

ATLAS DEL POTENCIAL TÉCNICO-ENERGÉTICO APROVECHABLE
POR DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA BIOMASA RESIDUAL PECUARIA
PARA LOS SUBSECTORES PORCÍCOLA Y GANADERÍA DE LECHE
ESPECIALIZADA EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA

Estudiante: Andrés Felipe Jiménez Vásquez

Asesores

MSc, PhD. Mario Alberto Luna del Risco
MSc. Sebastián Villegas Moncada

Universidad de Medellín
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería Urbana
Medellín
Colombia
2020

Contenido

1. Título del proyecto	4
2. Resumen	4
3. Introducción	5
4. Justificación	7
5. Objetivos	8
5.1. Objetivo general	8
5.2. Objetivos específicos	8
6. Estado del arte	9
6.1. Marco normativo general relacionado con la utilización de energías alternativas en Colombia	9
6.2. Biomasa	10
6.3. Relación entre biomasa, biorefinería y digestión anaerobia	11
6.4. Estudios iniciales sobre digestión anaerobia	12
6.5. Digestión anaerobia y Potencial Bioquímico de Metano (BMP)	13
6.6. Potencial energético de la biomasa residual	16
6.7. Estudios de estimación del potencial energético de la biomasa residual 18	
6.8. Biomasa residual objeto de estudio	21
6.9. Sistemas productivos ganaderos y porcícolas	22
6.10. Ganadería lechera y porcicultura en el Departamento de Antioquia ..	23
6.11. Caracterización de estiércol de ganado bovino y porcino	26
7. Metodología	29
7.1. Estimación del estiércol generado por los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada	29
7.2. Estimación del estiércol técnicamente aprovechable generado por los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el Departamento de Antioquia	29
7.3. Estimación teórica del potencial energético del estiércol generado por los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el Departamento de Antioquia	30
7.4. Análisis estadístico de información	31
7.5. Base de datos geográfica de la biomasa residual generada por los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el Departamento de Antioquia	31
8. Resultados	32

8.1. Análisis estadístico de información secundaria del estiércol de ganado porcino (MS, SV y BMP)	32
8.2. Análisis estadístico de información secundaria del estiércol de ganado bovino	36
8.3. Estimación de biomasa residual pecuaria aprovechable en el Departamento de Antioquia para los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada	41
8.4. Estimación teórica del potencial técnico-energético aprovechable del estiércol generado por los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el Departamento de Antioquia	51
9. Conclusiones	64
10. Recomendaciones	66

1. Título del proyecto

ATLAS DEL POTENCIAL TÉCNICO-ENERGÉTICO APROVECHABLE POR DIGESTIÓN ANAEROBIA DE LA BIOMASA RESIDUAL PECUARIA PARA LOS SUBSECTORES PORCÍCOLA Y GANADERÍA DE LECHE ESPECIALIZADA EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA

2. Resumen

La digestión anaerobia del estiércol generado por los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el Departamento de Antioquia ofrece la posibilidad de obtención de energía limpia y renovable, por la producción de biogás y metano, combustible con amplias aplicaciones térmicas y energéticas.

El aprovechamiento de esta biomasa residual tiene valor económico, social y ambiental, por las soluciones que brinda, pues emplea el estiércol generado localmente como fuente de combustible, reduce la emisión de gases efecto invernadero, substituye los combustibles fósiles, genera fertilizantes minerales y presenta una alternativa para la estabilización de residuos potencialmente dañinos para el ambiente. Lo anterior resulta de gran importancia, considerando que Antioquia es el Departamento colombiano con mayor número de cabezas de ganado bovino y porcino, según información reportada en el año 2018 por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.

En el Departamento de Antioquia, el manejo de los cerdos mediante confinamiento posibilita la fácil recolección del estiércol generado, por lo que el subsector porcícola tiene un potencial técnico-energético aprovechable de 1.896 TJ/año, el cual puede oscilar en un rango entre 1.611 y 2.186 TJ/año, correspondiente a un intervalo de confianza del 95%.

El estiércol generado por la actividad ganadera en Antioquia tiene un potencial energético teórico de 8.566 TJ/año, pero como la ganadería en el Departamento se desarrolla principalmente mediante sistemas extensivos de producción, se presenta la diseminación del estiércol por los potreros, lo que dificulta su recolección y aprovechamiento. Por otra parte, el subsector lechero especializado, durante el encierro del ganado para el ordeño, posibilita la recolección del 25% del estiércol, con lo cual se estima un potencial técnico-energético aprovechable de 187 TJ/año, que para un intervalo de confianza del 95% puede generar variación en un rango entre 156 y 236 TJ/año.

En este artículo se decide estimar el potencial técnico-energético aprovechable en lugar del potencial teórico, entendiendo que la primera definición concreta con mayor precisión el potencial energético relacionado a aquella biomasa residual realmente disponible para su valorización energética.

Abstract

In Antioquia (Colombia), pig manure and dairy cattle manure anaerobic digestion offers the possibility of obtaining clean and renewable energy, due to biogas and methane production, fuel with extensive thermal and energy applications.

The use of this residual biomass receives economic, social and environmental value for the solutions it provides, since it uses locally generated manure as a fuel source, reduces the emission of greenhouse gases, replaces fossil fuels, generates mineral fertilizers and stabilizes potentially harmful residues for the environment. This is important because Antioquia is the Colombian Department with the highest number of pigs and dairy cattle, according to information reported in 2018 by the Ministry of Agriculture and Rural Development.

In Antioquia, the pigs confined management makes it easy to collect the generated manure, so the pig sector has an usable technical-energy potential of 1.896 TJ/year, which can range between 1.611 and 2.186 TJ/year, with a 95% confidence interval.

The livestock manure in Antioquia has a theoretical energy potential of 8.566 TJ/year, but this biomass is dispersed in farms because of the extensive production systems, making it difficult to collect and use manure. On the other hand, the specialized dairy sector during milking cows, enables the collection of 25% of the manure, with an usable technical-energy potential of 187 TJ/year, which can range between 156 and 236 TJ/year, with a 95% confidence interval.

In this article, it is decided to estimate the usable technical-energy potential instead the theoretical potential, because the first definition specifies more precisely the energy potential related to that residual biomass actually available for energy recovery.

Palabras clave: potencial energético, digestión anaerobia, biomasa residual pecuaria, gases de efecto invernadero (GEI), porcicultura y ganadería de leche especializada.

Key words: energy potential, anaerobic digestion, livestock residual biomass, greenhouse gases (GHG), pig farming and specialized dairy farming.

3. Introducción

El Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia, publicado en el año 2010 y elaborado por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la Universidad Industrial de Santander (UIS), estima que en Colombia las actividades pecuarias generan 105.418.066

toneladas anuales de estiércol, siendo el Departamento de Antioquia el de mayor aporte con 12.882.917 toneladas por año, generados por el subsector bovino con 11.906.012 toneladas por año, el subsector porcícola con 715.695 toneladas por año y el subsector avícola con 261.210 toneladas por año, lo cual puede tener impactos ambientales importantes considerando que las deyecciones animales producen metano y dióxido de carbono, que son importantes gases de efecto invernadero (GEI) [1].

Para expresar en términos de CO₂ el nivel de calentamiento global que tienen los diferentes GEI, se utiliza el CO₂ equivalente. Por ejemplo, una tonelada de metano (CH₄) es equivalente a 25 toneladas de CO₂ [2].

La porcínaza es uno de los principales residuos asociados a la porcicultura, la cual se genera en grandes volúmenes y tiene características fisicoquímicas y microbiológicas que dificultan su manejo, pero dada la alta concentración de materia orgánica y nitrógeno es usada para la fertilización de pastizales y consecuente alimentación de ganado. Por ello, en Antioquia es común encontrar sistemas productivos acoplados cerdos-pasto-leche. A pesar de lo anterior, la porcínaza fresca al ser un residuo no estabilizado, genera impactos ambientales negativos sobre el aire: contaminación por amoníaco, metano y generación de olores; sobre el suelo: erosión, contaminación y afectación sobre las características físicas y químicas; sobre el agua: contaminación de fuentes superficiales y subterráneas y afectaciones sobre el paisaje [3].

En el caso de la estabilización de biomasa residual del sector pecuario, el Consejo Nacional de Política Económica y Social de la República de Colombia y el Departamento Nacional de Planeación expresan en el documento CONPES 3577 que *“los abonos orgánicos producidos de manera comercial, han estado ligados al aprovechamiento de estiércoles animales obtenidos como subproducto principalmente del sector avícola, conocidos comúnmente como gallinazas. No obstante, estas tienden a ser utilizadas sin ningún tipo de tratamiento (crudas), ocasionando riesgos sanitarios para la salud humana y animal, y de contaminación de suelos con microorganismos perjudiciales”*.

El Instituto Colombiano Agropecuario (ICA), consciente de los beneficios y también de los riesgos de los usos indiscriminados de las gallinazas, a través de la Resolución 1937 de 2003 prohíbe la movilización o comercialización de cama, gallinaza, pollinaza y empaques de alimentos de materia prima sin previo tratamiento o proceso que minimice el riesgo sanitario, o evite la transmisión de agentes patógenos[4].

Por otra parte, el reporte de Colombia presentado en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21), celebrada en París en diciembre de 2015, hace responsable al país del 0,46% de las emisiones de GEI a nivel global, según datos de 2010. A pesar de contribuir

con un porcentaje bajo a nivel mundial en comparación con otros países, las emisiones acumuladas entre 1990 y 2012 sitúan a Colombia entre los 40 países con mayor responsabilidad histórica en la generación de emisiones de GEI, por la contribución de actividades pecuarias, la deforestación, la utilización de medios de transporte, la industria de la generación de energía, la gestión de residuos sólidos, la industria manufacturera, la industria de la construcción y demás procesos industriales [5].

La generación de GEI por la gestión inadecuada de la biomasa residual pecuaria, la tendencia al incremento del consumo energético en los últimos años y la posibilidad de disminuir la dependencia del petróleo como pilar de la economía, han direccionado los esfuerzos de las empresas, el gobierno y la academia hacia el uso de bioenergías, lo que plantea la pregunta investigativa ¿Es posible que el aprovechamiento energético mediante digestión anaerobia de la biomasa residual de los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el Departamento de Antioquia pueda posicionarse como una alternativa energética viable para la región dado su potencial metanogénico?

4. Justificación

El Consejo Nacional de Política Económica y Social (CONPES) actualizó la Política Nacional para la Gestión de Residuos Sólidos a través del documento CONPES 3874 del año 2016, con el fin de aportar a la transición de un modelo lineal hacia una economía circular, a través de la gestión integral de residuos sólidos, esperando la optimización de los recursos para que los productos permanezcan el mayor tiempo posible en el ciclo económico y se aproveche al máximo su materia prima, así como su potencial energético[6]. Para esto, la política se basa principalmente en cuatro ejes estratégicos, enfocados en prevenir la generación de residuos; minimizar aquellos que van a sitios de disposición final; promover la reutilización, aprovechamiento y tratamiento de residuos sólidos y así mismo, evitar la generación de gases de efecto invernadero.

El aprovechamiento energético de la biomasa residual pecuaria en el Departamento de Antioquia mediante digestión anaerobia puede favorecer la disminución de los GEI, lo que contribuye al compromiso nacional adquirido en la vigésima primera reunión de la Conferencia de las Partes (COP 21) de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) en París, donde se estableció una meta de reducción del 20% de las emisiones de gases efecto invernadero con relación a las emisiones proyectadas para el 2030.

En el 2015, el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD-ONU), adoptó la Agenda 2030, la cual incluye 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS), los cuales entraron en vigencia el primero de enero del

2016, con la finalidad de intensificar los esfuerzos para poner fin a la pobreza en todas sus formas, reducir la desigualdad y luchar contra el cambio climático. El ODS 7 se enfoca en el acceso a energía no contaminante, donde la producción de biogás mediante digestión anaerobia de biomasa residual pecuaria puede constituirse en una fuente de energía calórica o eléctrica para comunidades no interconectadas, lo que promueve el objetivo de energía renovable asequible y posibilita que se mejoren las condiciones de vida de las comunidades en el Departamento de Antioquia, dados los usos para la preparación de alimentos, generación de calor e iluminación. Adicionalmente, la gestión adecuada de la biomasa residual generada incide en el logro del ODS 11 respecto del logro de ciudades y asentamientos humanos sostenibles.

En Colombia, el Decreto 1077 de 2015 establece que “Con el objeto de fomentar y fortalecer el aprovechamiento de los residuos sólidos, en condiciones adecuadas para la salud y el medio ambiente, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en coordinación con el Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, con apoyo de la industria y la participación de las universidades y/o centros de investigación y otras entidades estatales, podrán adelantar estudios de valoración de residuos potencialmente aprovechables, con el fin de promocionar la recuperación de nuevos materiales, disminuir las cantidades de residuos a disponer y reunir la información técnica, económica y empresarial necesaria para incorporar dichos materiales a los procesos productivos”.

Para reducir la dependencia de los hidrocarburos como fuente energética, se debe avanzar en la realización de inventarios del potencial de diversas fuentes de energías renovables, con la finalidad de satisfacer las necesidades de la población y permitir el desarrollo sostenible y sustentable. De esta forma, el conocimiento relacionado con el potencial energético de la biomasa residual contribuye a mejorar las acciones para el aprovechamiento eficiente de los residuos sólidos orgánicos con fines energéticos, ligado a beneficios sociales y ambientales como la reducción de emisiones de GEI [1].

5. Objetivos

5.1. Objetivo general

Establecer el Atlas del potencial técnico-energético aprovechable por digestión anaerobia de la biomasa residual pecuaria para los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el departamento de Antioquia.

5.2. Objetivos específicos

Cuantificar teóricamente, mediante información secundaria, la biomasa residual generada por el sector pecuario en los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el departamento de Antioquia.

Estimar el potencial energético obtenido por digestión anaerobia de la biomasa residual objeto de estudio en el Departamento de Antioquia, a partir de información secundaria.

Estructurar una base de datos geográfica que permita la elaboración de mapas del potencial energético de la biomasa residual pecuaria objeto de estudio en el departamento de Antioquia.

6. Estado del arte

6.1. Marco normativo general relacionado con la utilización de energías alternativas en Colombia

Mediante la Ley 697 de 2001 se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, se promueve la utilización de energías alternativas y se definen fuentes no convencionales de energía como la solar, eólica, geotérmica y la biomasa. Respecto a biomasa, la Ley 697 de 2001 especifica que *“Es cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico y toda materia vegetal originada por el proceso de fotosíntesis, así como de los procesos metabólicos de los organismos heterótrofos”*.

La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) expidió la Resolución 135 de 2012, para la adopción de normas aplicables al servicio público domiciliario de gas combustible con biogás. Dicha Resolución define el biogás como la mezcla de gases producto del proceso de descomposición anaeróbica de materia orgánica o biodegradable, cuyos componentes principales son metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y monóxido de carbono (CO), además de lo cual se establece el concepto de biometano, como aquel biogás que se ha sometido a procesos de tratamiento para lograr concentraciones de metano iguales o superiores al 95% y la eliminación de componentes tóxicos.

En la Resolución 153 de 2013 se define el Combustible de Origen Agrícola (COA) como aquellos residuos de procesos agrícolas y plantas cultivadas para ser aprovechadas energéticamente, tales como los cultivos que son aptos para ser utilizados como combustible para la producción de energía eléctrica.

Mediante el Decreto 1258 de 2013, se modifica la estructura de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y se establecen sus funciones, entre las cuales se encuentra la planeación de alternativas para satisfacer los requerimientos energéticos, teniendo en cuenta los recursos convencionales y no convencionales, según criterios tecnológicos, económicos, sociales y ambientales, además de la evaluación de la conveniencia económica, social y ambiental del desarrollo de fuentes renovables y no convencionales de energía y de usos energéticos.

Por su parte, en la Ley 1715 del 2014 se regula la integración de energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, considerando el aprovechamiento de residuos sólidos como una posible fuente de energía.

El Plan Nacional de Desarrollo 2014-2018, adoptado mediante la Ley 1753 de 2015, en su política de crecimiento verde establece la promoción de actividades y productos que contribuyan con el desarrollo sostenible.

El Decreto 1077 de 2015 define el aprovechamiento de residuos sólidos como la actividad complementaria del servicio público de aseo que comprende la recolección de residuos aprovechables, el transporte selectivo hasta la estación de clasificación y aprovechamiento o hasta la planta de aprovechamiento, así como su clasificación y pesaje por parte de la persona prestadora.

De forma complementaria, el CONPES 3874 de 2016, promueve el uso de residuos conforme a su jerarquización y valorización energética, incluyendo el uso de la fracción orgánica para generar biogás. Posteriormente se expide el Plan de Acción Sectorial del CONPES 3874 de 2016, el cual promueve la gestión integral de residuos sólidos y la coordinación entre los actores clave y medidas necesarios para garantizar la disponibilidad de la materia prima para generar energía a partir de residuos sólidos.

Acorde al contexto definido por la reglamentación mencionada anteriormente, la CREG publica la Resolución 240 de 2016 *“Por la cual se adoptan las normas aplicables al servicio público domiciliario de gas combustible con biogás y biometano”*. Esta resolución aplica a las actividades desde la producción, transporte, distribución y comercialización del servicio público domiciliario de gas combustible con biogás y biometano que realicen las personas autorizadas con base en lo dispuesto por el artículo 15 de la Ley 142 de 1994. En la Resolución también se establecen las condiciones de calidad y seguridad, así como las condiciones tarifarias para desarrollar la prestación de servicios domiciliarios de gas combustible con biogás y biometano.

En resumen, el marco normativo anteriormente citado fomenta el aprovechamiento de biomasa para su valorización energética en el territorio nacional colombiano, por lo que cobra importancia la estimación del potencial técnico-energético aprovechable por digestión anaerobia de la biomasa residual pecuaria para los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el departamento de Antioquia.

6.2. Biomasa

El concepto de biomasa ha presentado cambios a lo largo del tiempo. La definición de biomasa acogida por la Real Academia Española (RAE) en el

año 2001 era *“f. Biol. Materia total de los seres que viven en un lugar determinado, expresada en peso por unidad de área o de volumen”*. Sin embargo, en el año 2014, debido quizá a la disminución de los combustibles fósiles y a la necesidad de inclusión de energías renovables, este concepto amplió su visión netamente ecológica hacia el tema energético, por lo que la RAE, además de la primera definición, también presentó la biomasa como *“f. Biol. Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía.”*

De esta forma, el término biomasa, desde su posibilidad de aprovechamiento como recurso energético, comprende toda la materia orgánica que, de acuerdo a sus características físicas y químicas, puede transformarse en biocombustibles, mediante diferentes procesos y tecnologías. La biomasa como recurso está inmersa en el área de las energías renovables por considerarse parte del flujo cíclico de la naturaleza proviniendo del proceso de conversión fotosintético [1].

Una de las formas de clasificar la biomasa es desde su origen natural, residual o de cultivos energéticos. La biomasa de origen natural se compone por aquellos recursos generados espontáneamente por la tierra sin la intervención del hombre, como por ejemplo los bosques. La biomasa de tipo residual está representada por residuos de cosechas, estiércol de animales, residuos de podas verdes, residuos sólidos orgánicos urbanos, residuos de plazas de mercado y diversos residuos comerciales e industriales, entre otros. Por otra parte, la biomasa proveniente de cultivos energéticos está asociada con aquellos recursos obtenidos de plantaciones realizadas exclusivamente con el propósito de servir como fuente energética [7].

6.3. Relación entre biomasa, biorefinería y digestión anaerobia

La Agencia Internacional de Energía (International Energy Agency - IEA) fue creada en 1974 en el marco de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) para implementar un programa energético internacional, luego de lo cual apareció en el año 1978 la Agencia Internacional de Bioenergía (IEA Bioenergy), con la finalidad de mejorar la cooperación y el intercambio de información entre países con programas nacionales de investigación y desarrollo en bioenergía.

Entre los objetivos de la Agencia Internacional de Bioenergía se encuentra la contribución sustancial de la bioenergía a las futuras demandas mundiales de energía, la reducción de GEI y el uso de bioenergía sostenible en términos ambientales, sociales y económicos. Esta agencia desarrolló una definición de biorefinería, descrita como el procesamiento sostenible de la biomasa en un espectro de productos comercializables y energía. Expresado en otros términos, la biomasa se utiliza de forma sostenible como recurso para producción de calor, electricidad, combustibles, productos químicos y materiales [8].

De acuerdo con la definición anterior, la digestión anaerobia de biomasa residual puede considerarse como un ejemplo de biorefinería, pues a partir del procesamiento sostenible de biomasa, se obtiene biogás, que mediante acondicionamiento físico químico permite la obtención de metano, combustible con diversas aplicaciones energéticas mecánicas, térmicas o eléctricas, con las ventajas sociales, ambientales y económicas que eso implica.

6.4. Estudios iniciales sobre digestión anaerobia

Desde hace varios siglos se sabe que el gas combustible se genera por la descomposición de materiales orgánicos. Por ejemplo, en el siglo XVII, Van Helmont registró que el material orgánico en descomposición produce gases inflamables. En 1776, Volta resolvió que había una conexión directa entre la cantidad de material orgánico que se usaba y la cantidad de gas producido por el material. La presencia de metano, compuesto químico de alto contenido energético, en el gas combustible se estableció por el trabajo de John Dalton y Humphrey Davy, el cual se realizó entre 1804 y 1808 [9].

Antoine Béchamp en el año 1868 reportó que la formación de metano durante la descomposición de la materia orgánica se debe a procesos microbiológicos, mientras que Omelianski logró probar que durante la fermentación metánica de la celulosa se genera hidrógeno, ácido acético y ácido butírico, para finalmente formar metano. Las observaciones de Béchamp, y los resultados obtenidos por Omelianski, permitieron a Sohngen llevar a cabo una serie de experimentos en los cuales estudió la producción de metano a partir de sustratos puros como el formiato, el acetato, el butirato, el etanol y una mezcla de hidrogeno y dióxido de carbono similar a la obtenida durante la descomposición anaerobia de la celulosa. Los resultados permitieron concluir que estos sustratos son compuestos intermediarios generados durante la fermentación metanogénica de la celulosa[10].

En 1936, Barker anunció el primer aislamiento en cultivo puro de un metanógeno, señalando la capacidad de esta bacteria para oxidar el etanol a acetato, y basado en la teoría de la reducción del dióxido de carbono desarrollada por Van Niel en 1934, planteó que los electrones generados durante la oxidación son utilizados para reducir los iones de la molécula de bicarbonato, los cuales actúan como aceptores finales de electrones. Posteriormente en 1948, Buswell y Sollo, demostraron que la formación de metano a partir de la molécula de acetato no ocurre por reducción del dióxido de carbono, sino por la descarboxilación de este compuesto. Este hecho fue verificado por Stadman y Barker en 1949, y posteriormente por Pine y Barker en 1956, confirmando la hipótesis formulada por Sohngen. Con el desarrollo de nuevos procedimientos para el cultivo de microorganismos anaerobios estrictos se inicia una nueva era en las investigaciones sobre metanogénesis [10].

