Publishing Limited, Ed. Cambridge, Reino Unido, 2013, pp. 106–129.
- [36] F. Lwiza, J. Mugisha, P. N. Walekhwa, J. Smith, and B. Balana, "Dis-adoption of Household Biogas technologies in Central Uganda," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 37, pp. 124–132, Apr. 2017.
- [37] A. Yasar, S. Nazir, A. B. Tabinda, M. Nazar, R. Rasheed, and M. Afzaal, "Socio-economic, health and agriculture benefits of rural household biogas plants in energy scarce developing countries: A case study from Pakistan," *Renewable Energy*, vol. 108. Elsevier Ltd, pp. 19–25, 01-Aug-2017.
- [38] L. Deng et al., "Application and development of biogas technology for the treatment of waste in China," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 70. Elsevier Ltd, pp. 845–851, 01-Apr-2017.
- [39] A. M. Rosso-Cerón and V. Kafarov, "Barriers to social acceptance of renewable energy systems in Colombia," *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 10. Elsevier Ltd, pp. 103–110, 01-Nov-2015.
- [40] Y. Jiang, E. van der Werf, E. C. van Ierland, and K. J. Keesman, "The potential role of waste biomass in the future urban electricity system," *Biomass and Bioenergy*, vol. 107, pp. 182–190, Dec. 2017.