De forma general, se denomina digestión anaerobia al proceso por el cual la materia orgánica se convierte en metano, dióxido de carbono e hidrógeno, en ausencia de oxígeno y a causa de la acción combinada de diferentes poblaciones bacterianas. La formación de metano y dióxido de carbono corresponde a la última etapa de una serie de reacciones en las cuales los compuestos orgánicos son degradados. El producto final del proceso es la producción de biogás que se puede aprovechar como energía renovable y un digestato rico en nutrientes (biosólido) que puede utilizarse en algunos casos como fertilizante [11].

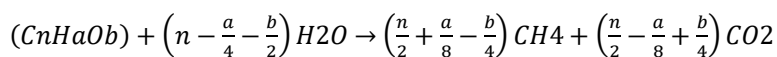
Lo anterior destaca el papel de la digestión anaerobia como fuente de energía renovable, para satisfacer las necesidades de nutrientes y materia orgánica por parte del suelo, y para el suministro estable y constante de combustible para la generación de electricidad, calor o combustible. La digestión anaerobia tiene un rol importante porque el proceso y los productos atienden las necesidades de gestión de residuos, energía, salud del suelo, calidad del agua y reducción de gases de efecto invernadero [12].

6.5. Digestión anaerobia y Potencial Bioquímico de Metano (BMP)

El potencial metanogénico de la biomasa se determina para conocer si la biodegradabilidad de un sustrato es apropiada para la digestión anaerobia, para argumentar la viabilidad de la tecnología en proyectos de desarrollo económico o para estimar el potencial energético de los residuos orgánicos disponibles en una determinada zona geográfica.

Si se conoce la fórmula elemental básica de un sustrato ($C_nH_aO_b$), se puede estimar el potencial máximo de biogás y el contenido de metano de acuerdo con la ecuación propuesta por Buswell y Hatfield en 1936, como se aprecia en la Ecuación 1. El rendimiento máximo de biogás estimado por esta metodología a menudo resulta demasiado optimista, dado que no considera materiales no biodegradables ni la demanda de energía de los microorganismos [12].

Ecuación 1



Con la finalidad de cuantificar de forma más aproximada la degradabilidad anaeróbica de un tipo de biomasa y su posible rendimiento metanogénico, se estableció un ensayo de laboratorio consistente en un test por lotes (batch) que se denomina Potencial Bioquímico de Metano – BMP (por sus siglas en inglés), en el cual se evalúa el potencial metanogénico de una biomasa objeto de estudio (sustrato).

El BMP consiste en un proceso de digestión discontinuo, donde el digestor se llena una única vez con el sustrato estudiado, un inóculo y una solución de nutrientes, para que en condiciones de operación definidas, se produzca

el proceso de biodegradación hasta completar la biodigestión y el gas desprendido se cuantifica mediante una medición específica (volumétrica y cromatográfica) hasta que su producción termina [13].

La curva de producción de gas durante el BMP es usualmente modelada usando la ecuación de primer orden, como se muestra en la Ecuación 2.

Ecuación 2

$$Y = Y_{max} * (1 - e^{-kt})$$

Donde

Y = rendimiento acumulativo de metano en el momento t

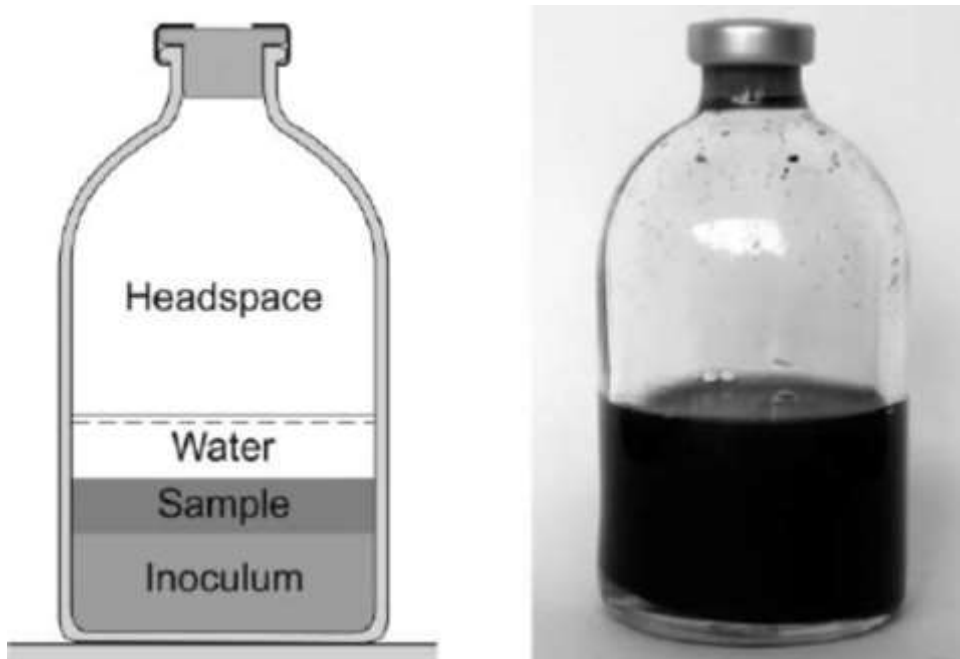
Y_{max} = rendimiento máximo de metano

K = constante de primer orden

En muchos casos, la Ecuación 2 solo proporciona resultados moderadamente buenos, debido quizá a la heterogeneidad de los substratos, compuestos por algunos materiales de rápida degradación y también por otros de degradación lenta [12].

Para configurar la prueba de BMP, se realiza el pesaje de substrato e inóculo, llenando con ellos un recipiente hermético con capacidad de 0,5 a 1 litro, se agrega un agitador magnético para mezclar y, la fase gaseosa se reemplaza con un gas inerte como el nitrógeno antes de cerrar el recipiente. Luego el recipiente se coloca en una cámara climática o en un baño de agua. Inicialmente la medición de biogás debe realizarse diariamente en intervalos cortos de tiempo cada tres (3) horas, pero después de la disminución en la producción de biogás, el volumen se puede leer en intervalos más largos (dos o tres veces por semana). La mayoría del biogás se produce normalmente durante la primera semana. Después de 20-30 días, la degradación biológica entra en una fase estacionaria donde la población bacteriana experimenta una reducción debido al agotamiento de los materiales biodegradables. Posteriormente, el proceso entra en la fase de declinación o muerte de la mayoría de las bacterias [12].

Imagen 1. Recipiente de ensayo para prueba de biodegradabilidad anaeróbica.



Fuente: Defining the Biomethane Potential (BMP) of Solid Organic Wastes and Energy Crops: A Proposed Protocol for Batch Assays [14]

Durante la ejecución del ensayo BMP, es recomendable que la relación de sólidos volátiles del inóculo sea mayor que la del sustrato (biomasa) para minimizar la acidificación o problemas de inhibición. Por lo tanto, la relación sustrato/inóculo (S/I) basada en sólidos volátiles debe estar entre 2 y 4 para la mayoría de los casos. Para sustratos fácilmente biodegradables, donde la rápida acumulación de compuestos intermedios como los ácidos grasos volátiles, podría conducir a la inhibición de la digestión anaeróbica, se debe aplicar una relación S/I mayor o igual a cuatro. Para sustratos menos degradables, como la materia orgánica lignocelulósica, se puede aplicar una relación S/I menor o igual a uno. Para sustratos relativamente desconocidos o si existe una posible preocupación acerca de la inhibición debida al sustrato, se recomienda probar varias relaciones S/I (por ejemplo, tres o cuatro relaciones S/I distintas), y solo si dos relaciones S/I conducen al mismo BMP, se puede suponer que no hubo sobrecarga ni tampoco inhibición [15].

Para la realización de las pruebas de BMP, todos los ensayos deben realizarse por triplicado, se debe establecer blancos por triplicado con inóculo solamente (producción de metano de fondo generado a partir del inóculo), se recomienda realizar controles positivos con celulosa micro cristalina y tributirina, la duración de las pruebas de BMP no debe fijarse por adelantado y las pruebas solo deben darse por terminadas cuando la producción diaria de metano durante tres días consecutivos sea inferior al 1% del volumen acumulado de metano y los resultados del ensayo de BMP deben expresarse como el volumen de gas metano seco bajo condiciones

estándar (273.15 K y 101.33 KPa) por masa de sólidos volátiles (SV) agregada, con unidades de $\text{NLCH}_4/\text{Kg SV}$. El BMP del sustrato se determina restando la producción de metano de los blancos (producción endógena del inóculo) de la producción bruta de metano de los ensayos de sustrato, que deben ser realizados por triplicado.

El inóculo para el ensayo de BMP debe tomarse de un digestor anaeróbico activo que digiera materia orgánica compleja y se encuentre en estado estable en el momento del muestreo. Esto proporciona una comunidad microbiana altamente diversa capaz de digerir una gran variedad de moléculas orgánicas. La temperatura de ensayo de BMP, mesofílica o termofílica, suele ser la misma que la temperatura de funcionamiento del digestor de inóculo. El lodo anaeróbico de los digestores de plantas de tratamiento de aguas residuales y el digerido de plantas agrícolas que tratan el estiércol como materia prima principal se utilizan con frecuencia y pueden recomendarse como fuentes de inóculo. Una alternativa al uso de un inóculo específico es mezclar inóculos de diferentes fuentes para aumentar la diversidad de la comunidad microbiana. No es necesario que el inóculo se adapte específicamente a los sustratos a probar, pero si hay acceso a dicho inóculo, la adaptación del mismo puede acortar la duración de la prueba [15].

6.6. Potencial energético de la biomasa residual

Dependiendo de la materia orgánica de origen, el biogás puede contener 45 - 70% de metano (CH_4), 30 - 55% de dióxido de carbono (CO_2) y trazas de otros componentes. Cuando la cantidad de metano en el biogás se encuentra entre 55 y 65%, el valor calórico del biogás oscila entre 19,7 y 23,3 MJ/m^3 . Este valor calórico está típicamente entre el 50 y el 70% del poder calórico del gas natural de calidad comercial de 31,6 – 39 MJ/m^3 , que depende de la fuente y la composición del biogás. El poder calórico es la variable que permite cuantificar la energía liberada en los procesos de combustión de la materia.

No se tiene una composición particular del biogás para el estiércol bovino o porcino, sino que ésta depende de las características de los estiércoles al momento de su recolección. A su vez, las características de los estiércoles pueden deberse al clima del sitio de muestreo (humedad), la cantidad y composición del alimento[16].

Las características de los estiércoles también están influenciadas por factores intrínsecos al animal como la fisiología digestiva, la composición de la dieta, la etapa de crecimiento y el sistema de manejo. El contenido de sólidos volátiles orgánicos (grasas, carbohidratos y proteínas) representa el material disponible para el desarrollo y reproducción de bacterias anaeróbicas. El contenido de materia volátil junto con el de carbono fijo, son los parámetros influyentes en la transformación energética de la biomasa[1].

Por otro lado, el biogás tiene numerosas aplicaciones de uso final en comparación con otros recursos de energía renovable. Tradicionalmente, el biogás se ha utilizado como combustible en calderas para producir calor o para cogeneración de calor y energía eléctrica en plantas de generación combinada de calor y electricidad. Las aplicaciones de cogeneración están aumentando a nivel global, ya que proveen mayor eficiencia energética pues además de generar electricidad utilizan el calor recuperado; para esta tecnología se utilizan generalmente motores de combustión interna, turbinas de gas o micro-turbinas, mientras que es menos común la generación de electricidad a través de sistemas caldera-turbina de vapor ya que resultan más eficientes en proyectos de producción de electricidad a gran escala [17].

El biogás se puede utilizar de varias maneras, ya sea como biogás en bruto o biometano mejorado. El desafío con el uso de biogás como combustible es la necesidad de que la limpieza del biogás cumpla con los requisitos de calidad para los equipos térmicos que lo utilizan. El uso de biogás no tratado puede aumentar los requisitos de mantenimiento del equipo alimentado por el biogás y puede reducir su vida útil. Como requisito previo para la utilización efectiva del biogás, se debe realizar enfriamiento, remoción de vapor de agua para reducir la humedad y remoción de H_2S usualmente [12].

El biogás puede emplear la misma infraestructura que el gas natural fósil y utilizarse para los mismos fines. Un ejemplo de ello es la utilización de biogás como combustible vehicular empleando los mismos motores de combustión interna, pero siempre y cuando tengan acoplada la tecnología GNV (Gas Natural Vehicular).

Para que el biogás se use como combustible en motores de combustión interna, es favorable utilizarlo con un alto contenido de energía, limpio y mejorado. Sin embargo, una menor concentración de metano podría funcionar desde el punto de vista técnico. El agua en el biogás puede causar problemas; por ejemplo, puede congelarse y obstruir el sistema cuando cae la presión. El dióxido de carbono puede tener un efecto corrosivo, pero solo en combinación con agua; lo cual aplica también para el sulfuro de hidrógeno. Algunas plantas de tratamiento del biogás instalan filtros para remover partículas con la finalidad de proteger el sistema de fenómenos de abrasión [17].

Existen diferentes estándares para el uso de biogás como combustible vehicular. Suecia tiene un estándar específico para utilización de biogás como combustible vehicular denominado SIS, emitido en el año 1999, el cual regula el contenido de metano, sulfuro de hidrógeno y agua. En Estados Unidos se utiliza el estándar SAE International del año 1994, en Suiza el ISO del 2006 y en Alemania el estándar DIN del año 2008 [12].

6.7. Estudios de estimación del potencial energético de la biomasa residual

Se estima que la biomasa residual y las tierras no utilizadas en las que se pueden sembrar cultivos energéticos, ofrecen una enorme reserva sin explotar de biomasa a escala mundial. Para Europa, incluyendo la Unión Soviética, se ha calculado que para el año 2020 se podrían producir 250 mil millones de metros cúbicos de metano a partir de materia prima digerida, lo que sería suficiente para cubrir el 50% del consumo actual de gas de origen fósil en los 28 estados miembros de la Unión Europea [12].

Se investigó el potencial energético de biomasa no plantada compuesta por residuos primarios, residuos secundarios y de procesamiento, estiércol animal, residuos sólidos municipales y madera combustible, estimando que el potencial de la biomasa objeto de estudio podía suplir el 17, 45, 34, 33 y 14% del consumo total de energía proyectado para 2010 en los países de China, India, Filipinas, Sri Lanka y Tailandia respectivamente [18].

Otro estudio determinó el potencial energético de residuos de cultivos y estiércoles animales mediante digestión anaerobia para áreas rurales en los países de Bangladesh, India, Nepal, Pakistán y Sri Lanka, hallando un potencial de producción de electricidad anual de 680 kWh, 820 kWh, 720 kWh, 1200 kWh y 480 kWh por hogar rural respectivamente. El estudio consideró que la utilización de los residuos analizados es atractivo desde el punto de vista financiero para la generación de electricidad [19].

En el año 2008 la Secretaría General de Agricultura y Pesca estimó el potencial energético de la biomasa residual agrícola y ganadera en Andalucía (España), mientras que para Navarra se mapeo el potencial de producción de energía de la agricultura y los residuos forestales en esta región, utilizando herramientas de sistemas de información geográfica. El aprovechamiento de dicho potencial, que equivaldría al 14,25% del consumo de energía primaria registrado en Andalucía en el año 2006, supondría sustituir el 14,9% del consumo de energía primaria procedente de fuentes de energía convencionales en dicho año, aunque se debe tener en cuenta, como se ha mencionado anteriormente, que solo una parte de dicho potencial sería aprovechable desde un punto de vista técnico, económico y medioambiental. Si se aprovechara todo el potencial estimado para la producción de energía eléctrica se generarían 7.287 GWh anuales, lo que equivaldría al consumo doméstico de electricidad de una población de 4.717.717 habitantes [20].

El Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, El Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT), el Ministerio de Energía, Turismo y Agenda Digital y el Gobierno de Navarra, desarrollan una investigación aplicada en energías renovables y presta soporte tecnológico a empresas e instituciones energéticas en diferentes áreas,

entre las que se encuentra la biomasa y la integración en red de la energía. Esta iniciativa ofrece la evaluación del potencial de biomasa en un área, análisis logístico de abastecimiento de biomasa, desarrollo de cultivos energéticos para la producción de biocombustibles y estudios de sostenibilidad.

En Tanzania (África), se utilizó la simulación Monte Carlo para estimar la cantidad de residuos disponibles de cultivos de trigo, arroz, maíz, yuca, tubérculos, caña de azúcar, frijoles, semillas de algodón y semillas oleaginosas, además de la biomasa procedente de estiércol de ganado vacuno, ovejas, cabras, cerdos y aves de corral (pollos y patos), con la finalidad de cuantificar la cantidad de energía que puede generarse. Los resultados demostraron que la apropiada utilización de estos residuos permite el acceso a la energía, lo que a su vez tiene una contribución significativa a las dimensiones sociales, económicas y ambientales del desarrollo humano, además de lo cual se contribuye a reducir el consumo de combustibles fósiles y el calentamiento global [21].

El Instituto de Recursos Naturales de Finlandia, el Instituto de Medio Ambiente de este mismo país, Tapio (consultores), la Universidad de Finlandia Oriental y la Universidad de Vaasa, con fondos del Ministerio de Agricultura y Silvicultura, tienen a disposición un atlas de la biomasa de Finlandia, de forma que este servicio permite a los usuarios calcular la cantidad de biomasa en cualquier área geográfica dentro de Finlandia, así como el examen de las oportunidades para utilizar la biomasa y las restricciones en su uso. La interfaz de usuario del mapa permite observar y analizar la biomasa de la silvicultura, la agricultura y los residuos orgánicos de las comunidades y la industria. La información disponible sirve de apoyo a las decisiones de inversión y el uso sostenible de los recursos naturales, así como ayudar a los responsables de la toma de decisiones a crear políticas energéticas sostenibles. Desde el año 2017 se está desarrollando una versión del Atlas de Biomasa en cooperación con el proyecto Baltic Forbio, para desarrollar el concepto de Atlas de Biomasa para Suecia y los Estados Bálticos [22].

La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) durante el año 2003, realizó el estudio *“Potencialidades de los cultivos energéticos y residuos agrícolas en Colombia”*, en el cual se reportan 29 millones de toneladas anuales de biomasa residual agrícola, procedentes de bagazo de caña de azúcar y panelera, de cascarilla de arroz, fibra del cocotero, pulpa de café, palma de aceite, frijol y cebada; los cálculos indican que esta biomasa puede tener un potencial energético teórico aproximado de 11.828 MW/hora-año, pero es necesario mencionar que el potencial técnico-energético es mucho menor, pues corresponde a una fracción del potencial teórico disponible y se relaciona con las condiciones y limitaciones actuales para la gestión de dicha biomasa residual en Colombia.

El IDEAM, la UPME y la UIS, publicaron en el año 2010 el *“Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia”*, en el cual se encuentran un conjunto de mapas que presentan la cantidad de biomasa residual en Colombia y su respectivo potencial energético, cuya estimación se realizó para ocho cultivos agrícolas (palma de aceite, caña de azúcar, caña panelera, café, maíz, arroz, banano y plátano), tres especies pecuarias (bovinos, porcinos y aves) y los residuos sólidos orgánicos urbanos provenientes de las plazas de mercado de 12 ciudades. El Atlas presenta el potencial energético anual por unidad de área, calculado mediante el diseño de modelos matemáticos específicos. En el Atlas se estima que el sector pecuario en Colombia tiene un potencial energético de 117.747,9 TJ/año, aportados por la actividad bovina (84.256,34 TJ/año), avícola (29.183,1 TJ/año) y porcina (4.308,46 TJ/año). Para el caso específico del Departamento de Antioquia, se calculó un potencial energético de 11.995,27 TJ/año para el sector pecuario, procedentes de la actividad bovina (8.835,93 TJ/año), avícola (1.877,40 TJ/año) y porcina (1.281,93 TJ/año).

En el año 2014 se presentó una metodología para estimar el potencial energético teórico y técnico de la biomasa en Colombia mediante análisis estadístico utilizando el algoritmo Monte Carlo, el cual resulta conveniente para países con calidad y disponibilidad de información limitada. La metodología propuesta también incluye un enfoque para cuantificar la incertidumbre combinando una propagación probabilística de la incertidumbre, un análisis de sensibilidad y un conjunto de sub-modelos desagregados para estimar la confiabilidad de las predicciones y reducir la incertidumbre asociada [23].

En el año 2017 se suscribió el contrato 001 entre la UPME y la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) sede Bogotá, para desarrollar el proyecto “Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en Colombia y su aprovechamiento”, cuyo objetivo es la identificación de los distintos tipos de biomasa residual disponible para la producción de biogás y, estimar el potencial de producción de biogás de fuentes promisorias; así como realizar análisis económico de establecimiento de proyectos para producción de biogás y su eventual mejoramiento a biometano. Para este proyecto se seleccionó buena parte de la biomasa residual estudiada en el Atlas del potencial energético realizado por la UPME y la UIS en el año 2010, pero se adicionaron los lodos de planta de tratamiento de agua residual y residuos industriales de los subsectores lácteos (grasas y lodos), cervecería (lodos), destilería (vinazas) y contenido ruminal generado en plantas de sacrificio animal.

Es importante aclarar que el Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia publicado en el año 2010 solamente estima el potencial teórico de la biomasa residual analizada, mientras que el proyecto

desarrollado por la UPME y la UNAL en el año 2017 estima el potencial factible o técnico a nivel nacional de biogás, aplicando restricciones técnicas relativas a la disponibilidad de la biomasa. Por ejemplo, en el caso del subsector avícola, se excluyeron las aves traspatio y las gallinas ponedoras por oferta una vez al año de gallinaza, en el subsector porcícola se descontaron los animales traspatio y se tomaron los departamentos que representan el 72% de la oferta en porqueriza, mientras que en el subsector bovino se tomó el 1% del 60% de la oferta nacional como cabezas estabuladas[24].

Por otra parte, en el año 2018 se suscribió el contrato C-034 entre la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la consultora especializada Inerco, con el objetivo de desarrollar un modelo que permita establecer la viabilidad técnica, ambiental, financiera y económica de proyectos replicables en diferentes sectores, municipios, regiones y con diversos tipos de residuos, evaluando la generación de energía a partir de biomasa residual y la generación de biogás a partir de residuos de biomasa, residuos sólidos urbanos y lodos de planta de tratamiento de agua residual.

6.8. Biomasa residual objeto de estudio

El presente estudio se enfoca en el sistema ganadero de leche especializada, pues su proceso productivo implica actividades de semiestabulación o al menos confinamiento temporal de los animales durante dos (2) veces al día, lo que permite la recolección de un porcentaje del estiércol.

La permanencia del ganado durante un tiempo a lo largo del día en el interior del establo facilita la recogida del estiércol, de forma que se puede estimar un porcentaje de recogida del 25% del total del estiércol producido diariamente por los animales[25].

La selección del subsector porcícola en Antioquia se debe a las facilidades de recolección del estiércol, pues aproximadamente el 86,33% de los animales se concentran en granjas tecnificadas, mientras que el 13,67% corresponden al sistema productivo de cerdos traspatio, de acuerdo con el censo realizado por el ICA en el año 2018. Según lo anterior, el presente estudio se enfoca exclusivamente en la biomasa residual pecuaria de los subsectores porcícola y ganadero de leche especializada, es decir, el estiércol generado durante el proceso productivo de estos dos (2) subsectores.

A continuación, se enuncia la biomasa residual que no será tenida en cuenta como objeto de estudio en el presente trabajo:

- Subsector ganadero de carne: no se incluye pues esta actividad productiva se desarrolla usualmente mediante sistemas extensivos de producción, lo que implica que el ganado se encuentra disperso

en potreros, al igual que su estiércol, lo que dificulta su recolección y transporte hasta el lugar de realización de la digestión anaerobia, razón por la cual se decidió no incluir la biomasa residual del subsector ganadero de carne dentro de los objetivos del estudio.

- Subsector ganadero de doble propósito: no se incluye como biomasa objeto de estudio aquella generada por las ganaderías de doble propósito, pues en algunos casos se presenta implementación de sistemas extensivos de producción, se desarrollan prácticas de ordeño de vacas directamente en los potreros y en otros casos se observa frecuencia de un (1) solo ordeño diario al interior de establos, lo que implica que la mayor parte del estiércol queda diseminado en los potreros y un bajo porcentaje puede ser recogido en el corral o establo.

6.9. Sistemas productivos ganaderos y porcícolas

La ganadería bovina forma parte de la actividad económica del sector primario que desarrolla la cría, el tratamiento y la reproducción de ganado bovino, para obtener productos importantes para la alimentación y la industria de vestuario y calzado.

De manera general, en la ganadería bovina se presentan tres (3) tipos de sistemas productivos, el primero de ellos dedicado a la producción de carne, el segundo denominado sistema doble propósito (carne y leche) y el tercer tipo dedicado a la obtención de leche.

En Colombia se tienen definidos dos sistemas de producción de leche: lecherías especializadas y lecherías doble propósito. La lechería especializada se encuentra principalmente en regiones de trópico alto como los altiplanos cundiboyacense y nariñense y la región norte de Antioquia, con alta utilización de insumos como fertilizantes, riegos y suplementos alimenticios, uso intensivo de la tierra y producción con razas lecheras especializadas Bos Taurus. Por otra parte, la ganadería de doble propósito corresponde a un sistema tradicional orientado a la producción de carne y leche, que se adelanta con animales mestizos obtenidos a partir del cruce de diferentes razas. En Colombia las ganaderías de doble propósito se localizan principalmente en zonas del trópico bajo con alturas entre 0 y 1.000 msnm, como los valles de los ríos Magdalena y Cauca, la Costa Atlántica y los Llanos Orientales, con sistemas extensivos de producción, baja utilización de insumos y producción con razas Bos indicus y mestizaje con Bos taurus, en algunos casos [19].

De manera general en Colombia la ganadería de carne y doble propósito se desarrolla mediante sistemas extensivos de producción, de manera que se realiza en terrenos de gran extensión para que dichos animales puedan

pastar. Usualmente estas extensiones de tierra corresponden a ecosistemas naturales modificados por el ser humano, con una producción vegetal para la alimentación del vacuno, con lo que se les permite el pastoreo por el área disponible para que de esta forma se encarguen de recolectar su propio alimento.

Por otra parte, la porcicultura consiste en la cría, reproducción y explotación de los cerdos, desde el cuidado genético, la nutrición, el manejo, y la sanidad para producir carne de cerdo de la mejor calidad para el consumo humano.

El cerdo es una de las especies domesticas más susceptibles a factores externos, como la temperatura y la higiene, requiriendo para su óptimo desarrollo y de acuerdo con su ciclo productivo temperaturas entre los 14 a 22 °C, así como una constante limpieza de las instalaciones que habita. Estas necesidades hacen que su crianza muy pocas veces se realice al aire libre o en extensos terrenos, considerándose por tanto como una ganadería de tipo intensiva, permaneciendo confinados los animales en áreas inferiores a los 2,5 m² por cabeza. El espacio reducido en el que se desarrolla este sector propicia la recolección de una mayor cantidad de los residuos producidos [5].

La porcicultura industrializada o tecnificada es aquella en la que se utilizan avances tecnológicos, de manejo, nutrición, sanitarios y genéticos; entre éstos se encuentra un control estricto de los animales. En este tipo de sistema productivo los animales se manejan en confinamiento, el manejo está preestablecido, se emplea inseminación artificial como método reproductivo, la alimentación consiste en dietas balanceadas, concebidas para animales en diferentes estadios fisiológicos y se ofrecen en forma automatizada y son elaboradas en la misma granja. El manejo zoonosológico en la mayoría de los casos es preventivo, mediante estudios epidemiológicos, medidas de bioseguridad y de inmunización; se emplean como reproductores líneas genéticas de un sólo origen mejoradas mediante una selección previa del material genético dependiendo del fin zootécnico productivo deseado [20].

6.10. Ganadería lechera y porcicultura en el Departamento de Antioquia

En el Departamento de Antioquia es común encontrar cerdos en predios de tipo familiar, manejados mediante sistemas productivos a pequeña escala, que para efectos del presente estudio se denominarán cerdos traspatio.

De acuerdo con la guía ambiental para el subsector porcícola, desarrollada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), la Sociedad Colombiana de Agricultores (SAC) y la Asociación Colombiana de Porcicultores (ACP) en el año 2002, en el territorio nacional colombiano se establecieron las primeras granjas porcícolas de carácter empresarial hacia

el año de 1950, pero solo a partir de la década de los 70 y comienzos de los 80, es cuando se empieza a desarrollar esta industria en Colombia. Se establecen granjas de gran tamaño, las cuales manejan razas de animales importados y se da un gran desarrollo en la industria en el departamento de Antioquia.

La industria porcícola a partir de los años 80 pasó de ser una producción dependiente del suelo a un proceso intensivo y tecnificado con tendencias de crecimiento exponencial en el número de animales por sistema productivo.

Uno de los principales residuos asociados a la porcicultura es la porcínaza, la cual es generada en grandes volúmenes y tiene características físico químicas y microbiológicas que dificultan su manejo, pero dada la alta concentración de materia orgánica y nitrógeno es usada para la fertilización de pastizales y consecuente alimentación de ganado. En el Departamento de Antioquia es común encontrar sistemas productivos acoplados cerdos-pasto-leche. Sin embargo, la porcínaza fresca no estabilizada genera impactos ambientales negativos, malos olores, amoníaco, metano, contaminación del suelo, afectación del agua superficial y subterránea, además de afectaciones sobre el paisaje. La digestión anaerobia puede emplearse como un proceso de estabilización de la porcínaza con la generación de un efluente de olor reducido, con mayor concentración de nitrógeno, menor relación carbono-nitrógeno, ausencia de enterobacterias y *Salmonella* sp, que puede ser dosificado y aplicado como fertilizante de pastizales para el alimento de ganado lechero. La implementación de digestión anaerobia adiciona valor a la porcínaza y trae beneficios ambientales al agro ecosistema, de manera que la recuperación de residuos y energía es una alternativa para el avance de los sistemas porcícolas hacia sistemas productivos de base agro ecológica[3].

En el Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia del año 2010 se reportaron para el Departamento de Antioquia un total de 2.655.856 reses de diferentes edades, además de 1.072.601 cerdos de diferentes grupos etarios. El número de animales se incrementó para el año 2018 de acuerdo con la información del Censo pecuario realizado por el ICA, donde se muestra un valor de 3.038.779 cabezas para el ganado vacuno y 1.855.405 de cerdos.

De acuerdo con información de las Evaluaciones Agrícolas por Consenso, las Unidades Municipales de Asistencia Técnica Agropecuaria (UMATAS) y el Ministerio de Agricultura 2018, en el Departamento de Antioquia se tienen 182.166 vacas destinadas a sistemas especializados de producción de leche, 122.728 semovientes se dedican a sistemas tradicionales de ordeño y 193.264 animales se emplean en sistemas de lechería de doble propósito. En la Tabla 1 se presenta la distribución del ganado dedicado a

lechería especializada en cada una de las 9 subregiones del Departamento de Antioquia.

Tabla 1. Distribución de semovientes destinados a lechería especializada por subregiones

SUBREGIÓN	VACAS POR ORDEÑO
Subregión Norte	150,347
Subregión Oriente	16,559
Subregión Valle de Aburrá	6,991
Subregión Occidente	5,598
Subregión Suroeste	1,581
Subregión Nordeste	850
Subregión Magdalena Medio	240
Subregión Urabá	0
Subregión Bajo Cauca	0
TOTAL ANTIOQUIA	182,166

Según la información reportada en la Tabla 1, la subregión norte de Antioquia recoge el 82,53% del ganado dedicado a lechería especializada, seguido por la subregión oriente con el 9,09%, el Valle de Aburrá con el 3,84% y la subregión occidente con 3,07%. Las demás subregiones tienen participación porcentual inferior al 1% respecto de animales destinados a sistemas productivos de lechería especializada.

Antioquia posee 9 subregiones, siendo las subregiones Norte y Oriente donde se encuentra la lechería especializada. De esta forma, en Antioquia se cuenta con dos cuencas lecheras bien definidas en la jurisdicción de CORANTIOQUIA, siendo la subregión del altiplano Norte la de mayor producción de leche[26].

En el Norte de Antioquia se identifican dos tipos de ordeño en las fincas, el que se realiza en establos y el que se lleva a cabo con equipos portátiles en los potreros. Antes de proceder al ordeño en establo, se tiene un corral donde permanecen las vacas a la espera del turno de ordeño. Previo al inicio del ordeño, se realiza un enjuague a los equipos (tuberías y pezoneras) recirculando solución desinfectante clorada en agua fría durante cinco minutos. Las vacas entran al sitio de ordeño, se les hace una desinfección de las ubres con yodo, se les ponen las pezoneras y mediante una bomba de vacío se succiona la leche, la cual se conduce a través de tubería directamente al tanque de enfriamiento, de manera que en el proceso la leche no tiene ningún contacto con el personal que ejecuta la labor, ni el ambiente exterior, evitando así su contaminación. Terminada la labor de ordeño, las vacas se llevan a los potreros y se procede a lavar el establo y el equipo de ordeño. Por otro lado, en el caso del ordeño realizado en potreros, se realiza el enjuague de los equipos y luego se transportan hasta el campo al sitio de ordeño. Dependiendo del número de vacas a

ordeñar se tienen dos o más juegos de pezoneras. Se desinfectan las ubres de las vacas, se instalan las pezoneras y con la bomba de vacío se succiona la leche, la cual se deposita en recipientes comúnmente conocidos como cantinas, que luego son transportadas y vertidas manualmente al tanque de enfriamiento[26].

6.11. Caracterización de estiércol de ganado bovino y porcino

En la Tabla 2 y la

Tabla 3 se presenta información bibliográfica sobre la caracterización del estiércol de ganado bovino y porcino para parámetros como materia seca - MS (Kg MS/Kg estiércol), sólidos volátiles (Kg SV/Kg MS) y potencial bioquímico de metano ($m^3 CH_4/Kg SV$). Dichos valores corresponden a la caracterización de estiércol producido en varios países con diferentes condiciones climáticas e implementación de diferentes condiciones de manejo de los animales, incluyendo variaciones en el tipo de alimento suministrado.

Tabla 2. Características del estiércol de ganado porcino

CARACTERÍSTICAS DEL ESTIÉRCOL DE GANADO PORCINO				
No.	Materia Seca MS Kg MS/Kg estiércol	Sólidos volátiles Kg SV/ Kg MS	Potencial Bioquímico de metano $m^3 CH_4/Kg SV$	Referencia
1	0.36	0.99	0.15	[27]
2	0.33 ; 0.31 ; 0.28	0.76 ; 0.73 ; 0.71	0.32	[16]
3	0.32	0.78	0.15	[28]
4	0.32	-	-	[29]
5	0.31	0.77	0.13	[30]
6	0.31	0.73	0.32	[7]
7	0.31	0.87	0.32	[31]
8	0.30	0.89	0.25	[32]
9	0.28	0.78	0.26	[33]
10	0.28	0.80	0.29	[34]
11	0.28	0.80	-	[35]
12	0.28	-	-	[36]
13	0.28	0.78	0.32 ; 0.31 ; 0.31	[37]
14	0.23	0.73	0.16	[38]
15	-	0.85	0.42	[39]
16	-	0.81	-	[40]
17	-	0.80 ; 0.70	0.5 ; 0.25	[41]
18	-	0.79	0.32	[42]
19	-	0.79	0.25	[43]
20	-	0.77	0.20	[44]
21	-	0.69	0.32	[45]
22	-	0.68	0.56	[46]
23	-	-	0.29 ; 0.43 ; 0.48 ; 0.49	[47]
24	-	-	0.49	[48]
25	-	-	0.45	[49]
26	-	-	0.416	[3]

CARACTERÍSTICAS DEL ESTIÉRCOL DE GANADO PORCINO				
No.	Materia Seca MS Kg MS/Kg estiércol	Sólidos volátiles Kg SV/ Kg MS	Potencial Bioquímico de metano m ³ CH ₄ /Kg SV	Referencia
27	-	-	0.39	[50]
28	-	-	0.36 ; 0.28	[13]
29	-	-	0.35 ; 0.31	[51]
30	-	-	0.34 ; 0.30 ; 0.24	[52]
31	-	-	0.30	[12]
32	-	-	0.29	[53]
33	-	-	0.29	[54]
34	-	-	0.27	[55]
35	-	-	0.21 ; 0.20 ; 0.19 ; 0.17	[56]
36	0.24 ; 0.26 ; 0.27 ; 0.29	0.75 ; 0.75 ; 0.77 ; 0.77	0.26 ; 0.28 ; 0.33 ; 0.35	[57]
37	0.19	0.77	0.35	[58]

Tabla 3. Características del estiércol de ganado bovino

CARACTERÍSTICAS DEL ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO				
No.	Materia Seca MS Kg MS/Kg estiércol	Sólidos volátiles Kg SV/ Kg MS	Potencial Bioquímico de metano m ³ CH ₄ /Kg SV	Referencia
1	0.27	0.81	0.32	[46]
2	0.17 ; 0.19; 0.26	0.71 ; 0.80 ; 0.87	0.17	[59]
3	0.16 ; 0.22	0.88 ; 0.88	0.19 ; 0.22	[60]
4	0.20	0.75	-	[35]
5	0.18	0.80	0.21	[7]
6	0.17	0.55	0.13	[61]
7	0.17	0.77	0.27	[50]
8	0.17	0.61	0.20	[31]
9	0.11 ; 0.16	0.73 ; 0.79	-	[62]
10	0.16	0.87	0.11	[27]
11	0.15 ; 0.16	0.85 ; 0.85	0.32	[63]
12	0.15	-	-	[29]
13	0.14	0.88	0.26	[64]
14	0.14	0.80	0.22	[39]
15	0.12	0.75 ; 0.85	0.20 ; 0.30	[41]
16	0.10 ; 0.10 ; 0.11	0.78 ; 0.79 ; 0.80 ; 0.81 ; 0.82 ; 0.83 ; 0.86	-	[65]
17	-	0.89 ; 0.89	0.32 ; 0.32	[66]
18	-	0.87	-	[67]
19	-	0.71 ; 0.79	0.20	[68]
20	-	0.78	0.24	[42]
21	-	0.73	0.18	[69]
22	-	0.72	0.19	[70]
23	-	-	0.24 ; 0.30 ; 0.30	[71]
24	-	-	0.29	[55]
25	-	-	0.28	[49]
26	-	-	0.24 ; 0.26	[72]
27	-	-	0.22	[73]

CARACTERÍSTICAS DEL ESTIÉRCOL DE GANADO BOVINO				
No.	Materia Seca MS Kg MS/Kg estiércol	Sólidos volátiles Kg SV/ Kg MS	Potencial Bioquímico de metano m ³ CH ₄ /Kg SV	Referencia
28	-	-	0.21	[74]
29	-	-	0.15 ; 0.16 ; 0.17 ; 0.20	[56]
30	-	-	0.20	[12]
31	-	-	0.18	[75]
32	-	-	0.15	[13]
33	0.16	0.84	0.33	[58]

Por otra parte, el laboratorio del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales – CEIAM de la Universidad Industrial de Santander realizó caracterización del estiércol porcino, mediante la toma de dos muestras, una de ellas en Santa Rosa de Osos (Antioquia) y la otra en el Departamento del Valle del Cauca, como se aprecia en la Tabla 4, donde se presentan resultados para los parámetros materia seca - MS (Kg MS/Kg estiércol) y sólidos volátiles (Kg SV/Kg MS). La variación de los resultados de la caracterización fisicoquímica entre las dos muestras corresponde al estado en que se encontraban las excretas en el momento de la recolección, el clima del sitio de muestreo, la cantidad, composición y calidad del alimento, y el transporte de la muestra al laboratorio. La eficiencia de la producción de biogás está determinada por el contenido de sólidos volátiles en la excreta, ya que estos contienen los componentes orgánicos que son convertidos en metano[16].

Tabla 4. Caracterización de la biomasa residual del subsector porcícola

DEPARTAMENTO	% Humedad	% Materia seca	Materia seca (Kg MS/Kg EST)	% Sólidos volátiles	Sólidos volátiles (Kg SV/Kg MS)
Antioquia	67,18	32,83	0,33	24,98	0,76
Valle	71,9	28,11	0,28	19,87	0,71
Promedio	69,54	30,47	0,31	22,42	0,73

Fuente: Laboratorio del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales - CEIAM

En el trabajo de grado “Recuperación energética de porcinoza y formulación de insumos para un sistema acoplado cerdos – pastos – leche en el norte de Antioquia” se encontró un valor de BMP de 0,416 m³ CH₄/Kg SV para el estiércol de cerdo generado en el Departamento de Antioquia [3].

Para el subsector bovino en Colombia, la caracterización realizada por el laboratorio del Centro de Estudios e Investigaciones Ambientales – CEIAM de la Universidad Industrial de Santander (UIS), reportó valores de materia seca – MS igual a 0,18 Kg MS/Kg estiércol y sólidos volátiles igual a 0,8 Kg

SV/Kg MS. Respecto del potencial bioquímico de metano del estiércol de ganado bovino en Colombia, se encontró en la literatura un valor de 0,21 m³/Kg SV[7].

7. Metodología

7.1. Estimación del estiércol generado por los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada

La información sobre el número de animales de los subsectores objeto de estudio fue obtenida del censo realizado por el ICA y de información reportada por las Evaluaciones Agrícolas por Consenso, las UMATAS municipales y el Ministerio de Agricultura en el año 2018.

La información reportada por el ICA especifica claramente la distribución de los animales por grupo etario para bovinos y porcinos, donde el primero se clasifica en ganado menor a un año, entre 1 y 2 años, de 2 a 3 años y mayores a 3 años. En el caso del subsector porcícola la clasificación se presenta para lechones (1-60 días), levante (61-120 días), ceba (121-180 días), reproductores, hembras (120-240 días), hembras de cría (más de 240 días) y cerdos traspatio, que son aquellos que permanecen en predios de tipo familiar a pequeña escala.

La información suministrada por el Ministerio de Agricultura para el año 2018 especifica la dedicación del ganado bovino a diferentes tipos de producción lechera en cada uno de los 125 municipios del Departamento, especificando el número de animales en sistemas tradicionales de ordeño, lecherías de doble propósito y lechería especializada.

La Tasa de Producción de Estiércol (TPE) es un indicador del estiércol generado por especie, en función de la edad del animal y del tipo de actividad para el cual se cría[1].

Tanto el número de animales por rango etario, como la tasa de producción de estiércol (TPE), constituyen insumos para la estimación de la biomasa residual pecuario por especie en cada uno de los 125 municipios de Antioquia.

7.2. Estimación del estiércol técnicamente aprovechable generado por los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el Departamento de Antioquia

La estimación de la Biomasa Residual Pecuaria – BRP en el Departamento de Antioquia se calcula mediante un modelo matemático en función del número de animales por subsector y la tasa de producción de estiércol – TPE (Kg/animal*día), que es un indicador del estiércol generado por especie, en función de la edad del animal y del tipo de actividad para la cual se cría.

Dado que en el subsector porcícola se utiliza el confinamiento de los animales y se desarrollan sistemas intensivos de producción, se establece

que el estiércol técnicamente aprovechable para este subsector es del 100%.

Como en el sector ganadero predominan sistemas de producción extensivos, se define como estiércol técnicamente aprovechable solamente aquel generado por el subsector de lechería especializada durante las labores de ordeño, equivalente al 25% del estiércol generado por dicho subsector.

Ecuación 3

$$BRTA = NA * TPE \text{ [1]}$$

Donde

BRTA = Biomasa Residual Técnicamente Aprovechable

NA = Número de animales

TPE = Taza de producción de estiércol

Este modelo se aplica en cada municipio del Departamento de Antioquia para la estimación de la biomasa residual objeto de estudio.

7.3. Estimación teórica del potencial energético del estiércol generado por los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el Departamento de Antioquia

Para calcular el potencial energético del estiércol generado por los subsectores objeto de estudio en el Departamento de Antioquia, se utiliza un modelo matemático en función de la Biomasa Residual Técnicamente Aprovechable – BRTA (Kg estiércol), la materia seca - MS (Kg MS/Kg estiércol), los sólidos volátiles (Kg SV/Kg MS), el valor del potencial bioquímico de metano ($m^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$) y el poder calorífico inferior del metano ($22,4 \text{ MJ}/m^3$).

En la Ecuación 4 se presenta el modelo matemático para la estimación del potencial técnico-energético aprovechable de la biomasa residual objeto de estudio.

Ecuación 4

$$PTEA = \sum_{i=1}^n BRTA_i * \%MS * SV * BMP_i * PCI_{CH_4} \text{ [7]}$$

Donde:

PTEA = Potencial técnico-energético aprovechable (TJ/año)

BRTA = Biomasa Residual Técnicamente Aprovechable (Kg estiércol/año)

%MS = Kg MS / Kg estiércol

SV = Sólidos volátiles (Kg SV/Kg MS)

BMP = Potencial bioquímico de metano ($m^3 \text{ CH}_4 / \text{Kg SV}$)

PCI_{CH_4} = Poder calorífico inferior del metano (TJ/m^3)

El contador “i” hace alusión al grupo estado fisiológico en cada subsector (bovinos y porcinos).

En la Ecuación 5 se presenta el modelo de cálculo del potencial técnico-energético aprovechable total, estimado como la suma de los potenciales energéticos de los dos (2) subsectores objeto de estudio.

Ecuación 5

$$PE_{BRP}TOTAL = PE_{BRP}PORCÍCOLA + PE_{BRP}LECHERÍA ESPECIALIZADA$$

7.4. Análisis estadístico de información

Se realiza revisión de información secundaria sobre el potencial bioquímico de metano (BMP), valores de materia seca - MS (Kg MS/Kg estiércol) y sólidos volátiles (Kg SV/Kg MS) para la biomasa residual objeto de estudio.

Se utiliza estimación por intervalos de confianza para determinar un posible rango de valores o intervalo, en el que pueda precisarse con una determinada probabilidad, que los valores del BMP, sólidos volátiles y materia seca se encuentran dentro de esos límites.

También se utilizan diagramas de cajas y bigotes para visualizar los grupos de datos a través de sus cuartiles, lo que permite hallar valores atípicos, observar la simetría de los datos y hacer análisis de la agrupación de éstos.

7.5. Base de datos geográfica de la biomasa residual generada por los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el Departamento de Antioquia

Como herramienta para la presentación de resultados del estudio, se emplean mapas del potencial energético de la biomasa residual pecuaria en el departamento de Antioquia.

La construcción de los mapas se basa en la cartografía base para la representación espacial de la oferta de biomasa, sus características y su potencial energético. Esta actividad se desarrolla mediante la tecnología informática ArcGis, la cual permite recopilar y estructurar información para la actualización y visualización de los mapas temáticos, las consultas (mapas) y los ajustes a los modelos del potencial energético. Es importante mencionar que esta herramienta informática puede ser actualizada mediante información reciente e inclusive robustecida con información y cálculos para otros tipos de biomasa residual en futuros estudios.

Para cada una de las variables representadas en los mapas se utiliza una escala de valores distribuida en intervalos teniendo en cuenta la magnitud del máximo valor de cada variable.

Para la presentación de las escalas se utilizó una gama degradada de color, de forma que su intensidad está asociada a un rango de valores de la variable que representa.

8. Resultados

8.1. Análisis estadístico de información secundaria del estiércol de ganado porcino (MS, SV y BMP)

Se encontró en la bibliografía consultada valores de materia seca desde 0,19 hasta 0,36 Kg MS/Kg estiércol. Posteriormente, utilizando cuartiles y calculando el rango inter cuartil, se pudo determinar un valor atípico leve inferior de 0,22 Kg MS/Kg estiércol y un valor atípico leve superior de 0,36 Kg MS/Kg estiércol (Tabla 5). Todos los datos que están por fuera de ese rango, son considerados atípicos, como en el caso del valor 0,19 Kg MS/Kg estiércol.

Tabla 5. Estimación de cuartiles para el parámetro de materia seca

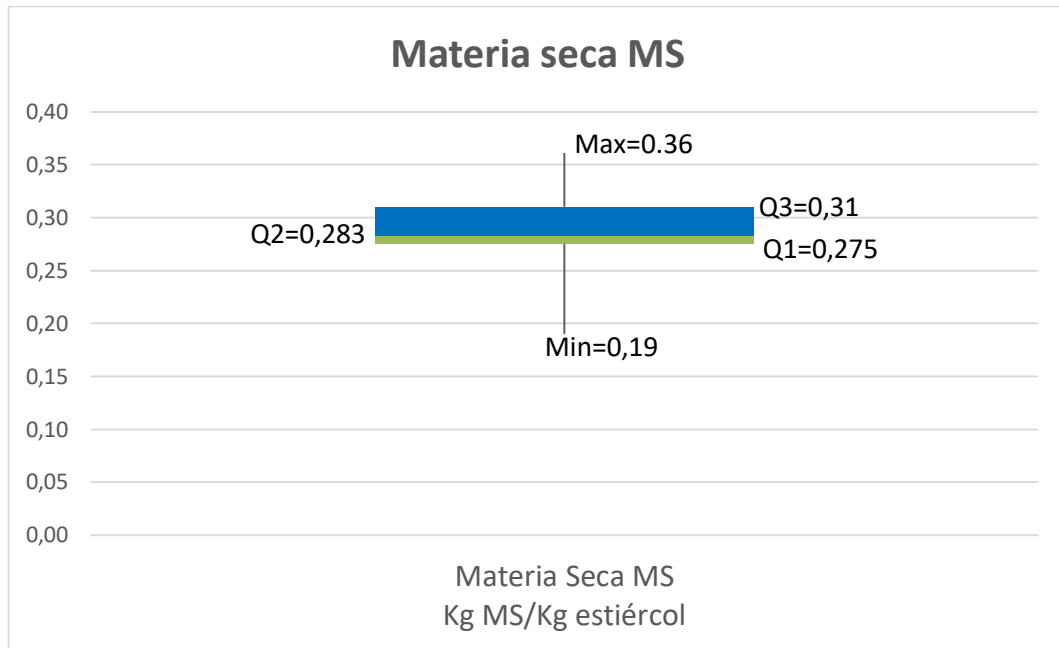
	MATERIA SECA (Kg MS/Kg estiércol)
VALOR MÍNIMO	0,19
CUARTIL 1 = Q1	0,27
Q2 = MEDIANA	0,28
CUARTIL 3 = Q3	0,31
VALOR MÁXIMO	0,36
RANGO INTER CUARTIL	0,03
VALOR ATÍPICO LEVE INFERIOR	0,22
VALOR ATÍPICO LEVE SUPERIOR	0,36

En la Gráfica 1 puede visualizarse mediante un diagrama de cajas y bigotes la agrupación de los datos, cuya explicación se facilita con la información contenida en la Tabla 6.

Tabla 6. Análisis de cuartiles

CUARTIL	DESCRIPCIÓN
Cuartil 1 = Q1	25% de los datos es menor o igual a este valor.
Cuartil 2 = Q2 Mediana	50% de los datos es menor o igual a este valor.
Cuartil 3 = Q3	75% de los datos es menor o igual a este valor.
Rango inter cuartil	Distancia entre el primer cuartil y el tercer cuartil (Q3-Q1), abarcando el 50% central de los datos.

Gráfica 1. Diagrama de cajas y bigotes para valores de materia seca



De acuerdo con lo explicado en la Tabla 6, el 25% de los datos es menor o igual a 0,275 Kg MS/Kg estiércol, el 50% de los datos es menor o igual a 0,283 Kg MS/Kg estiércol, el 75% de los datos es menor o igual a 0,31 Kg MS/Kg estiércol y el 50% central de los datos está entre 0,275 y 0,31 Kg MS/Kg estiércol.

El valor de la mediana (0,283 Kg MS/Kg estiércol) está más cercano al valor del primer cuartil (Q1= 0,275 Kg MS/Kg estiércol) que al valor del tercer cuartil (Q3= 0,31 Kg MS/Kg estiércol), lo que indica que el valor de la mediana está más cerca del 25% de los datos que del 75% de los datos. La parte inferior de la caja (color verde) es menor que la parte superior de la caja (color azul), lo que quiere decir que los valores de materia seca comprendidos entre el 25% y el 50% están más concentrados que los valores entre el 50% y el 75%. Adicionalmente, la mitad de los datos de materia seca están por encima de 0,283 Kg MS/Kg estiércol y la otra mitad de los datos están por debajo de ese valor.

El bigote inferior del diagrama permite estudiar la concentración del primer 25% de los datos, mientras que el bigote superior la concentración del último 25% de los datos. Como el bigote superior es más pequeño que el bigote inferior, se infiere que los datos del último 25% están más concentrados que los datos del primer 25%.

Para los datos de materia seca encontrados en la bibliografía y sin tener en cuenta valores atípicos, se obtuvo un promedio de **0,29 Kg MS/Kg estiércol**, el cual se encuentra dentro de un intervalo de confianza del 95% que va desde 0,28 hasta 0,31 Kg MS/Kg estiércol.

En la Tabla 7 se presenta el cálculo de cuartiles de los datos encontrados en la bibliografía para el parámetro de sólidos volátiles del estiércol de ganado porcino.

Tabla 7. Estimación de cuartiles para el parámetro de sólidos volátiles

	SÓLIDOS VOLÁTILES (Kg SV/ Kg MS)
VALOR MÍNIMO	0,68
CUARTIL 1 = Q1	0,74
Q2 = MEDIANA	0,77
CUARTIL 3 = Q3	0,80
VALOR MÁXIMO	0,99
RANGO INTER CUARTIL	0,06
VALOR ATÍPICO LEVE INFERIOR	0,66
VALOR ATÍPICO LEVE SUPERIOR	0,88

Para el parámetro de sólidos volátiles, se hallaron valores desde 0,68 hasta 0,99 Kg SV/Kg MS. Luego, mediante la utilización de cuartiles y calculando el rango inter cuartil, se pudo determinar un valor atípico leve inferior de 0,66 Kg SV/Kg MS y un valor atípico leve superior de 0,88 Kg SV/Kg MS (Tabla 7). Todos los datos que están por fuera de ese rango, son considerados atípicos, por lo cual se excluyen los valores de 0,89 y 0,99 Kg SV/Kg MS.

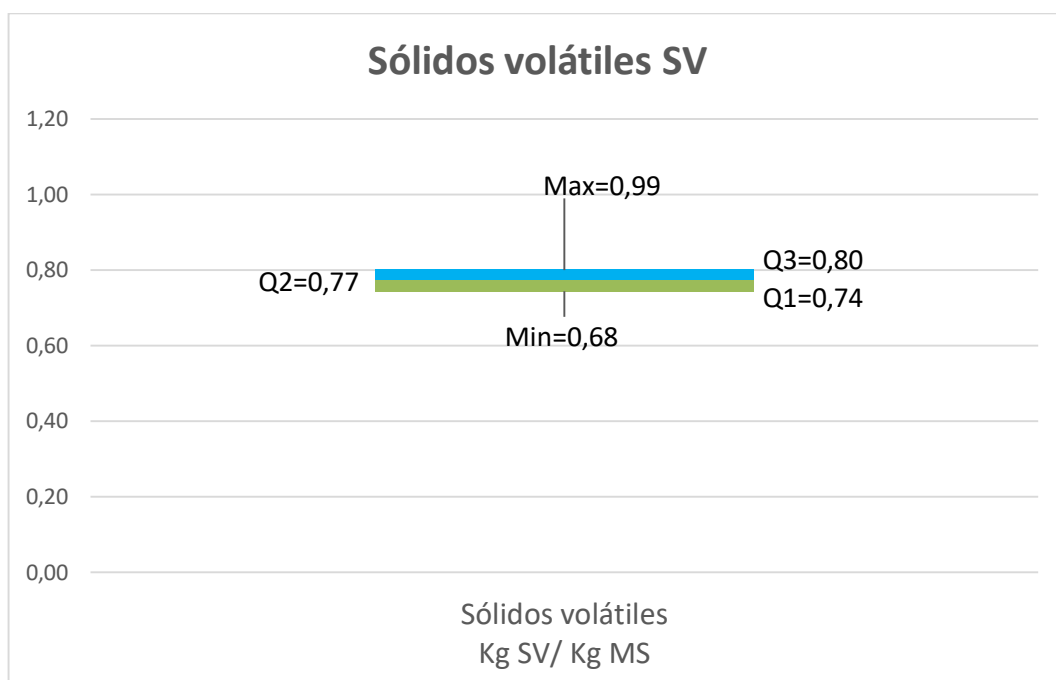
En la Gráfica 2 se observa que el 25% de los datos es menor o igual a 0,74 Kg SV/Kg MS, el 50% de los datos es menor o igual a 0,77 Kg SV/Kg MS, el 75% de los datos es menor o igual a 0,80 Kg SV/Kg MS y el 50% central de los datos está entre 0,74 y 0,80 Kg SV/Kg MS.

El valor de la mediana (0,77 Kg SV/Kg MS) es simétrico respecto del primer cuartil (0,74 Kg SV/Kg MS) y el tercer cuartil (0,80 Kg SV/Kg MS). Según lo anterior, los valores de sólidos volátiles comprendidos entre el 25% y el 50% de la información secundaria consultada están igual de concentrados que los valores entre el 50% y el 75%. Además, la mitad de los datos de sólidos volátiles están por encima de 0,77 Kg SV/Kg MS y la otra mitad de los datos están por debajo de ese valor.

Como el bigote inferior es más pequeño que el superior, los datos del primer 25% están mucho más concentrados que los datos del último 25%.

Para los datos de sólidos volátiles encontrados en la bibliografía y sin tener en cuenta valores atípicos, se obtuvo un promedio de **0,77 Kg SV/Kg MS**, el cual se encuentra dentro de un intervalo de confianza del 95% que va desde 0,75 hasta 0,78 Kg SV/Kg MS.

Gráfica 2. Diagrama de cajas y bigotes para valores de sólidos volátiles



En la Tabla 8 se presenta el cálculo de cuartiles de los datos encontrados en la bibliografía para el parámetro potencial bioquímico de metano (BMP) del estiércol de ganado porcino.

Tabla 8. Estimación de cuartiles para el parámetro de BMP

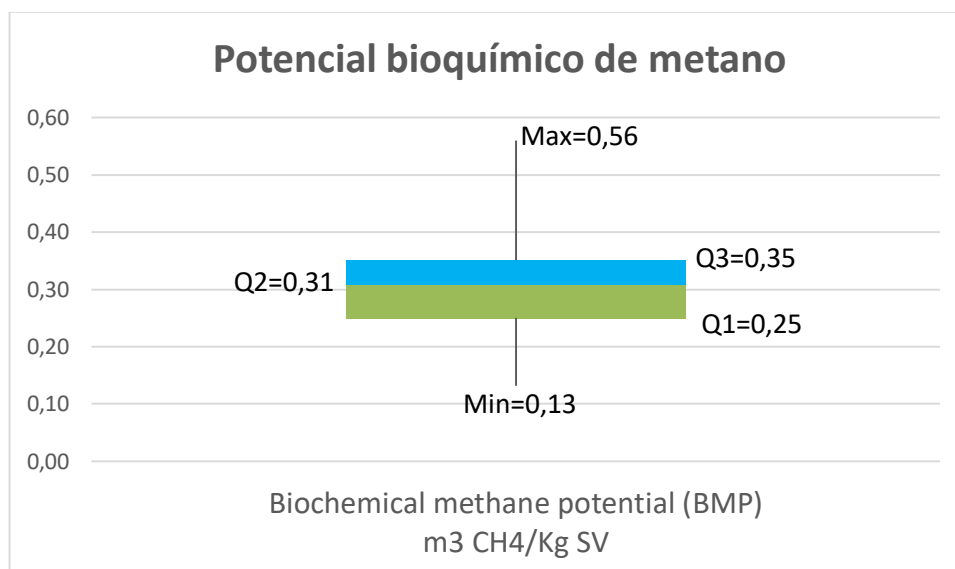
	BMP (m ³ CH ₄ /Kg SV)
VALOR MÍNIMO	0,13
CUARTIL 1 = Q1	0,25
Q2 = MEDIANA	0,31
CUARTIL 3 = Q3	0,35
VALOR MÁXIMO	0,56
RANGO INTER CUARTIL	0,10
VALOR ATÍPICO LEVE INFERIOR	0,10
VALOR ATÍPICO LEVE SUPERIOR	0,50

Para el parámetro potencial bioquímico de metano (BMP), se encontraron valores desde 0,13 hasta 0,56 m³ CH₄/Kg SV. Luego, mediante la utilización de cuartiles y calculando el rango inter cuartil, se pudo determinar un valor atípico leve inferior de 0,10 m³ CH₄/Kg SV y un valor atípico leve superior de 0,50 m³ CH₄/Kg SV (Tabla 8). Todos los datos que están por fuera de ese rango, son considerados atípicos, por lo cual se excluye el valor de 0,56 m³ CH₄/Kg SV.

En la Gráfica 3 se observa que el 25% de los datos es menor o igual a 0,25 m³ CH₄/Kg SV, el 50% de los datos es menor o igual a 0,31 m³ CH₄/Kg SV,

el 75% de los datos es menor o igual a $0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$ y el 50% central de los datos está entre $0,25$ y $0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$.

Gráfica 3. Diagrama de cajas y bigotes para valores de BMP



El valor de la mediana ($0,31 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$) está más cercano al valor del tercer cuartil ($Q3= 0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$) que al valor del primer cuartil ($Q1= 0,25 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$), lo que indica que el valor de la mediana está más cerca del 75% de los datos que del 25% de los datos. La parte superior de la caja (color azul) es menor que la parte inferior de la caja (color verde), lo que quiere decir que los valores de BMP comprendidos entre el 50% y el 75% están más concentrados que los valores entre el 25% y el 50%. Respecto del valor de la mediana, la mitad de los datos de BMP están por encima de $0,31 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$ y la otra mitad de los datos están por debajo de ese valor.

Como el bigote inferior es más pequeño que el superior, se entiende que los datos del primer 25% están mucho más concentrados que los datos del último 25%.

Para los datos de BMP encontrados en la bibliografía y sin tener en cuenta valores atípicos, se obtuvo un promedio de **$0,31 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$** , el cual se encuentra dentro de un intervalo de confianza del 95% que va desde $0,28$ hasta $0,33 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$.

8.2. Análisis estadístico de información secundaria del estiércol de ganado bovino

De acuerdo con la bibliografía consultada, se hallaron valores de materia seca desde $0,10$ hasta $0,27 \text{ Kg MS/Kg estiércol}$. Posteriormente, utilizando cuartiles y calculando el rango inter cuartil, se pudo determinar un valor atípico leve inferior de $0,09 \text{ Kg MS/Kg estiércol}$ y un valor atípico leve superior de $0,23 \text{ Kg MS/Kg estiércol}$ (Tabla 9). Todos los datos que están

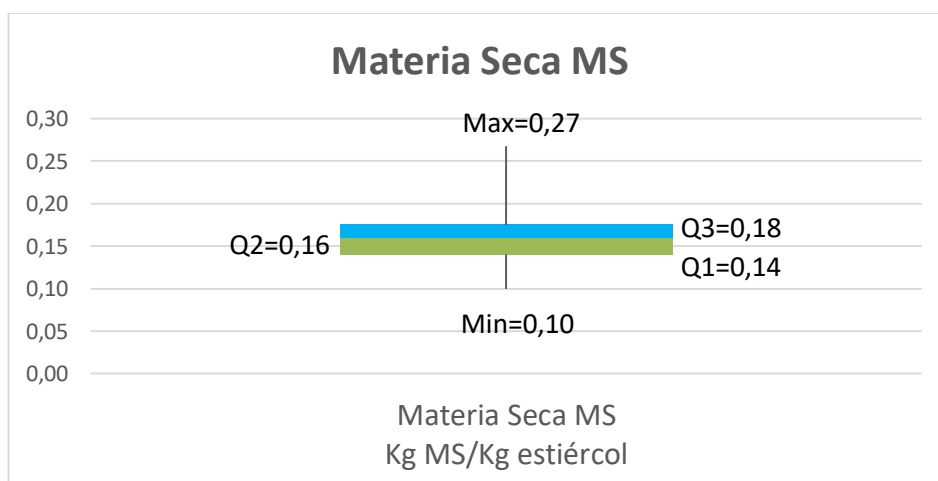
por fuera de ese rango, son considerados atípicos, como en el caso de los valores 0,26 y 0,27 Kg MS/Kg estiércol.

Tabla 9. Estimación de cuartiles para el parámetro de materia seca

	MATERIA SECA (Kg MS/Kg estiércol)
VALOR MÍNIMO	0,10
CUARTIL 1 = Q1	0,14
Q2 = MEDIANA	0,16
CUARTIL 3 = Q3	0,18
VALOR MÁXIMO	0,27
RANGO INTER CUARTIL	0,04
VALOR ATÍPICO LEVE INFERIOR	0,09
VALOR ATÍPICO LEVE SUPERIOR	0,23

En la Gráfica 4 puede visualizarse mediante un diagrama de cajas y bigotes la agrupación de los datos de materia seca.

Gráfica 4. Diagrama de cajas y bigotes para valores de materia seca



Según la Gráfica 4, el 25% de los datos es menor o igual a 0,14 Kg MS/Kg estiércol, el 50% de los datos es menor o igual a 0,16 Kg MS/Kg estiércol, el 75% de los datos es menor o igual a 0,18 Kg MS/Kg estiércol y el 50% central de los datos está entre 0,14 y 0,18 Kg MS/Kg estiércol.

El valor de la mediana (0,16 Kg MS/Kg estiércol) es simétrico respecto del primer cuartil (0,14 Kg MS/Kg estiércol) y el tercer cuartil (0,18 Kg MS/Kg estiércol). Según lo anterior, los valores de materia seca comprendidos entre el 25% y el 50% de la información secundaria consultada están igual de concentrados que los valores entre el 50% y el 75%. De acuerdo con el valor de la mediana, la mitad de los datos de materia seca están por encima de 0,16 Kg MS/Kg estiércol y la otra mitad de los datos están por debajo de ese valor.

Como el bigote inferior es más pequeño que el superior, se infiere que los datos del primer 25% están mucho más concentrados que los datos del último 25%.

Para los datos de materia seca encontrados en la bibliografía y sin tener en cuenta valores atípicos, se obtuvo un promedio de **0,15 Kg MS/Kg estiércol**, el cual se encuentra dentro de un intervalo de confianza del 95% que va desde 0,14 hasta 0,17 Kg MS/Kg estiércol.

En la Tabla 10 se presenta el cálculo de cuartiles de la datos encontrados en la bibliografía para el parámetro de sólidos volátiles del estiércol de ganado bovino.

Tabla 10. Estimación de cuartiles para el parámetro de sólidos volátiles

	SÓLIDOS VOLÁTILES (Kg SV/ Kg MS)
VALOR MÍNIMO	0,55
CUARTIL 1 = Q1	0,77
Q2 = MEDIANA	0,80
CUARTIL 3 = Q3	0,85
VALOR MÁXIMO	0,89
RANGO INTER CUARTIL	0,09
VALOR ATÍPICO LEVE INFERIOR	0,63
VALOR ATÍPICO LEVE SUPERIOR	0,98

El estiércol de ganado bovino presentó valores de sólidos volátiles entre 0,55 y 0,89 Kg SV/Kg MS, a los cuales se les calcularon los cuartiles y el rango inter cuartil, lo que posibilitó la estimación del valor atípico leve inferior (0,63 Kg SV/Kg MS) y el valor atípico leve superior (0,98 Kg SV/Kg MS), como se muestra en la Tabla 10. Todos los datos que están por fuera de ese rango, son considerados atípicos, por lo cual se excluyen los valores de 0,55 y 0,61 Kg SV/Kg MS.

En la Gráfica 5 se observa que el 25% de los datos es menor o igual a 0,77 Kg SV/Kg MS, el 50% de los datos es menor o igual a 0,80 Kg SV/Kg MS, el 75% de los datos es menor o igual a 0,85 Kg SV/Kg MS y el 50% central de los datos está entre 0,77 y 0,85 Kg SV/Kg MS.

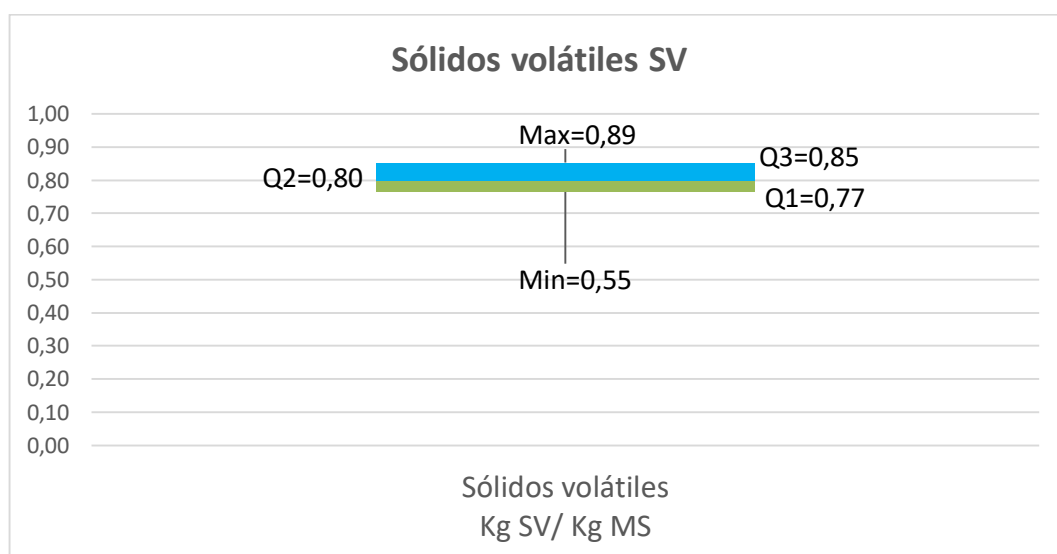
La mediana está más cerca del 25% de los datos que del 75% de los datos, pues el valor de la mediana (0,80 Kg SV/Kg MS) está más cercano al valor del primer cuartil (Q1= 0,77 Kg SV/Kg MS) que al valor del tercer cuartil (Q3= 0,85 Kg SV/Kg MS). La parte inferior de la caja (color verde) es menor que la parte superior de la caja (color azul), lo que quiere decir que los valores de sólidos volátiles comprendidos entre el 25% y el 50% están más concentrados que los valores entre el 50% y el 75%. También se puede concluir que la mitad de los datos de sólidos volátiles están por encima de

0,80 Kg SV/Kg MS y la otra mitad de los datos están por debajo de ese valor.

Como el bigote superior es más pequeño que el inferior, se observa que los datos del último 25% están mucho más concentrados que los datos del primer 25%.

Se obtuvo un promedio de **0,81 Kg SV/Kg MS** para los datos de sólidos volátiles encontrados en la bibliografía al excluir los valores atípicos, el cual se encuentra dentro de un intervalo de confianza del 95% que va desde 0,79 hasta 0,83 Kg SV/Kg MS.

Gráfica 5. Diagrama de cajas y bigotes para valores de sólidos volátiles



En la Tabla 11 se presenta el cálculo de cuartiles de los datos encontrados en la bibliografía para el parámetro potencial bioquímico de metano (BMP) del estiércol de ganado bovino.

Tabla 11. Estimación de cuartiles para el parámetro de BMP

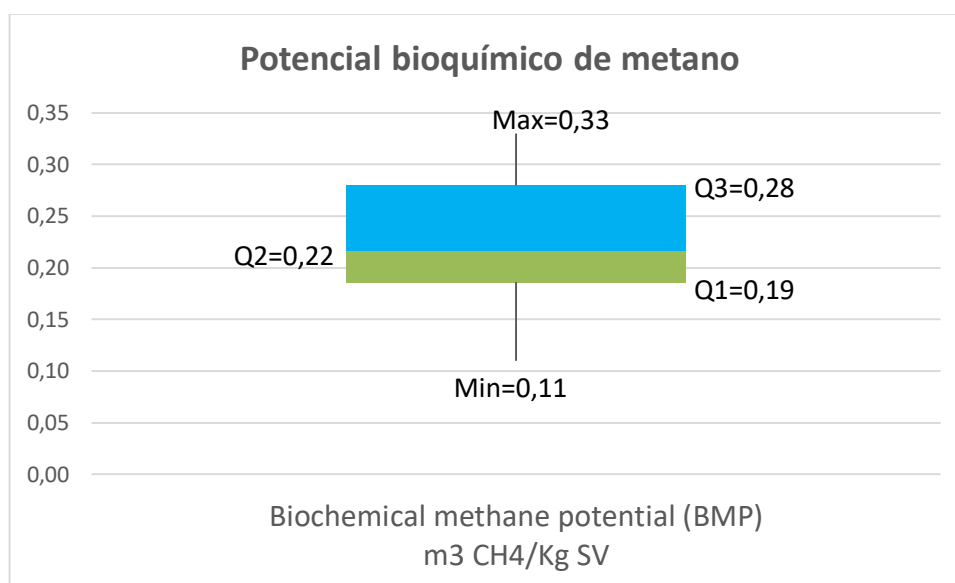
	BMP (m³ CH₄/Kg SV)
VALOR MÍNIMO	0,11
CUARTIL 1 = Q1	0,19
Q2 = MEDIANA	0,22
CUARTIL 3 = Q3	0,28
VALOR MÁXIMO	0,33
RANGO INTER CUARTIL	0,09
VALOR ATÍPICO LEVE INFERIOR	0,05
VALOR ATÍPICO LEVE SUPERIOR	0,42

El estiércol de ganado bovino presentó valores de potencial bioquímico de metano (BMP) entre 0,11 y 0,33 m³ CH₄/Kg SV, a los cuales se les calcularon los cuartiles y el rango inter cuartil, lo que posibilitó la estimación

del valor atípico leve inferior ($0,05 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$) y el valor atípico leve superior ($0,42 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$), como se observa en la Tabla 11. Como todos los datos de la bibliografía estaban dentro del rango de valores atípicos leves, no se encontró ningún valor atípico (outlier).

En la Gráfica 6 se observa que el 25% de los datos es menor o igual a $0,19 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$, el 50% de los datos es menor o igual a $0,22 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$, el 75% de los datos es menor o igual a $0,28 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$ y el 50% central de los datos está entre $0,19$ y $0,28 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$.

Gráfica 6. Diagrama de cajas y bigotes para valores de BMP



La mediana está más cerca del 25% de los datos que del 75% de los datos, pues el valor de la mediana ($0,22 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$) está más cercano al valor del primer cuartil ($Q1= 0,19 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$) que al valor del tercer cuartil ($Q3= 0,28 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$). La parte inferior de la caja (color verde) es menor que la parte superior de la caja (color azul), lo que quiere decir que los valores de BMP comprendidos entre el 25% y el 50% están más concentrados que los valores entre el 50% y el 75%. También se puede deducir que la mitad de los datos de BMP están por encima de $0,22 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$ y la otra mitad de los datos están por debajo de ese valor.

Como el bigote superior es más pequeño que el inferior, se entiende que los datos del último 25% están más concentrados que los datos del primer 25%.

Para los datos de BMP encontrados en la bibliografía se obtuvo un promedio de **$0,23 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$** , el cual se encuentra dentro de un intervalo de confianza del 95% que va desde $0,21$ hasta $0,25 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{Kg SV}$.

8.3. Estimación de biomasa residual pecuaria aprovechable en el Departamento de Antioquia para los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada

Mediante la aplicación de la Ecuación 3 (Página 30) se procede con la estimación de la biomasa residual pecuaria objeto de estudio.

En la Tabla 12 se presenta la estimación de la biomasa residual generada por el subsector porcícola. En la Tabla 14 se calcula la biomasa residual generada por la ganadería bovina incluyendo ganadería de carne, lechería especializada y ganadería de doble propósito en el Departamento de Antioquia, mientras que la Tabla 16 especifica la biomasa residual generada por el subsector ganadero de leche especializada solamente.

Tabla 12. Estimación de biomasa residual del subsector porcícola en el Departamento de Antioquia

ESTADO FISIOLÓGICO	NÚMERO ANIMALES – NA *1	TAZA DE PRODUCCIÓN ESTIÉRCOL - TPE (Kg/animal*año) *2	Biomasa residual porcícola (Ton estiércol/año)
Lechones 1-60 días	583.145	102,2	59.597
Levante 61 - 120 días	488.909	445,3	217.711
Ceba 121 - 180 días	423.867	799,35	338.818
Reproductor	5.704	2.051,3	11.701
Hembras 120 - 240 días	21.187	1.971	41.760
Hembras cría >240 días	78.916	2.693,70	212.576
Cerdos de traspatio	253.677	1.343,81	340.893
TOTAL	1.855.405	-	1.223.056

*1 Censo pecuario nacional ICA, 2018

*2 Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia, 2010

Según la estimación presentada en la Tabla 12, en el Departamento de Antioquia se generan 1.223.056 toneladas anuales de estiércol por parte del subsector porcícola. De esa biomasa residual, el 72.13% se genera en granjas tecnificadas que emplean el confinamiento de los cerdos y albergan animales de diferentes estados fisiológicos, incluyendo lechones de 1 a 60 días, cerdos de levante de 61 a 120 días, animales de ceba de 121 a 180 días, reproductores, hembras de 120 a 240 días y hembras de cría de más de 240 días. El 27.87% restante del estiércol se produce por cerdos de traspatio.

En la Tabla 13 se presenta en orden decreciente la generación de porcínaza en cada uno de los municipios que conforman el Departamento de Antioquia, siendo los primeros cinco lugares el municipio de Don Matías con 107.490 toneladas por año, Medellín (93.340 Ton/año), Ebéjico (83.193

Ton/año), Santa Rosa de Osos (78.201 Ton/año) y Santo Domingo (46.516 Ton/año).

Gráfica 7. Generación de estiércol por el subsector porcícola

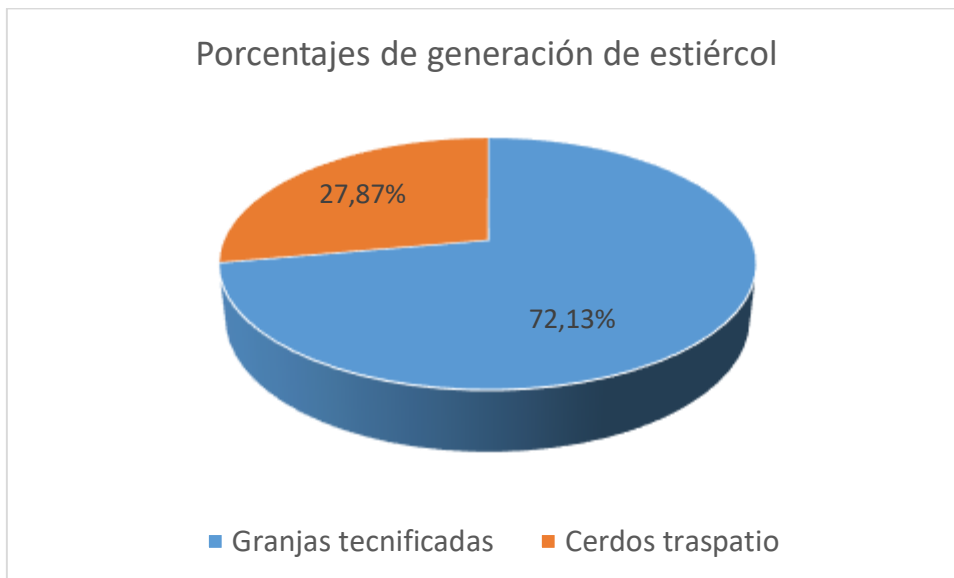


Tabla 13. Municipios de Antioquia con su respectiva generación de porcínaza en toneladas por año

MUNICIPIO	Biomasa residual porcícola (Ton estiércol/año)
DON-MATIAS	107.490
MEDELLÍN	93.340
EBÉJICO	83.193
SANTA-ROSA-DE-OSOS	78.201
SANTO-DOMINGO	46.516
SAN-PEDRO-DE-LOS-MILAGROS	43.989
BARBOSA	41.780
CONCORDIA	34.203
ENTRERRÍOS	31.987
ANGELÓPOLIS	29.072
CALDAS	28.787
ANGOSTURA	28.066
JERICÓ	28.152
TÁMESIS	28.258
YARUMAL	26.340
FREDONIA	26.097
GUARNE	25.554
MARINILLA	23.217
SANTA-BARBARA	21.782
RIONEGRO	20.750
ENVIGADO	18.644
GIRARDOTA	18.140

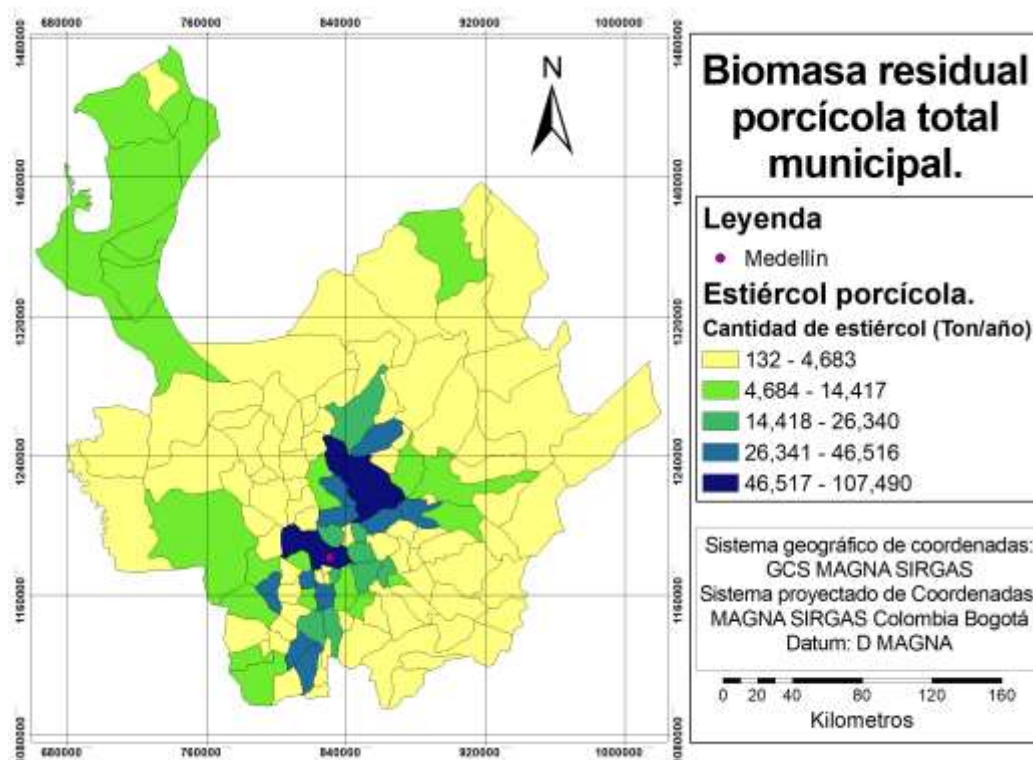
MUNICIPIO	Biomasa residual porcícola (Ton estiércol/año)
BELLO	17.270
GOMEZ-PLATA	14.417
AMAGÁ	13.054
LA-CEJA	11.086
URRAO	11.301
YOLOMBÓ	11.108
TURBO	10.630
RETIRO	10.370
ARBOLETES	10.310
SAN-ROQUE	9.754
ANDES	9.549
APARTADÓ	8.878
SALGAR	8.595
CHIGORODÓ	7.780
HELICONIA	6.922
EL-SANTUARIO	6.777
CAUCASIA	6.730
MUTATÁ	6.559
BETULIA	6.001
CAREPA	5.651
NECOCLÍ	5.645
BETANIA	5.596
BELMIRA	5.227
SAN-PEDRO-DE-URABA	5.213
PEÑOL	4.683
CAROLINA	3.979
ARMENIA	3.912
PUERTO-BERRIO	3.769
JARDÍN	3.737
COPACABANA	3.660
CISNEROS	3.636
VALPARAISO	3.475
HISPANIA	3.422
TITIRIBÍ	3.424
SAN-RAFAEL	3.406
NECHÍ	3.388
CÁCERES	3.341
SAN-VICENTE-FERRER	3.045
EL-CARMEN-DE-VIBORAL	2.878
SAN-JUAN-DE-URABA	3.087
TARAZÁ	2.869
LA-UNION	2.641
VENECIA	2.562
VALDIVIA	2.526

MUNICIPIO	Biomasa residual porcícola (Ton estiércol/año)
FRONTINO	2.502
LIBORINA	2.405
CAÑASGORDAS	2.329
VEGACHÍ	2.239
AMALFI	2.099
MACEO	2.084
PUERTO-TRIUNFO	2.001
REMEDIOS	1.995
SAN-JOSE-DE-LA-MONTANA	1.820
CIUDAD-BOLIVAR	1.740
YALÍ	1.704
CARAMANTA	1.699
SONSÓN	1.693
YONDÓ	1.552
ABEJORRAL	1.431
GRANADA	1.426
EL-BAGRE	1.343
LA-PINTADA	1.312
NARINO	1.310
SAN-JERONIMO	1.290
CONCEPCION	1.252
ITUANGO	1.118
SAN-LUIS	1.115
GUATAPÉ	1.107
PUERTO-NARE	1.104
LA-ESTRELLA	964
SOPETRÁN	934
ZARAGOZA	769
COCORNÁ	730
MONTEBELLO	701
PUEBLORRICO	687
TARSO	679
SAN-ANDRES-DE-CUERQUIA	643
CAICEDO	581
SEGOVIA	566
CAMPAMENTO	523
ITAGÜÍ	508
DABEIBA	503
SAN-CARLOS	491
SANTA-FE-DE-ANTIOQUIA	489
URAMITA	490
CARACOLÍ	458
ANORÍ	430
BRICENO	431

MUNICIPIO	Biomasa residual porcícola (Ton estiércol/año)
ABRIAQUÍ	417
MURINDO	386
GUADALUPE	383
TOLEDO	374
VIGIA-DEL-FUERTE	339
ALEJANDRÍA	336
PEQUE	310
SAN-FRANCISCO	290
SABANALARGA	282
ANZÁ	265
SABANETA	262
OLAYA	211
GIRALDO	207
ARGELIA	195
BURITICÁ	132
TOTAL	1.223.056

En el Mapa 1 se muestra la distribución del estiércol generado por el subsector porcícola en los diferentes municipios del Departamento de Antioquia.

Mapa 1. Cantidad total municipal anual de estiércol generado por el subsector porcícola



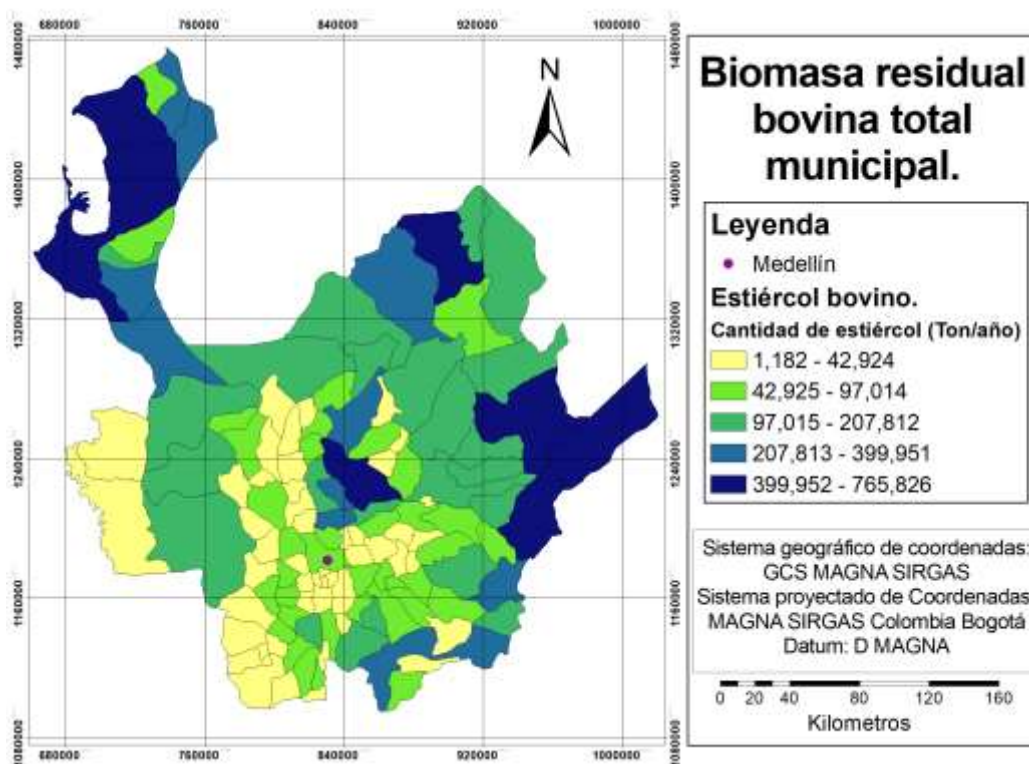
De acuerdo con la Tabla 14, la actividad económica de ganadería bovina en el Departamento de Antioquia, incluyendo ganadería de carne, lechería especializada y ganadería de doble propósito, produce un total de 13.683.707 toneladas de estiércol por año.

Tabla 14. Estimación de Biomasa Residual del subsector bovino para el Departamento de Antioquia

ESTADO FISIOLÓGICO	NÚMERO ANIMALES - NA ¹	TPE (Kg/animal*año) ²	Biomasa residual bovina (Ton estiércol/año)
Terneros menos 12 meses	536.460	1.460	783.232
Entre 12 y 24 meses	756.146	3.285	2.483.940
Entre 24 y 36 meses	723.165	5.110	3.695.373
Más de 36 meses	1.023.008	6.570	6.721.163
Total	3.038.779	-	13.683.707

¹ Censo pecuario nacional ICA, 2018

² Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia, 2010



Mapa 2. Cantidad total municipal anual de estiércol generado por el subsector bovino

En la Tabla 15 se presenta un listado con los 20 municipios de mayor generación de estiércol por parte de la actividad económica bovina, incluyendo ganadería de carne, lechería especializada y ganadería de

doble propósito. Este listado es encabezado por los municipios de Turbo (765.826 Ton/año), Santa Rosa de Osos (663.210 Ton/año), Caucasia (560.367 Ton/año), Remedios (534.482 Ton/año), Yondó (522.094 Ton/año), Necoclí (469.713 Ton/año), Puerto Berrio (444.728 Ton/año), San Pedro de los Milagros (399.951 Ton/año), Cáceres (357.935 Ton/año) y Arboletes (342.298 Ton/año). La totalidad de municipios con sus respectivas generaciones de estiércol se presentan en la base de datos geográfica que se presenta como archivo anexo al trabajo de grado.

Tabla 15. Municipios con mayor generación de estiércol por parte de la actividad pecuaria bovina en Antioquia

MUNICIPIO	BRP bovina (Ton estiércol/año)
TURBO	765.826
SANTA-ROSA-DE-OSOS	663.210
CAUCASIA	560.367
REMEDIOS	534.482
YONDÓ	522.094
NECOCLÍ	469.713
PUERTO-BERRIO	444.728
SAN-PEDRO-DE-LOS-MILAGROS	399.951
CÁCERES	357.935
ARBOLETES	342.298
MUTATÁ	333.313
SAN-PEDRO-DE-URABA	310.675
SONSÓN	302.240
ENTRERRÍOS	277.595
YARUMAL	266.860
CHIGORODÓ	235.025
PUERTO-NARE	234.083
PUERTO-TRIUNFO	207.812
MACEO	194.806
ITUANGO	162,534

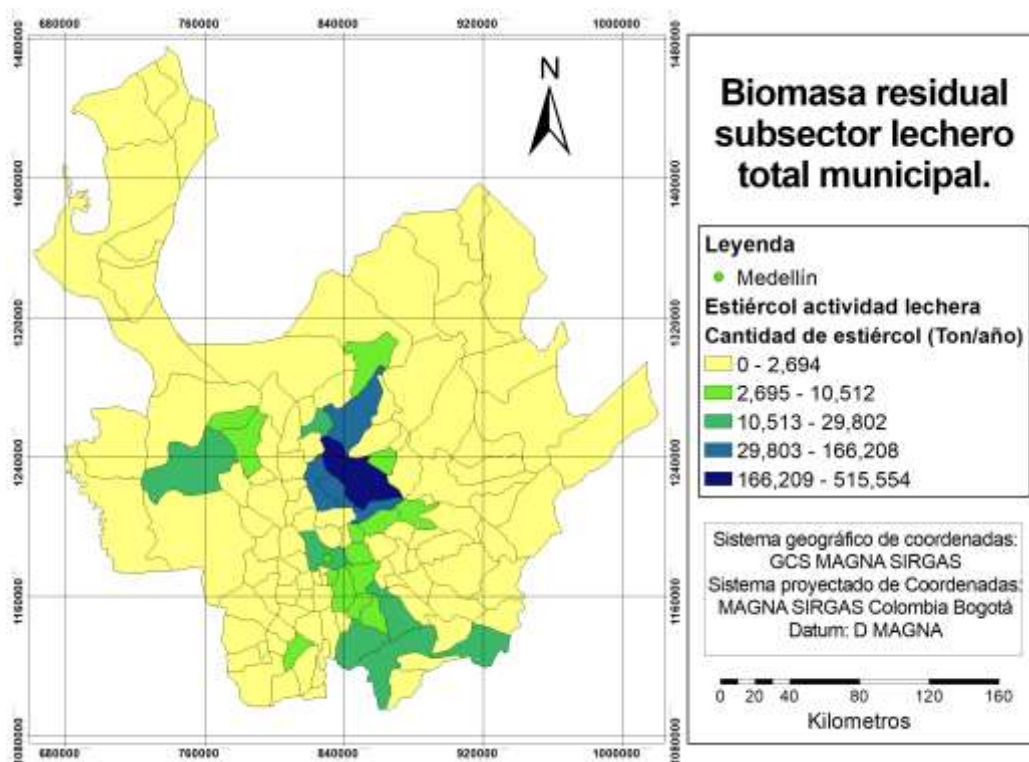
En la Tabla 16 se presenta la estimación de la cantidad de estiércol generado solamente por el subsector lechero especializado en Antioquia.

Tabla 16. Estimación de Biomasa Residual del subsector lechero especializado para el Departamento de Antioquia

Tipo de sistema de producción	NÚMERO ANIMALES - NA ¹	TAZA DE PRODUCCIÓN DE ESTIÉRCOL - TPE (Kg/animal*año) ²	Biomasa residual lechería especializada (Ton estiércol/año)
Vacas de ordeño Lechería especializada	182.166	6.570	1.196.831
Total	182.166	-	1.196.831

Según información de las Evaluaciones Agrícolas por Consenso, las UMATAS municipales y el Ministerio de Agricultura 2018, en el Departamento de Antioquia se tienen 182.166 vacas destinadas a sistemas especializados de producción de leche, que con una tasa de producción de estiércol de 6.570 Kg/animal*año, permite estimar una generación de 1.196.831 toneladas anuales de estiércol.

En el Mapa 3 se representan las toneladas de estiércol generado por año por parte del subsector lechero especializado, para los municipios del Departamento de Antioquia.



Mapa 3. Cantidad municipal anual de estiércol generado por el subsector lechero especializado

En la Tabla 17 se presenta la generación municipal de estiércol por parte del subsector lechero especializado en el Departamento de Antioquia. Los dos municipios con mayor generación de estiércol relacionado al subsector lechero especializado son Santa Rosa de Osos con 515.554 toneladas anuales y Entreríos con 166.208 toneladas por año. Otros municipios como Don Matías, Yarumal y Belmira presentan una generación de estiércol dentro de un intervalo de 84.024 y 98.550 toneladas por año, pudiendo observarse que todos los municipios anteriormente mencionados se

localizan en la subregión norte del Departamento de Antioquia y aportan el 79,82% del total del estiércol generado en el Departamento de Antioquia.

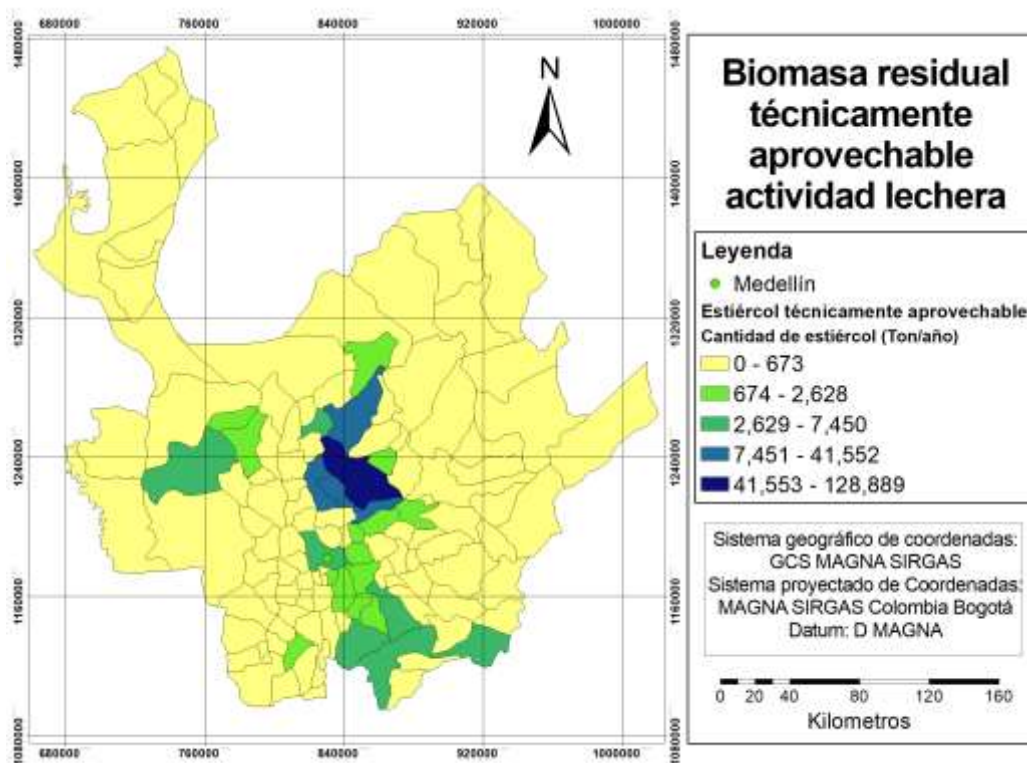
Tabla 17. Generación de estiércol, subsector lechero especializado

MUNICIPIO	Biomasa residual lechería especializada (Ton estiércol/año)	Biomasa residual técnicamente aprovechable (Ton estiércol/año)
SANTA ROSA DE OSOS	515.554	128.889
ENTRERRIOS	166.208	41.552
DON MATÍAS	98.550	24.638
YARUMAL	90.975	22.744
BELMIRA	84.024	21.006
SONSÓN	29.802	7.450
MEDELLÍN	24.894	6.223
ABEJORRAL	19.881	4.970
EL CARMEN DE VIBORAL	19.382	4.845
FRONTINO	19.283	4.821
SAN ANDRÉS DE CUERQUIA	15.768	3.942
LA UNIÓN	10.512	2.628
BARBOSA	10.184	2.546
LA CEJA	8.541	2.135
CAROLINA DEL PRÍNCIPE	7.884	1.971
CAÑASGORDAS	7.161	1.790
JERICÓ	6.242	1.560
VALDIVIA	6.222	1.555
EL RETIRO	6.209	1.552
SANTO DOMINGO	5.585	1.396
RIONEGRO	5.256	1.314
GIRARDOTA	5.006	1.252
ENVIGADO	4.271	1.068
URAMITA	4.271	1.068
GUARNE	3.942	986
SOPETRÁN	2.694	673
SANTA BÁRBARA	2.628	657
ABRIAQUÍ	2.234	558
SAN VICENTE	2.116	529
ITUANGO	1.754	439
COPACABANA	1.577	394
EL SANTUARIO	1.347	337
GRANADA	1.314	329
PUERTO TRIUNFO	1.117	279
URRAO	788	197
LIBORINA	710	177
CONCEPCIÓN	493	123
HISPANIA	447	112
EBÉJICO	427	107
ANGOSTURA	394	99
BRICEÑO	394	99
PUERTO BERRÍO	329	82

MUNICIPIO	Biomasa residual lechería especializada (Ton estiércol/año)	Biomasa residual técnicamente aprovechable (Ton estiércol/año)
PUEBLO RICO	283	71
CARACOLÍ	131	33
GUADALUPE	53	13
TOTAL	1.196.831	299.208

Aunque el subsector lechero especializado genera 1.196.831 toneladas anuales de estiércol, solamente se posibilita la recuperación del 25% del estiércol generado en el corral durante las labores de ordeño, lo que equivale a 299.208 toneladas por año de estiércol técnicamente aprovechables.

En el Mapa 4 se representan las toneladas de estiércol técnicamente aprovechable generado por año por parte del subsector lechero especializado, para los municipios del Departamento de Antioquia.

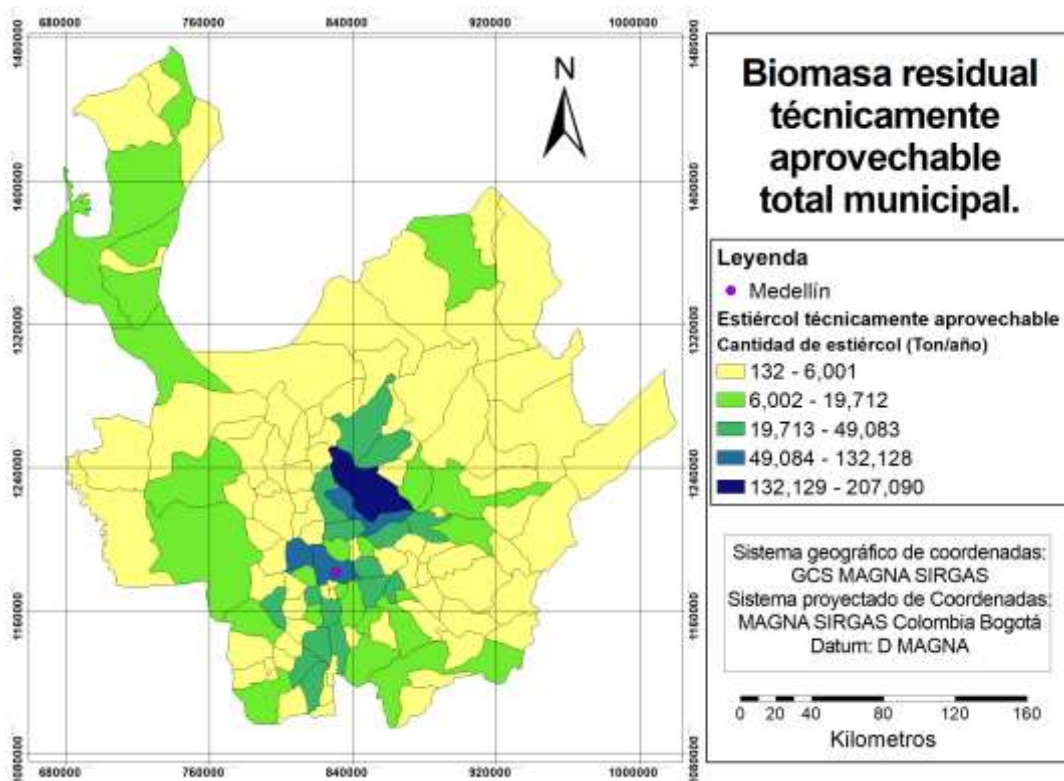


Mapa 4. Cantidad municipal anual de estiércol técnicamente aprovechable generado por el subsector lechero especializado

Respecto del subsector porcícola, en el Departamento de Antioquia se generan 1.223.056 toneladas anuales de estiércol, que son de fácil

captación, pues este sistema productivo emplea usualmente el confinamiento de los animales.

La suma del estiércol generado por el subsector porcícola (1.223.056 toneladas anuales) y el estiércol técnicamente aprovechable generado por el subsector lechero especializado (299.208 toneladas anuales), representa una biomasa residual de 1.522.264 toneladas anuales de estiércol técnicamente aprovechable por sus posibilidades de recolección. En el Mapa 5 se representa la cantidad de biomasa técnicamente aprovechable generada a nivel municipal por los subsectores porcícola y lechero especializado.



Mapa 5. Biomasa residual total técnicamente aprovechable generada por los subsectores porcícola y lechero especializado

8.4. Estimación teórica del potencial técnico-energético aprovechable del estiércol generado por los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el Departamento de Antioquia

En la Tabla 18 se presenta el potencial técnico-energético aprovechable de la biomasa residual generada por el subsector porcícola mediante digestión anaerobia, para los municipios del Departamento de Antioquia.

Tabla 18. Potencial energético del subsector porcícola en Antioquia

Estado fisiológico	BR (Kg estiércol/año)	MS (Kg MS/Kg estiércol)	SV (Kg SV/ Kg MS)	BMP (m ³ CH ₄ / Kg SV)	PCI CH ₄ (TJ/m ³ CH ₄)	PTEA porcícola (TJ/año)
Lechones 1-60 días	59.597.419	0.29	0.77	0.31	2,24E-05	92
Levante 61 - 120 días	217.711.178					338
Ceba 121 - 180 días	338.818.086					525
Reproductor	11.700.615					18
Hembras 120 - 240 días	41.759.577					65
Hembras cría >240 días	212.576.029					330
Cerdos de traspatio	340.893.267					529
Total	1.223.056.171	-	-	-	-	1.896

Abreviaturas: Biomasa residual (BR); Materia seca (MS); Sólidos volátiles (SV); Potencial bioquímico de metano (BMP); Poder calorífico inferior del metano (PCI CH₄); Potencial técnico-energético aprovechable (PTEA)

Utilizando la información de materia seca, sólidos volátiles y BMP que aparece en la Tabla 18 y la Tabla 20, puede calcularse que una tonelada anual de estiércol bovino produce 27.945 metros cúbicos de metano y que una toneladas anual de estiércol porcino produce 69.223 metros cúbicos de metano.

Además, se estima que el estiércol generado por el subsector porcícola en el Departamento de Antioquia tiene un potencial técnico-energético aprovechable de 1.896 TJ/año, el cual puede oscilar en un rango entre 1.611 y 2.186 TJ/año, correspondiente a un intervalo de confianza del 95%.

De los 1.896 TJ/año, solamente el 27,87% es aportado por los cerdos traspatio, mientras que la mayor parte del potencial energético del subsector porcícola, correspondiente al 72,13%, es originado por granjas tecnificadas que utilizan sistemas de producción intensivos, donde los mayores aportantes al potencial energético son los animales de ceba de 121 a 180 días (27,70%), los cerdos de levante de 61 a 120 días (17,80%) y las hembras de cría de más de 240 días (17,38%). Los cerdos de los demás estados fisiológicos tienen aportes inferiores al 5% sobre el potencial energético del subsector porcícola.

Los 10 municipios con mayor potencial energético generado por el estiércol del subsector porcícola son Don Matías (166,67 TJ/año), Medellín (144,73 TJ/año), Ebéjico (129 TJ/año), Santa Rosa de Osos (121,26 TJ/año), Santo Domingo (72,13 TJ/año), San Pedro de los Milagros (68,21 TJ/año), Barbosa (64,78 TJ/año), Concordia (53,04 TJ/año), Entreríos (49,60 TJ/año) y Angelópolis (45,08 TJ/año).

Tabla 19. Potencial técnico-energético aprovechable generado por el subsector porcícola

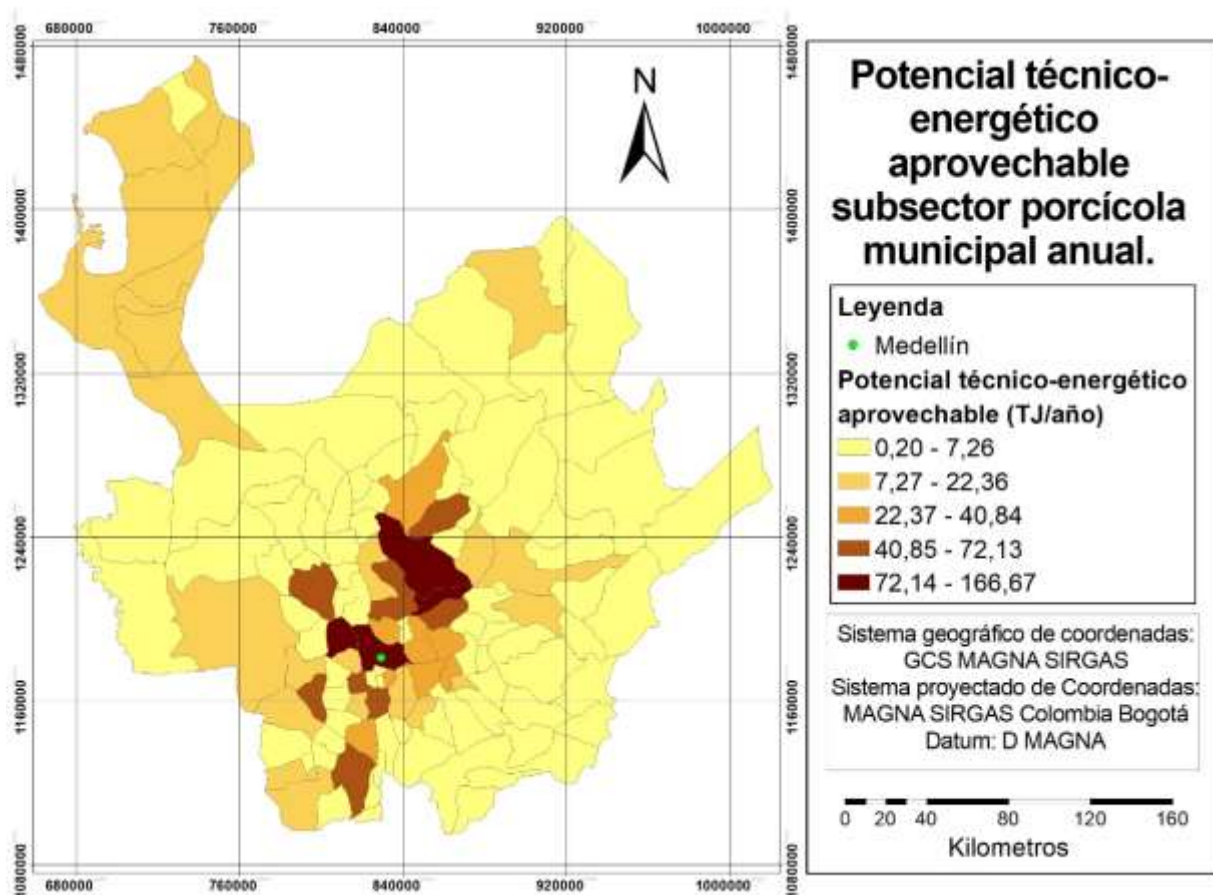
MUNICIPIO	PTEA (TJ/año)
DON-MATIAS	166,67
MEDELLÍN	144,73
EBÉJICO	129,00
SANTA-ROSA-DE-OSOS	121,26
SANTO-DOMINGO	72,13
SAN-PEDRO-DE-LOS-MILAGROS	68,21
BARBOSA	64,78
CONCORDIA	53,04
ENTRERRÍOS	49,60
ANGELÓPOLIS	45,08
CALDAS	44,64
TÁMESIS	43,82
JERICO	43,65
ANGOSTURA	43,52
YARUMAL	40,84
FREDONIA	40,47
GUARNE	39,62
MARINILLA	36,00
SANTA-BARBARA	33,77
RIONEGRO	32,18
ENVIGADO	28,91
GIRARDOTA	28,13
BELLO	26,78
GOMEZ-PLATA	22,36
AMAGÁ	20,24
URRAO	17,52
YOLOMBÓ	17,22
LA-CEJA	17,19
TURBO	16,48
RETIRO	16,08
ARBOLETES	15,99
SAN-ROQUE	15,12
ANDES	14,81
APARTADÓ	13,77
SALGAR	13,33
CHIGORODÓ	12,06
HELICONIA	10,73
EL-SANTUARIO	10,51
CAUCASIA	10,44
MUTATÁ	10,17
BETULIA	9,30
CAREPA	8,76
NECOCLÍ	8,75
BETANIA	8,68
BELMIRA	8,11

MUNICIPIO	PTEA (TJ/año)
SAN-PEDRO-DE-URABA	8,08
PEÑOL	7,26
CAROLINA	6,17
ARMENIA	6,07
PUERTO-BERRIO	5,84
JARDÍN	5,79
COPACABANA	5,68
CISNEROS	5,64
VALPARAISO	5,39
HISPANIA	5,31
TITIRIBÍ	5,31
SAN-RAFAEL	5,28
NECHÍ	5,25
CÁCERES	5,18
SAN-VICENTE-FERRER	4,79
EL-CARMEN-DE-VIBORAL	4,72
SAN-JUAN-DE-URABA	4,46
TARAZÁ	4,45
LA-UNION	4,09
VENECIA	3,97
VALDIVIA	3,92
FRONTINO	3,88
LIBORINA	3,73
CAÑASGORDAS	3,61
VEGACHÍ	3,47
AMALFI	3,25
MACEO	3,23
PUERTO-TRIUNFO	3,10
REMEDIOS	3,09
SAN-JOSE-DE-LA-MONTANA	2,82
CIUDAD-BOLIVAR	2,70
YALÍ	2,64
CARAMANTA	2,63
SONSÓN	2,63
YONDÓ	2,41
ABEJORRAL	2,22
GRANADA	2,21
EL-BAGRE	2,08
LA-PINTADA	2,03
NARINO	2,03
SAN-JERONIMO	2,00
CONCEPCION	1,94
ITUANGO	1,73
SAN-LUIS	1,73
GUATAPÉ	1,72
PUERTO-NARE	1,71
LA-ESTRELLA	1,49

MUNICIPIO	PTEA (TJ/año)
SOPETRÁN	1,45
ZARAGOZA	1,19
COCORNÁ	1,13
MONTEBELLO	1,09
PUEBLORRICO	1,06
TARSO	1,05
SAN-ANDRES-DE-CUERQUIA	1,00
CAICEDO	0,90
SEGOVIA	0,88
CAMPAMENTO	0,81
ITAGÜÍ	0,79
DABEIBA	0,78
SAN-CARLOS	0,76
SANTA-FE-DE-ANTIOQUIA	0,76
URAMITA	0,76
CARACOLÍ	0,71
ANORÍ	0,67
BRICENO	0,67
ABRIAQUÍ	0,65
MURINDO	0,60
GUADALUPE	0,59
TOLEDO	0,58
VIGIA-DEL-FUERTE	0,53
ALEJANDRÍA	0,52
PEQUE	0,48
SAN-FRANCISCO	0,45
SABANALARGA	0,44
ANZÁ	0,41
SABANETA	0,41
OLAYA	0,33
GIRALDO	0,32
ARGELIA	0,30
BURITICÁ	0,20
TOTAL	1.896

Abreviaturas: Potencial técnico-energético aprovechable (PTEA)

En el Mapa 6 se presenta la distribución del potencial técnico-energético aprovechable obtenido mediante digestión anaerobia a partir del estiércol del subsector porcícola para cada uno de los municipios del Departamento.



Mapa 6. Potencial técnico-energético aprovechable municipal anual del subsector porcícola

En la Tabla 20 se presenta el potencial energético de la biomasa residual generada por el subsector lechero especializado en el Departamento de Antioquia.

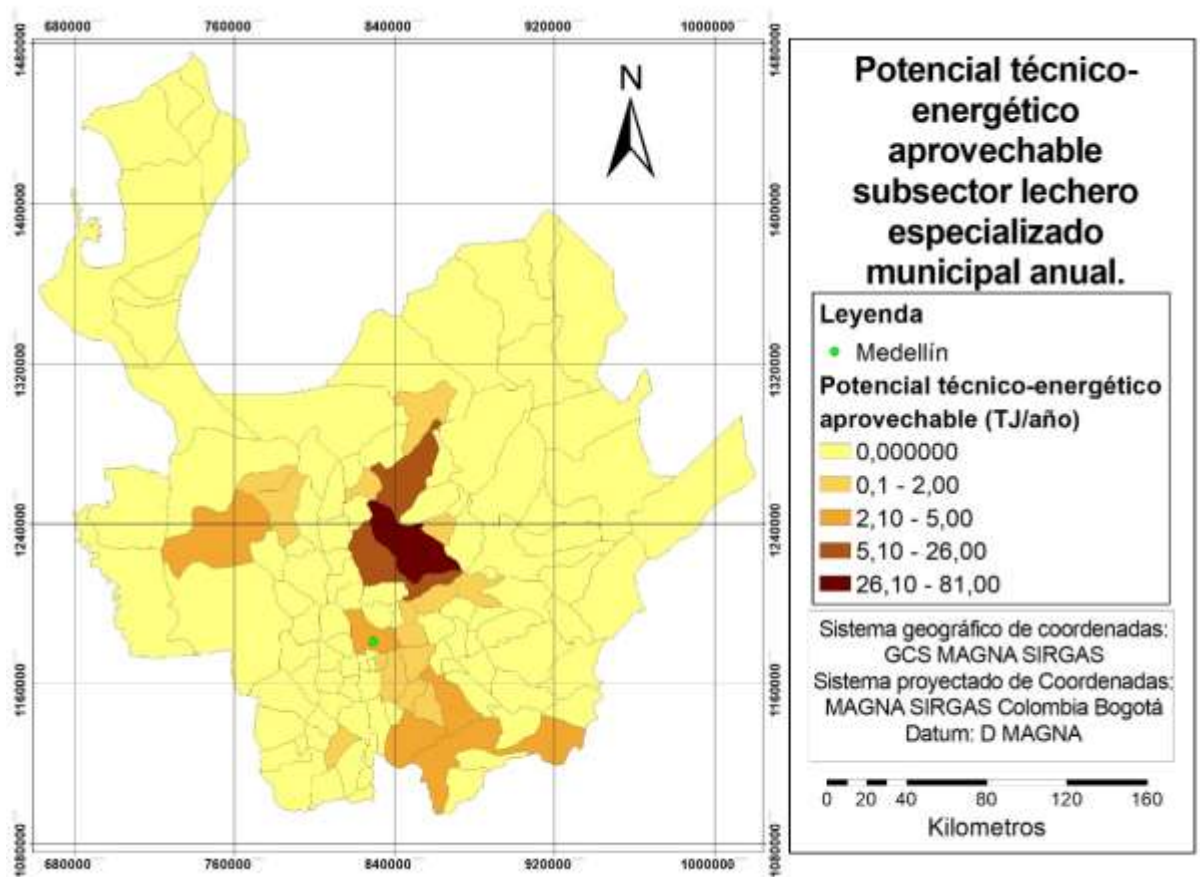
Tabla 20. Potencial energético del subsector lechero especializado en el Departamento de Antioquia

Sistema de producción	BR (Kg estiércol/año)	MS (Kg MS/Kg estiércol)	SV (Kg SV / Kg MS)	BMP (m ³ CH ₄ / Kg SV)	PCI CH ₄ (TJ/m ³ CH ₄)	PE lechero especializado (TJ/año)
Vacas de ordeño, lechería especializada	1.196.830.620	0.15	0.81	0.23	2,24 E-05	749
Total	1.196.830.620	-	-	-	-	749

Abreviaturas: Biomasa residual (BR); Materia seca (MS); Sólidos volátiles (SV); Potencial bioquímico de metano (BMP); Poder calorífico inferior del metano (PCI CH₄); Potencial energético (PE)

Las 182.166 vacas destinadas a sistemas especializados de producción de leche en el Departamento de Antioquia generan 1.196.831 toneladas anuales de estiércol y tienen un potencial energético de 749 TJ/año por digestión anaerobia. Sin embargo, como el ganado lechero especializado se reúne dos veces al día para la realización del ordeño, solamente se hace posible la recolección del 25% del total de estiércol generado, el cual tiene un potencial técnico-energético aprovechable por digestión anaerobia de 187 TJ/año, que puede oscilar en un rango entre 156 y 236 TJ/año, correspondiente a un intervalo de confianza del 95%.

Los resultados del potencial técnico-energético aprovechable para el subsector lechero especializado se presentan en el Mapa 7, para cada uno de los municipios del Departamento de Antioquia.



Mapa 7. Potencial técnico-energético aprovechable municipal anual del subsector lechero especializado

Los municipios con mayor potencial técnico-energético aprovechable por digestión anaerobia del estiércol del subsector lechero especializado son Santa Rosa de Osos (80,68 TJ/año), Entreríos (26,01 TJ/año), Don Matías (15,42 TJ/año), Yarumal (14,24 TJ/año) y Belmira (13,15 TJ/año), todos ellos ubicados en la subregión norte del Departamento de Antioquia. La suma del potencial técnico-energético aprovechable de los municipios de

la subregión norte de Antioquia anteriormente mencionados arroja un valor de 149 TJ/año, correspondiente al 79,82% del potencial del Departamento. Todos los demás municipios del Departamento tienen un potencial técnico-energético aprovechable inferior a 5 TJ/año, como por ejemplo los municipios de Sonsón (4,66 TJ/año) y Medellín (3,90 TJ/año).

Tabla 21. Potencial técnico-energético aprovechable por parte del subsector lechero especializado

MUNICIPIO	PTEA (TJ/año)
SANTA ROSA DE OSOS	80,68
ENTRERRÍOS	26,01
DON MATÍAS	15,42
YARUMAL	14,24
BELMIRA	13,15
SONSÓN	4,66
MEDELLÍN	3,90
ABEJORRAL	3,11
EL CARMEN DE VIBORAL	3,03
FRONTINO	3,02
SAN ANDRÉS DE CUERQUÍA	2,47
LA UNIÓN	1,65
BARBOSA	1,59
LA CEJA	1,34
CAROLINA DEL PRINCIPE	1,23
CAÑASGORDAS	1,12
JERICÓ	0,98
VALDIVIA	0,97
EL RETIRO	0,97
SANTO DOMINGO	0,87
RIONEGRO	0,82
GIRARDOTA	0,78
ENVIGADO	0,67
URAMITA	0,67
GUARNE	0,62
SOPETRÁN	0,42
SANTA BÁRBARA	0,41
ABRIAQUÍ	0,35
SAN VICENTE	0,33
ITUANGO	0,27
COPACABANA	0,25
EL SANTUARIO	0,21
GRANADA	0,21
PUERTO TRIUNFO	0,17
URRAO	0,12
LIBORINA	0,11
CONCEPCIÓN	0,08
HISPANIA	0,07
EBÉJICO	0,07

MUNICIPIO	PTEA (TJ/año)
ANGOSTURA	0,06
BRICEÑO	0,06
PUERTO BERRÍO	0,05
PUEBLO RICO	0,04
CARACOLÍ	0,02
GUADALUPE	0,01
TOTAL	187

Abreviaturas: Potencial técnico-energético aprovechable (PTEA)

El presente estudio estimó que el estiércol generado por la ganadería de carne, doble propósito y lechería especializada en Antioquia, tiene un potencial energético teórico de 8.566 TJ/año. También se estimó que el subsector lechero especializado tiene un potencial energético teórico de 749 TJ/año y un potencial técnico-energético aprovechable de 187 TJ/año, que para un intervalo de confianza del 95% puede presentar una oscilación entre los 156 y 236 TJ/año.

Para el subsector porcícola, en este estudio se estimó un potencial técnico-energético aprovechable de 1.896 TJ/año, mientras que en el “Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia” se calculó un potencial de 1.281 TJ/año, debido probablemente a que en el año 2010 se censaron 1.072.601 cerdos de diferentes grupos etarios, pero para el 2018 la cifra ascendió hasta 1.855.405 animales.

Se estimó un potencial técnico-energético aprovechable total de 2.084 TJ/año, de los cuales el 91,01% son producidos por el subsector porcícola y solamente el 8,99% se genera por el subsector lechero especializado. Adicionalmente, el potencial técnico-energético aprovechable total oscila en un rango entre 1.767 y 2.422 TJ/año, correspondiente a un intervalo de confianza del 95%.

En la Tabla 22 se presenta el potencial técnico-energético aprovechable total para los municipios del Departamento de Antioquia.

Tabla 22. Potencial técnico-energético aprovechable total por municipios en Antioquia

MUNICIPIO	PTEA total (TJ/año)	% Subsector porcícola	% Subsector lechero especializado
SANTA ROSA DE OSOS	201,9	60,0%	39,9%
DON MATIAS	182,1	91,5%	8,4%
MEDELLIN	148,6	97,3%	2,6%
EBEJICO	129,0	99,9%	0,0%
ENTRERRIOS	75,6	65,6%	34,4%
SANTO DOMINGO	73,0	98,8%	1,2%
SAN PEDRO	68,2	100%	0,0%

MUNICIPIO	PTEA total (TJ/año)	% Subsector porcícola	% Subsector lechero especializado
BARBOSA	66,3	97,6%	2,4%
YARUMAL	55,0	74,1%	25,8%
CONCORDIA	53,0	100%	0,0%
ANGELOPOLIS	45,0	100%	0,0%
CALDAS	44,6	100%	0,0%
JERICO	44,6	97,8%	2,1%
TAMESIS	43,8	100%	0,0%
ANGOSTURA	43,5	99,8%	0,1%
FREDONIA	40,4	100%	0,0%
GUARNE	40,2	98,4%	1,5%
MARINILLA	36,0	100%	0,0%
SANTA BARBARA	34,1	98,8%	1,2%
RIONEGRO	33,0	97,5%	2,4%
ENVIGADO	29,5	97,7%	2,2%
GIRARDOTA	28,9	97,2%	2,7%
BELLO	26,7	100%	0,0%
GOMEZ PLATA	22,3	100%	0,0%
BELMIRA	21,2	38,1%	61,8%
AMAGA	20,2	100%	0,0%
LA CEJA	18,5	92,7%	7,2%
URRAO	17,6	99,3%	0,7%
YOLOMBO	17,2	100%	0,0%
RETIRO	17,0	94,3%	5,7%
TURBO	16,4	100%	0,0%
ARBOLETES	15,9	100%	0,0%
SAN ROQUE	15,1	100%	0,0%
ANDES	14,8	100%	0,0%
APARTADO	13,7	100%	0,0%
SALGAR	13,3	100%	0,0%
CHIGORODO	12,0	100%	0,0%
HELICONIA	10,7	100%	0,0%
EL SANTUARIO	10,7	98,0%	1,9%
CAUCASIA	10,4	100%	0,0%
MUTATA	10,1	100%	0,0%
BETULIA	9,3	100%	0,0%
CAREPA	8,7	100%	0,0%
NECOCLI	8,7	100%	0,0%
BETANIA	8,6	100%	0,0%
SAN PEDRO DE URABA	8,0	100%	0,0%
EL CARMEN DE VIBORAL	7,7	60,8%	39,1%
CAROLINA	7,4	83,3%	16,6%
SONSON	7,2	36,0%	63,9%
PEÑOL	7,2	100%	0,0%
FRONTINO	6,9	56,2%	43,7%
ARMENIA	6,0	100%	0,0%
COPACABANA	5,9	95,8%	4,1%
PUERTO BERRIO	5,9	99,1%	0,8%
JARDIN	5,7	100%	0,0%

MUNICIPIO	PTEA total (TJ/año)	% Subsector porcícola	% Subsector lechero especializado
LA UNION	5,7	71,3%	28,6%
CISNEROS	5,6	100%	0,0%
VALPARAISO	5,3	100%	0,0%
HISPANIA	5,3	98,7%	1,3%
ABEJORRAL	5,3	41,6%	58,3%
TITIRIBI	5,3	100%	0,0%
SAN RAFAEL	5,2	100%	0,0%
NECHI	5,2	100%	0,0%
CACERES	5,1	100%	0,0%
SAN VICENTE	5,1	93,5%	6,4%
VALDIVIA	4,8	80,0%	19,9%
CAÑASGORDAS	4,7	76,3%	23,6%
SAN JUAN DE URABA	4,4	100%	0,0%
TARAZA	4,4	100%	0,0%
VENECIA	3,9	100%	0,0%
LIBORINA	3,8	97,1%	2,8%
VEGACHI	3,4	100%	0,0%
SAN ANDRES	3,4	28,7%	71,2%
PUERTO TRIUNFO	3,2	94,6%	5,3%
AMALFI	3,2	100%	0,0%
MACEO	3,2	100%	0,0%
REMEDIOS	3,0	100%	0,0%
SAN JOSE DE LA MONTAÑA	2,8	100%	0,0%
CIUDAD BOLIVAR	2,7	100%	0,0%
YALI	2,6	100%	0,0%
CARAMANTA	2,6	100%	0,0%
GRANADA	2,4	91,4%	8,5%
YONDO	2,4	100%	0,0%
EL BAGRE	2,0	100%	0,0%
LA PINTADA	2,0	100%	0,0%
NARIÑO	2,0	100%	0,0%
CONCEPCION	2,0	96,1%	3,8%
ITUANGO	2,0	86,3%	13,6%
SAN JERONIMO	2,0	100%	0,0%
SOPETRAN	1,8	77,4%	22,5%
SAN LUIS	1,7	100%	0,0%
GUATAPE	1,7	100%	0,0%
PUERTO NARE	1,7	100%	0,0%
LA ESTRELLA	1,4	100%	0,0%
URAMITA	1,4	53,2%	46,7%
ZARAGOZA	1,1	100%	0,0%
COCORNA	1,1	100%	0,0%
PUEBLORRICO	1,1	96,0%	3,9%
MONTEBELLO	1,0	100%	0,0%
TARSO	1,0	100%	0,0%
ABRIAQUI	1,0	64,8%	35,1%
CAICEDO	0,9	100%	0,0%
SEGOVIA	0,8	100%	0,0%

MUNICIPIO	PTEA total (TJ/año)	% Subsector porcícola	% Subsector lechero especializado
CAMPAMETO	0,8	100%	0,0%
ITAGUI	0,7	100%	0,0%
DABEIBA	0,7	100%	0,0%
SAN CARLOS	0,7	100%	0,0%
SANTAFE DE ANTIOQUIA	0,7	100%	0,0%
BRICEÑO	0,7	91,5%	8,4%
CARACOLI	0,7	97,1%	2,8%
ANORI	0,6	100%	0,0%
GUADALUPE	0,6	98,6%	1,3%
MURINDO	0,6	100%	0,0%
TOLEDO	0,5	100%	0,0%
VIGIA DEL FUERTE	0,5	100%	0,0%
ALEJANDRIA	0,5	100%	0,0%
PEQUE	0,4	100%	0,0%
SAN FRANCISCO	0,4	100%	0,0%
SABANALARGA	0,4	100%	0,0%
ANZA	0,4	100%	0,0%
SABANETA	0,4	100%	0,0%
OLAYA	0,3	100%	0,0%
GIRALDO	0,3	100%	0,0%
ARGELIA	0,3	100%	0,0%
BURITICA	0,2	100%	0,0%
TOTAL	2.084	-	-

Abreviaturas: Potencial técnico-energético aprovechable (PTEA)

El municipio con el mayor potencial técnico-energético aprovechable total es Santa Rosa de Osos con 201,94 TJ/año, donde el 60,05% es aportado por el subsector porcícola y el 39,95% del potencial se produce por el subsector ganadero de leche especializada.

Los municipios de Don Matías, Medellín, Ebéjico y Santo Domingo tienen un potencial técnico-energético aprovechable entre 73 TJ/año y 182,10 TJ/año, y en todos ellos se presenta una situación particular relacionada con el aporte predominante del subsector porcícola, con porcentajes superiores al 91%. Según lo anterior, en estos municipios el subsector ganadero de leche especializada aporta menos del 9% al potencial técnico-energético aprovechable total.

El municipio de Entreríos tiene un potencial técnico-energético aprovechable total de 75,61 TJ/año, en el cual el 65,60% es aportado por el subsector porcícola y el 34,30% del potencial se produce por el subsector ganadero de leche especializada.

En el municipio de Yarumal el subsector porcícola aporta el 74,15% y el subsector lechero especializado contribuye con el 25,85% del potencial

técnico-energético aprovechable total para dicho municipio, que corresponde a 55,08 TJ/año.

Los municipios de San Pedro, Barbosa, Concordia, Angelópolis, Caldas, Jericó, Támesis, Angostura, Fredonia y Guarne tienen un potencial técnico-energético aprovechable total desde 40,24 TJ/año hasta 68,21 TJ/año, con un aporte predominante del subsector porcícola, con porcentajes superiores al 97%, por lo que la participación del subsector ganadero de leche especializada resulta especialmente baja.

El municipio de Belmira tiene un potencial técnico-energético aprovechable total de 21,25 TJ/año, del cual el 38,13% es aportado por el subsector porcícola y el 61,87% del potencial se produce por el subsector ganadero de leche especializada.

Los municipios de Marinilla, Santa Bárbara, Rionegro, Envigado, Girardota, Bello, Gómez Plata, Amagá, La Ceja, Urao, Yolombó, El Retiro, Turbo y Arboletes, tienen un potencial técnico-energético aprovechable total dentro del intervalo de 15,99 TJ/año y 36 TJ/año, con un aporte predominante del subsector porcícola, con porcentajes superiores al 92%, por lo que la participación del subsector ganadero de leche especializada es inferior al 8%.

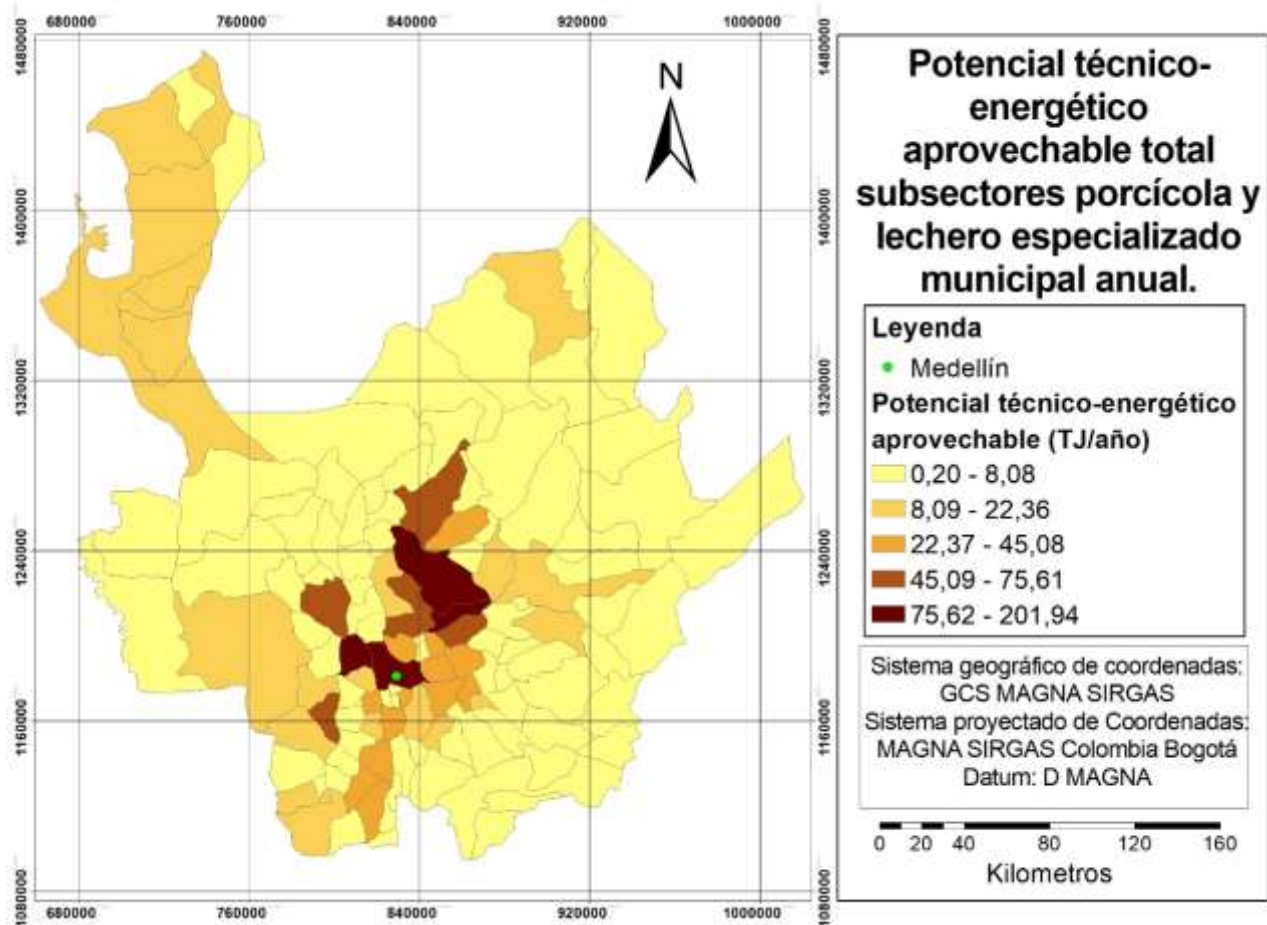
De manera general, los 33 municipios referidos en la Tabla 22 cuyo potencial técnico-energético aprovechable total se encuentra entre 5.12 TJ/año y 15.12 TJ/año, se caracterizan por el aporte predominante del subsector porcícola a dicho potencial energético, en porcentajes superiores al 93%. Sin embargo, en municipios como Carolina del Príncipe, El Carmen de Viboral, Frontino, Sonsón, La Unión y Abejorral el potencial técnico-energético aprovechable total se ve influenciado por el aporte del subsector ganadero de leche especializada en porcentajes que van desde el 16,66% hasta el 63,98%.

Por último, se encontró que un total de 60 municipios del Departamento tienen un potencial técnico-energético aprovechable total inferior a 4,89 TJ/año, con predominancia generalizada de aporte por parte del subsector porcícola.

En el Mapa 8 se espacializan los resultados del potencial técnico-energético aprovechable total, estimado como la suma del potencial energético de los dos (2) subsectores objeto de estudio.

Es importante mencionar que el resultado del potencial técnico-energético aprovechable total estimado por medio de la presente investigación no debe ser comparado directamente con los resultados de otros estudios, pues algunos de ellos realizan estimaciones teóricas del potencial energético y en otros se aplican restricciones técnicas como la exclusión del potencial energético de la biomasa residual producida por los cerdos

traspatio. En este sentido, el presente estudio se enfoca en aquella biomasa residual pecuaria realmente disponible para su valorización energética.



Mapa 8. Potencial técnico-energético aprovechable total municipal anual de los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada

9. Conclusiones

Mediante la investigación realizada se estableció el Atlas del potencial técnico-energético aprovechable por digestión anaerobia de la biomasa residual pecuaria para los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada en el departamento de Antioquia. Para la elaboración del Atlas se cuantificó la biomasa residual generada por los subsectores objeto de estudio, se estimó su respectivo potencial metanogénico y se estructuró una base de datos geográfica que permitió la elaboración de los mapas que conforman el Atlas.

Respecto de la cuantificación de biomasa se encontró que el subsector lechero genera 1.196.831 toneladas anuales de estiércol, pero solamente

299.208 toneladas por año corresponden a biomasa técnicamente aprovechable generada durante el ordeño. El resto del estiércol generado por ganadería de carne y doble propósito queda disperso en los potreros y corresponde a unas 13.384.499 toneladas anuales. Por su parte, el subsector porcícola es responsable de la generación de 1.223.056 toneladas anuales de estiércol en Antioquia, de las cuales el 72,13% se produce en granjas tecnificadas que emplean sistemas intensivos de producción, mientras que el 27,87% restante del estiércol se produce por cerdos de traspatio.

Entre los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada se generan 1.522.264 toneladas anuales de estiércol. Al subsector porcícola corresponde el 80,34% de dicha generación y a la ganadería de leche especializada el 19,66%, lo cual se debe a que la porcicultura en Antioquia se desarrolla mediante el confinamiento de los animales, lo que facilita la recolección del estiércol, mientras que la ganadería bovina es implementada principalmente como sistema extensivo.

En el Departamento de Antioquia, el estiércol generado por el subsector porcícola tiene un potencial técnico-energético aprovechable de 1.896 TJ/año, el cual puede oscilar en un rango entre 1.611 y 2.186 TJ/año, correspondiente a un intervalo de confianza del 95%.

Por otra parte, el estiércol generado por la ganadería de carne, doble propósito y lechería especializada, tiene un potencial energético teórico de 8.566 TJ/año. El estiércol del subsector lechero especializado tiene un potencial energético teórico de 749 TJ/año, pero su potencial técnico-energético aprovechable solamente es de 187 TJ/año, estimado por la recolección del 25% del estiércol generado durante el ordeño y que puede presentar una variación entre 156 y 236 TJ/año, correspondiente a un intervalo de confianza del 95%. Estos resultados evidencian la diferencia entre el potencial energético teórico y el potencial técnico-energético aprovechable, pues esta última definición concreta con mayor precisión el potencial energético relacionado a la biomasa residual realmente disponible para su valorización energética.

Los municipios de Santa Rosa de Osos (80,68 TJ/año), Entreríos (26,01 TJ/año), Don Matías (15,42 TJ/año), Yarumal (14,24 TJ/año) y Belmira (13,15 TJ/año), ubicados en la subregión norte de Antioquia, contribuyen con el 79,82% del potencial técnico-energético aprovechable generado por el subsector lechero.

La digestión anaerobia del estiércol generado por los subsectores porcícola y ganadería de leche especializada, permite obtener un potencial técnico-energético aprovechable total de 2.084 TJ/año para el Departamento de Antioquia, el cual puede oscilar en un rango entre 1.767 y 2.422 TJ/año, correspondiente a un intervalo de confianza del 95%. Dicho potencial

técnico-energético aprovechable total es aportado en un 91,01% por el subsector porcícola y solamente en un 8,99% por el subsector lechero especializado.

En el tema estadístico, la aplicación del diagrama de cajas y bigotes permite concluir que la información secundaria consultada sobre MS del estiércol porcino, SV del estiércol bovino, BMP del estiércol porcino y BMP del estiércol bovino presenta una distribución asimétrica, lo que refleja heterogeneidad de la información hallada, debido posiblemente a las diferentes condiciones en las que se encontraban las excretas caracterizadas, por la variedad de condiciones climáticas de los distintos lugares de procedencia de las muestras y la implementación de diferentes condiciones de manejo de los animales, incluyendo variaciones en el tipo de alimento suministrado.

10. Recomendaciones

Se recomienda la realización de estudios futuros para la caracterización de la biomasa residual generada en el Departamento y la implementación de mayor número de análisis estandarizados de BMP, para contar con mayor cantidad y calidad de información relacionada con las características físicas, químicas y el potencial metanogénico del estiércol porcino, bovino y ganadero de leche especializada en Antioquia, lo que resulta de gran importancia pues Antioquia es el departamento colombiano con mayor número de cabezas de ganado porcícola y lechero.

Por otra parte, el aprovechamiento energético de la biomasa residual cobra valor económico, social y ambiental, por las soluciones que brinda, pues emplea el estiércol generado localmente como fuente de combustible, reduce la emisión de gases efecto invernadero, substituye los combustibles fósiles, genera fertilizantes minerales y presenta una alternativa para la estabilización de residuos potencialmente dañinos para el ambiente, por lo que se recomienda su implementación como fuente energética alternativa en zonas de alta generación de biomasa residual, como en el caso de los municipios de Santa Rosa de Osos, Entreríos, Don Matías, Yarumal y Belmira, los cuales concentran el 79,82% del potencial técnico-energético aprovechable del subsector lechero especializado en Antioquia.

También se recomienda la utilización de la biomasa residual como una opción energética para la obtención del biometano por parte de aquellas familias campesinas con actividades pecuarias porcícolas o ganaderas a pequeña escala, con la finalidad de cubrir sus necesidades básicas. En este sentido, el biogás puede constituirse en una fuente no convencional de energía renovable capaz de ofrecer soluciones de gas combustible y electricidad especialmente en zonas no interconectadas eléctricas (ZNI),

ubicados en localidades típicamente afectadas por restricciones sociales y de infraestructura.

Es importante recalcar que aquellas personas naturales o jurídicas que generen energía eléctrica a partir de estiércol como biomasa, podrán considerarse como auto generadores, por lo cual podrán utilizar dicha energía eléctrica para suplir sus necesidades y en caso de generar excedentes de energía eléctrica, podrán entregarlos a la red, en los términos establecidos por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).

Se recomienda la valoración de otros sistemas productivos ganaderos diferentes al extensivo, o el diseño de estrategias que permitan la recolección del estiércol bovino disperso en los potreros de las fincas, para facilitar su aprovechamiento, teniendo en cuenta que el 97,81% de éste sigue diseminado generando impactos ambientales adversos. Dicha biomasa residual podría ser empleada por su potencial metanogénico o también podría ser utilizada en programas de fertilización del suelo mediante la aplicación de técnicas de estabilización como el compostaje.

Se sugiere que el gobierno departamental dedique esfuerzos para la georeferenciación de los usuarios generadores de biomasa residual pecuaria, con lo cual se podría establecer con mayor precisión los lugares más idóneos para el establecimiento de plantas de digestión anaerobia del estiércol producido, con la ayuda de las herramientas que brindan los sistemas de información geográfica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IDEAM, UPME, and UIS, "Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia." 2010.
- [2] PNUMA and OMM, "Cuarto informe de evaluación (AR4) del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC)," 2007.
- [3] A. Tamayo Londoño, "Recuperación energética de porcínasa y formulación de insumos para un sistema acoplado cerdos-pasto-leche en el Norte de Antioquia," Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [4] Departamento Nacional de Planeación, "CONPES 3577," 2009.
- [5] Minambiente, WWF, and Fundación Natura Colombia, "El acuerdo de París. Así actuará Colombia frente al cambio climático," Santiago de Cali, 2016.

- [6] Departamento Nacional de Planeación, "CONPES 3874," Bogotá, 2016.
- [7] L. F. Ramírez Balaguera and D. F. Barrera Ojeda, "POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA BIOMASA RESIDUAL PECUARIA DEL DEPARTAMENTO DE CUNDINAMARCA – COLOMBIA," UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS, 2017.
- [8] E. de Jong, R. Van Ree, and I. K. Kuant, "Biorefineries: adding value to the sustainable utilisation of biomass," 2009.
- [9] T. Abbasi, S. M. Tauseef, and S. A. Abbasi, "Biogas energy," in *Biogas Energy*, 2012, pp. 1–169.
- [10] M. . Diaz, S. . Espitia, and F. Molina, *Digestión anaerobia una aproximación a la tecnología*. Bogotá, 2002.
- [11] C. P. C. Bong, L. Y. Lim, C. T. Lee, J. J. Klemeš, C. S. Ho, and W. S. Ho, "The characterization and treatment of food waste for improvement of biogas production during anaerobic digestion – A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 1545–1558, 2018.
- [12] A. Wellinger, J. Murphy, and D. Baxter, Eds., *The biogas handbook: science, production and applications*. Woodhead publishing Limited, 2013.
- [13] H. B. Moller, S. G. Sommer, and B. . Ahring, "Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure," *Biomass and Bioenergy*, vol. 26, no. 5, pp. 485–495, 2004.
- [14] I. Angelidaki *et al.*, "Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays," *Water Sci. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 927–934, 2009.
- [15] C. Holliger *et al.*, "Towards a standardization of biomethane potential tests," *Water Sci. Technol.*, vol. 74, no. 11, pp. 2515–2522, Dec. 2016.
- [16] D. P. Galvis Pinzon 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] G. Blanco, E. Santalla, V. Córdoba, and A. Levy, "Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos," Washington, 2017.
- [18] S. C. Bhattacharya *et al.*, "An assessment of the potential for non-plantation biomass resources in selected Asian countries for 2010," *Biomass and Bioenergy*, vol. 29, no. 3, pp. 153–166, 2005.
- [19] M. M. Rahman and J. V. Paatero, "A methodological approach for assessing potential of sustainable agricultural residues for electricity generation: South Asian perspective," *Biomass and Bioenergy*, vol. 47, pp. 153–163, 2012.

- [20] J. Dominguez Bravo, P. Ciria, L. Esteban, D. Sánchez, and P. Lasry, "Evaluación de la biomasa potencial como recurso energético en la región de Navarra (España)," *GeoFocus*, vol. 3, pp. 1–10, 2003.
- [21] F. S. Lyakurwa, "Assessment of the energy potential of crop residues and animal wastes in Tanzania," *Indep. J. Manag. Prod.*, vol. 7, no. 4, pp. 1227–1239, 2016.
- [22] Ministerio de agricultura y bosques Finlandia, "Biomass atlas," 2017. [Online]. Available: <https://www.luke.fi/biomassa-atlas/en/>.
- [23] M. A. Gonzalez *et al.*, "Methodology for estimating biomass energy potential and its application to Colombia," *Appl. Energy*, vol. 136, pp. 781–796, 2014.
- [24] UPME, UNAL, and TECSOL, "Estimación del potencial de conversión a biogás de la biomasa en colombia y su aprovechamiento," 2018.
- [25] D. A. Allen Perkins, "Diseño y construcción de un digestor anaerobio de flujo pistón que trate los residuos generados en una explotación ganadera de la localidad de Loja, Ecuador, empleando tecnologías apropiadas." p. 54, 2010.
- [26] Corantioquia and CNPML, "Fincas lecheras," Medellín, 2016.
- [27] N. Herrero Garcia, A. Mattioli, A. Gil, N. Frison, F. Battista, and D. Bolzonella, "Evaluation of the methane potential of different agricultural and food processing substrates for improved biogas production in rural areas," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 112, pp. 1–10, 2019.
- [28] Y. gan Liang, L. Xu, J. Bao, K. A. Firmin, and W. Zong, "Attapulгите enhances methane production from anaerobic digestion of pig slurry by changing enzyme activities and microbial community," *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 222–232, 2020.
- [29] F. Duarte Vera, A. Magaña Caballero, and F. Rodríguez Garza, "UTILIZACION DE HECES EN LA ALIMENTACION ANIMAL. CARACTERIZACION QUIMICO-NUTRICIONAL DE HECES DE BOVINOS Y PORCINOS," Querétaro, 1998.
- [30] C. Ivan, T. María, V. Aura, A. Paola, and H. Mario, "Anaerobic co-digestion of organic residues from different productive sectors in Colombia: Biomethanation potential assessment," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 49, pp. 385–390, 2016.
- [31] G. Krishna Kafle and L. Chen, "Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical models," *Waste Manag.*, vol. 48, pp. 492–502, 2016.

- [32] Y. gan Liang, X. juan Li, J. Zhang, L. gan Zhang, and B. Cheng, "Effect of microscale ZVI/magnetite on methane production and bioavailability of heavy metals during anaerobic digestion of diluted pig manure," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 24, no. 13, pp. 12328–12337, 2017.
- [33] J. Yang, D. Wang, Z. Luo, and W. Zeng, "Influence of reflux ratio on the anaerobic digestion of pig manure in leach beds coupled with continuous stirred tank reactors," *Waste Manag.*, vol. 97, pp. 115–122, 2019.
- [34] J. Zhang *et al.*, "Effects of magnetite on anaerobic digestion of swine manure: Attention to methane production and fate of antibiotic resistance genes," *Bioresour. Technol.*, vol. 291, no. 121847, 2019.
- [35] K. Dhamodharan, V. Kumar, and A. Kalamdhad, "Effect of different livestock dungs as inoculum on food waste anaerobic digestion and its kinetics," *Bioresour. Technol.*, vol. 180, pp. 237–241, 2015.
- [36] S. Dechrugsa, D. Kantachote, and S. Chaiprapat, "Effects of inoculum to substrate ratio, substrate mix ratio and inoculum source on batch co-digestion of grass and pig manure," *Bioresour. Technol.*, vol. 146, pp. 101–108, 2013.
- [37] Y. Xiao *et al.*, "Improved biogas production of dry anaerobic digestion of swine manure," *Bioresour. Technol.*, vol. 294, no. August, p. 122188, 2019.
- [38] Y. Wang *et al.*, "Effects of co-digestion of cucumber residues to corn stover and pig manure ratio on methane production in solid state anaerobic digestion," *Bioresour. Technol.*, vol. 250, no. September 2017, pp. 328–336, 2018.
- [39] Y. Olaya Arboleda and L. O. González Salzedo, "Módulo para la asignatura de construcciones agrícolas," in *Fundamentos para el diseño de biodigestores*, Palmira: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, 2009, p. 32.
- [40] M. E. Ramírez-Islas, L. P. Güereca, F. S. Sosa-Rodriguez, and M. A. Cobos-Peralta, "Environmental assessment of energy production from anaerobic digestion of pig manure at medium-scale using life cycle assessment," *Waste Manag.*, vol. 102, pp. 85–96, 2020.
- [41] R. Steffen, O. Szolar, and R. Braun, *Feedstocks for Anaerobic Digestion*. Vienna, 1998.
- [42] M. Luna-delRisco, A. Normak, and K. Orupold, "Biochemical methane potential of different organic wastes and energy crops from Estonia," *Agron. Res.*, vol. 9, pp. 331–342, 2011.
- [43] L. C. Ferreira, T. S. O. Souza, F. Fdz-Polanco, and S. I. Pérez-Elvira, "Thermal steam explosion pretreatment to enhance anaerobic biodegradability of the solid fraction of pig manure,"

Bioresour. Technol., vol. 152, pp. 393–398, 2014.

- [44] Y. ying Hu, J. Wu, H. zhi Li, S. Poncin, K. jun Wang, and J. e. Zuo, “Study of an enhanced dry anaerobic digestion of swine manure: Performance and microbial community property,” *Bioresour. Technol.*, vol. 282, no. January, pp. 353–360, 2019.
- [45] D. T. N. Wijesinghe, K. B. Dassanayake, P. J. Scales, S. G. Sommer, and D. Chen, “Effect of Australian zeolite on methane production and ammonium removal during anaerobic digestion of swine manure,” *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 1233–1241, 2018.
- [46] S. Arango Osorio, O. Vasco Echeverri, G. López Jiménez, J. González Sanchez, and I. I. Millán, “Methodology for the desing and economic assessment of anaerobic digestion plants to produce energy and biofertilizer from livestock waste,” *Sci. Total Environ.*, vol. 685, pp. 1169–1180, 2019.
- [47] G. Jarret, J. Martínez, and J.-Y. Dourmad, “Pig feeding strategy coupled with effluent management – fresh or stored slurry, solid phase separation – on methane potential and methane conversion factors during storage,” *Atmos. Environ.*, vol. 45, no. 34, pp. 6204–6209, 2011.
- [48] S. Chen, W. Cao, and R. Liu, “Kinetics of Methane Production from Swine Manure and Buffalo Manure,” *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 177, no. 4, pp. 985–995, 2015.
- [49] A. Coldebella, S. Melegari de Souza, J. de Souza, and A. C. Koheler, “viabilidad de la cogeneración de energía eléctrica con biogás de ganado lechero,” Universidad Estatal del Oeste de Paraná UNIOESTE, 2006.
- [50] J. Martí Herrero, *Guía de diseño y manual de instalación de biodigestores familiares*, Creative C. Bolivia, 2008.
- [51] A. Torres-Pitarch *et al.*, “The inclusion of rapeseed meal in fattening pig diets, as a partial replacer of soybean meal, alters nutrient digestion, faecal composition and biochemical methane potential from faeces,” *Anim. Feed Sci. Technol.*, vol. 198, pp. 215–223, 2014.
- [52] J. C. Mendoza, “Biogás perspectivas en Colombia estudios y casos en la porcicultura.” Fondo Nacional de la Porcicultura, Bogotá, 2018.
- [53] J. C. Pasqual, H. A. Bollman, C. A. Scott, T. Edwiges, and T. C. Baptista, “Assessment of collective production of biomethane from livestock waste for urban transportation mobility in Brasil and the United States,” *Energies*, vol. 11, no. 4, p. 997, 2018.
- [54] P. Ferrer, M. López, A. Cerisuelo, D. Peñaranda, and V. Moset, “The use of agricultural substrates to improve methane yield in anaerobic

co-digestion with pig slurry: Effect of substrate type and inclusion level,” *Waste Manag.*, vol. 34, no. 1, pp. 196–203, 2014.

- [55] C. Fen *et al.*, “Maximal methane potential of different animal manures collected in northwest region of China,” *Int. J. Agric. Biol. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 202–208, 2017.
- [56] C. . Pham, J. . Triolo, T. T. . Cu, L. Pedersen, and S. G. Sommer, “Validation and Recommendation of Methods to Measure Biogas Production Potential of Animal Manure,” *Asian Australas. J. Anim. Sci.*, vol. 26, no. 6, pp. 864–873, 2013.
- [57] W. Zhang, Q. Lang, S. Wu, W. Li, H. Bah, and R. Dong, “Anaerobic digestion characteristics of pig manures depending on various growth stages and initial substrate concentrations in a scaled pig farm in Southern China,” *Bioresour. Technol.*, vol. 156, pp. 63–69, 2014.
- [58] J. Li, A. K. Jha, and T. R. Bajracharya, “Dry anaerobic co-digestion of cow dung with pig manure for methane production,” *Appl. Biochem. Biotechnol.*, vol. 173, no. 6, pp. 1537–1552, 2014.
- [59] C. H. Pham *et al.*, “Biogas production from steer manures in Vietnam: Effects of feed supplements and tannin contents,” *Waste Manag.*, vol. 69, pp. 492–497, 2017.
- [60] L. André *et al.*, “Dry anaerobic co-digestion of roadside grass and cattle manure at a 60 L batch pilot scale,” *Bioresour. Technol.*, vol. 289, no. July, p. 121737, 2019.
- [61] Y. Zhao *et al.*, “Co-digestion of oat straw and cow manure during anaerobic digestion: Stimulative and inhibitory effects on fermentation,” *Bioresour. Technol.*, vol. 269, no. July, pp. 143–152, 2018.
- [62] T. T. T. Cu *et al.*, “Biogas production from Vietnamese animal manure, plant residues and organic waste: Influence of biomass composition on methane yield,” *Asian-Australasian J. Anim. Sci.*, vol. 28, no. 2, pp. 280–289, Feb. 2015.
- [63] W. P. A. McVoitte and O. G. Clark, “The effects of temperature and duration of thermal pretreatment on the solid-state anaerobic digestion of dairy cow manure,” *Heliyon*, vol. 5, no. 7, p. e02140, 2019.
- [64] D. Valero, J. A. Montes, J. L. Rico, and C. Rico, “Influence of headspace pressure on methane production in Biochemical Methane Potential (BMP) tests,” *Waste Manag.*, vol. 48, pp. 193–198, Feb. 2016.
- [65] H. Aguirre, R. Larson, and M. Sharara, “Anaerobic digestion, solid-liquid separation and drying of dairy manure: Measuring constituents and modeling emission,” *Sci. Total Environ.*, vol. 696, 2019.

- [66] A. Degueurce, A. Trémier, and P. Peu, "Dynamic effect of leachate recirculation on batch mode solid state anaerobic digestion: Influence of recirculated volume, leachate to substrate ratio and recirculation periodicity," *Bioresour. Technol.*, vol. 216, pp. 553–561, 2016.
- [67] B. Xing *et al.*, "Cow manure as additive to a DMBR for stable and high-rate digestion of food waste : Performance and microbial community," *Water Res.*, vol. 168, p. 115099, 2020.
- [68] H. Sun *et al.*, "Co-digestion of *Laminaria digitata* with cattle manure: A unimodel simulation study of both batch and continuous experiment," *Bioresour. Technol.*, vol. 276, pp. 361–368, 2019.
- [69] Y. Ye, C. Zamalloa, H. Lin, M. Yan, D. Schmidt, and B. Hu, "Evaluation of anaerobic co-digestion of dairy manure with food wastes via bio-methane potential assay and CSTR reactor," *J. Environ. Sci. Heal.*, vol. 50, no. 3, pp. 217–227, 2015.
- [70] S. Mostafa Imeni, L. Pelaz, C. Corchado-Lopo, A. Maria Busquets, S. Ponsá, and J. Colón, "Techno-economic assessment of anaerobic co-digestion of livestock manure and cheese whey (Cow, Goat & Sheep) at small to medium dairy farms," *Bioresour. Technol.*, vol. 291, no. July, p. 121872, 2019.
- [71] H. El-Mashad and R. Zhang, "Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste," *Bioresour. Technol.*, vol. 101, no. 11, pp. 4021–4028, 2010.
- [72] R. Labatut, N. Scott, and L. Angenent, "Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates," *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 3, pp. 2255–2264, 2011.
- [73] F. Passos, V. Ortega, and A. Donoso Bravo, "Thermochemical pretreatment and anaerobic digestion of dairy cow manure: Experimental and economic evaluation," *Bioresour. Technol.*, vol. 227, pp. 239–246, 2017.
- [74] S. Luste and S. Loustarinen, "Enhanced methane production from ultrasound pre-treated and hygienized dairy cattle slurry," *Waste Manag.*, vol. 31, no. 9–10, pp. 2174–2179, 2011.
- [75] P. Tsapekos, P. Kougias, S. Kuthiala, and I. Angelidaki, "Co-digestion and model simulations of source separated municipal organic waste with cattle manure under batch and continuously stirred tank reactors," *Energy Convers. Manag.*, vol. 159, pp. 1–6, 2018.

ANEXO A

**BASE DE DATOS GEOGRÁFICA DE LA BIOMASA RESIDUAL
GENERADA POR LOS SUBSECTORES PORCÍCOLA Y GANADERÍA
DE LECHE ESPECIALIZADA EN EL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA**