

Potencial de biogás de los residuos agroindustriales generados en el departamento de Cundinamarca

Biogas potential of agro-industrial residues generated in the department of Cundinamarca

Potencial do biogás dos resíduos agro-industriais gerados no departamento de Cundinamarca

Karen Tatiana Montenegro Orozco¹; Ana Sofía Rojas Carpio^{1*}; Iván Cabeza Rojas¹; Mario Andrés Hernández Pardo²

¹Facultad de Ingeniería Ambiental. Universidad Santo Tomás (USTA), Carrera 9 No. 51-11, Bogotá, Colombia

²Ingeniería Ambiental. Universidad EAN, Calle 79 No. 11-45, Bogotá, Colombia

Resumen: El potencial de producción de biogás de residuos agroindustriales en el departamento de Cundinamarca fue calculado suponiendo su aprovechamiento a través de digestión anaerobia. El potencial se estableció a partir de los residuos generados en las actividades pecuarias, cultivos permanentes y transitorios. El cálculo del potencial se soportó en una recopilación, estandarización y procesamiento de la información disponible de áreas cultivadas y residuos generados en cada sector y/o actividad; Este se evaluó por tipo de residuo, municipio y región. El departamento de Cundinamarca tiene un potencial promedio de biogás de 1.117.567 TJ/año calculado por la transformación de los residuos agroindustriales a través de proceso anaerobio. Los residuos de mayor aporte en el potencial encontrado corresponden a aquellos generados por actividades relacionadas con los cultivos de café, caña panelera, arveja, papa; excretas bovinas y avícolas. Las regiones que podrían cobijar sistemas centralizados se identificaron en torno a los municipios de Fomeque, Guacheta y Anapoima, las cuales presentaron mayor potencial de metanización y generación de sustratos. El potencial estimado para estas regiones fue de 89.651, 127.513, 58.541 TJ/año para la región 1, región 2 y región 3, los cuales son similares a los reportados para plantas de biogás en varias regiones del mundo.

Palabras claves: *Biogás, biomasa, co-digestión anaerobia, potencial de metano, generación de residuos.*

Abstract: The biogas production potential of agro-industrial residues in the department of Cundinamarca was established assuming its valorization by anaerobic digestion process. The potential was established based on the residues generated by livestock activities, and transient or permanent crops. The estimation of the potential is supported in the collection, standardization and processing of the information available and cultivated areas of wastes generated in each sector and / or activity; this was evaluated by residue, municipality and region. Cundinamarca has an average potential of biogas of 1.117.567 TJ / year calculated by the transformation of agro-industrial wastes through the anaerobic process. The greatest contribution to this value correspond to those residues generated from crops of coffee, sugarcane, peas, potatoes and cattle and poultry manure activities. The regions that could host centralized systems were identified in the surroundings of the municipalities of Guaduas, Guacheta and Anapoima, which presented the greatest biogas potential and substrates generation. The potential associated to those regions was 89.651, 127.513, 58.541 TJ/año for the region 1, region 2 and region 3, which are similar to those reported for biogas plants in various regions worldwide.

Keywords: *Anaerobic co-digestion, biogas, biomass, residues generation, methane potential.*

Resumo: O potencial de produção de biogás dos resíduos agro-industriais, no departamento de Cundinamarca foi estabelecido assumindo a sua valorização pelo processo de digestão anaeróbia. O potencial foi estabelecido com base nos resíduos gerados pelas atividades de pecuária e cultivos transitórios ou permanentes. A estimativa do potencial é suportado na coleção, padronização e processamento das informações disponíveis e áreas de resíduos gerados em cada setor e / ou atividade cultivada; este foi avaliada por resíduo, município e região. Cundinamarca tem um potencial médio de biogás de 1.117.567 TJ / ano, calculado pela transformação de resíduos agro-industriais através do processo anaeróbio. A maior

contribuição para esse valor corresponde a essas resíduos gerados a partir de culturas de café, cana de açúcar, ervilhas, batatas e gado e atividades de esterco de galinha. As regiões que poderiam hospedar sistemas centralizados foram identificados nos arredores dos municípios de Guaduas, Guachetá e Anapoima, que apresentaram os maiores biogás potencial e substratos geração. O potencial associado a essas regiões foi 89.651, 127.513, 58.541 TJ/año para a região 3 a região 1, 2 e região, que são semelhantes aos relatados para as unidades de biogás em várias regiões do mundo.

Palavras chave: *biogás, biomassa, co-digestão anaeróbia, geração de residuos, potencial de metano.*

Introducción

En el departamento de Cundinamarca se generaron 727,7 t/d de residuos orgánicos representando un 66% de la generación total de residuos generados en el departamento [1]. El hecho de que el departamento no cuente con una actividad agrícola completamente tecnificada, hace que la oferta de biomasa residual por hectárea sea alta [1,2]. Por otra parte, se tiene que la generación de residuos en el sector pecuario es importante, ya que la participación sectorial en el PIB es de 16,9% [2], produciendo 9.073.209.816 t/d de residuos [1]. Los residuos generados en estos sectores son dispuestos en su mayoría en los rellenos instalados para el municipio, los cuales se encuentran a distancias considerables desde el punto de generación, como es el caso del relleno nuevo Mondoñedo ubicado en Bojaca, praderas de Magdalena en Girardot y relleno sanitario doña Juana en Bogotá, lo que provoca un aumento en los costos de disposición y manejo de dichos residuos [3]. Estos residuos pueden ser aprovechados a través de co digestión anaerobia donde la materia orgánica biodegradable se descompone por acción de bacterias anaerobias desde su forma más compleja hasta su forma más simple produciendo biogás con un contenido de metano entre 55 y 70% [4]. En varios países se realizan procedimientos y metodologías para la valorización de residuos, países europeos son pioneros en la obtención de energía eléctrica a partir de la generación de biogás como Alemania, Reino Unido y Dinamarca. Según los datos más recientes la producción bruta de electricidad a partir de biomasa en la Unión Europea en el año 2010 fue de 69,9 TWh, de los cuales 250 MWh corresponden a la electricidad generada a partir de co-digestión anaerobia proveniente principalmente de gases de vertederos y lodos de depuradora [5].

En el caso de Colombia el 65% de los residuos orgánicos generados de las actividades diarias son llevados dentro del paquete de residuos sólidos urbanos (RSU) a una disposición final en vertederos, celdas, rellenos u otro tipo de disposición [6], dejando de lado la implementación de técnicas para su aprovechamiento. El 35% restante de residuos orgánicos son utilizados para su valorización en algunas zonas del país donde se estima que el 49% es utilizado para compostaje [7], 17% en procesos de aprovechamiento termoquímico, 13% en lombricultura [7,8], y un 21% en procesos de valoración agronómica [7]. Por su parte los procesos anaerobios en el país no son comúnmente utilizados, ya que sus aplicaciones han sido limitadas y a pequeña escala principalmente para el tratamiento de residuos provenientes de la actividad porcina y bovina donde se han utilizado biodigestores tubulares continuos en granjas industriales con un promedio de 2.300 cerdos y 1.300 reses [9]. Estos montajes han obtenido en promedio 500 kW los cuales son utilizados para satisfacer necesidades básicas de las granjas [9]. Esta práctica lleva en el país más de treinta años, utilizando la energía para necesidades básicas del sector rural como la cocción de alimentos e iluminación [10], lo que permite identificar el alto potencial que presentan este tipo de residuos para la generación de energía.

De acuerdo a esto se hacen indispensables procesos de evaluación, cuantificación y caracterización de la biomasa residual que se genera en los procesos productivos, permitiendo el establecimiento de proyecciones adecuadas para la estimación del potencial de biogás a partir de residuos agroindustriales como fuente de energía. Por ende, el objetivo de este estudio es establecer el potencial de metano de los residuos provenientes de actividades agrícolas y pecuarias generados en el departamento de Cundinamarca, reconociendo los municipios y residuos que tengan mayor potencial de generación de biogás como resultado de sus tasas de generación o sus potenciales biológicos de producción de metano. Lo cual se soportado en una recopilación de información de producción de residuos, en los potenciales biológicos de metano de cada residuo y la disponibilidad espacial y temporal de los residuos. Esto se hace como un primer paso para el aprovechamiento de la biomasa residual en el marco de la Ley 1715 del 2014 sobre la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.

Materiales y métodos

El potencial de metano a partir de biomasa residual fue establecido a partir de tres acercamientos metodológicos: el primero se enfocó en la evaluación de la generación de residuos en cada uno de los municipios, el segundo estuvo orientado a calcular el potencial por tipo de biomasa residual en el departamento y por último se determinaron tres localizaciones donde se identificaron regiones que mostraron el mayor potencial de metano en el departamento. Todos estos cálculos se soportaron en la recopilación de información relacionada con los sistemas de producción agrícola y pecuaria del departamento, tomando como fuente la información suministrada por la Gobernación de Cundinamarca en la subdirección de planeación y desarrollo rural, la información de la Encuesta Nacional agropecuaria (2013), el anuario estadístico del sector agropecuario (2012), el censo nacional agropecuario (2014) suministrado por el Departamento administrativo nacional de estadística (DANE), levantamiento de información en campo en la UMATA de los municipios. Los datos se validaron a través de métodos estadísticos como media, moda, variabilidad de parámetro, nivel de confianza con el fin de tener un grado de certidumbre mayor en los datos [2,3,11,12].

Para el cálculo del potencial se tuvo en cuenta la generación de residuos de cada cultivo y actividad pecuaria del municipio, donde las fuentes de información consultadas fueron el Atlas de la biomasa, consultas en la UMATA y revisión de bibliografía sobre generación y disposición de residuos. Adicionalmente se investigaron las características físico-químicas de cada sustrato como porcentaje de sólidos volátiles, relación C/N (carbono/nitrógeno) y por último el potencial biológico de metano (BMP, por sus siglas en inglés). Con esta información se obtuvieron los potenciales por residuos y se totalizó el potencial de metano de todos los residuos del municipio. Posterior a esto el potencial de biogás por residuo se calculó teniendo en cuenta la clasificación de los diferentes residuos generados en el departamento, donde a partir de esto se establecieron las tasas de generación y se utilizó el potencial biológico de metano de cada residuo para hacer la estimación del potencial de cada residuo en el departamento. Esto se obtuvo a través del producto entre el BMP expresado en ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{kg SV}$), el contenido de sólidos volátiles de cada residuo ($\text{kg SV}/\text{kg residuo}$), y la generación de cada tipo de residuo (kg residuo), el resultado final se trabajó en unidades de TJ/año.

Por último se realizó una distribución de las zonas aptas para la instalación de centrales para la producción de biogás por medio del software Argis, obteniéndose una distancia la cual oscila entre 10 y 30 kilómetros entre cada punto seleccionado, evidenciando que a una distancia menor a 10 kilómetros los costos variables asociados al transporte aumentan, para una distancia menor a 10 km los costos asociados al transporte serían de \$3.313 por kilómetro y para una distancia mayor será de \$2.972 por kilómetro establecido para el año 2016 por el Ministerio de Transporte [12]. Adicionalmente se tuvieron en cuenta diversas variables, como la distribución de los sustratos que cuentan con un mayor potencial, la generación de los mismos, distancia entre puntos de generación de los residuos y los costos de transporte relacionados con dicha distancia.

Resultados y discusión

Actividad pecuaria y agrícola en el departamento de Cundinamarca

De acuerdo con los datos recolectados en la encuesta agropecuaria para el 2013, se consolidó que hay 246.106 Ha cosechadas, con un total de 121.188 ha de cultivos permanentes y 118.979 Ha de cultivos transitorios. Los cultivos transitorios ocupan un área de 130.834 Ha sembradas con una producción estimada de 1.589.498 t, resaltando los cultivos de papa, arveja y maíz como mayores productores. Los cultivos permanentes presentan áreas sembradas de 137.215 Ha, con una producción estimada de 735.299 t donde los cultivos de caña, café, flores y mora son los mayores productores en el departamento. Respecto a los residuos agrícolas se tienen en cuenta los asociados a cosecha que representan hojas, ramas, cáscara, fibra, pulpa, entre otros. Mientras que los residuos pecuarios están asociados al estiércol producido en los diferentes procesos de cría de animales.

Los residuos generados a partir de estos cultivos dependerán del rendimiento de cada uno, donde según las estadísticas agropecuarias realizadas por la Gobernación de Cundinamarca, los cultivos transitorios generan en promedio 55% del total del cultivo como residuo; referente a los cultivos permanentes se estima que solo se aprovecha un 35% del total del cultivo. Esta información es vital para la optimización de los sistemas

buscando minimizar costos, transporte, almacenamiento y aspectos ambientales [13]. Dentro de la información analizada, los cultivos de rosas, caña panelera, palma, banano y café son los de mayor producción en el departamento, pero tan solo los cultivos de rosas y café presentan una mayor tasa de generación de residuos siendo esta alrededor de 50% y 69% respectivamente. Por otro lado, en el departamento existen 1.288.570 cabezas de bovinos que se encuentran clasificados según su edad y propósito, 789.637 porcinos que se clasifican por el tipo de crianza (tecnificada o tradicional) y 157.995.267 aves que se encuentran clasificadas según su propósito (engorde, postura o traspatio). Los residuos generados por la actividad pecuaria son principalmente excretas donde el sector bovino genera 337.924 t estiércol/d, porcinos generan 1.143 t/d y el sub sector avícola genera 7.651.173 t estiércol/d [14].

Potencial de metano por municipio

Los resultados del potencial de biogás por municipio muestran que la biomasa residual pecuaria aporta en promedio el 76% del total frente al resto de residuos orgánicos, exceptuando el caso de Suesca (Figura 1). Esto es coherente dada la generación de estiércoles que es de 8.647.777 t/año, 411.736.967 t/año y 123.342.549 t/año para aves, porcinos y bovinos respectivamente [1] y por los potenciales biológicos de estos residuos 0,70 m³/kg SV, 0,351 m³/kg SV y 0,6 m³/kg SV respectivamente [14,15,16]. Sin embargo, estos valores deben revisarse identificando el estado de tecnificación de los procesos que conlleven a la recolección y disponibilidad de los residuos. Los municipios de Anapoima y Suesca presentan el mayor potencial producto de cultivos permanentes debido a que ocupan el 94% de hectáreas disponibles para la agricultura en el departamento. La presencia de cultivos como: mango, mandarina, naranja, lima, caña panelera, cacao, café y flores incrementa la generación de residuos dadas las tasas por área que son de 972.144.929 t/ha [1] en el municipio de Suesca. Dado que los sólidos volátiles y el potencial de metano tienen una relación directamente proporcional, se tiene que los cultivos mencionados anteriormente tienen un promedio del 94,6% de sólidos volátiles lo cual favorece la producción de metano [17]. Por el contrario, para el cultivo de caña panelera, el bagazo resultante corresponde a 30% a 38,5% del cultivo [18,19]. Para el cacao, los residuos (poda y cáscara) tienen un bajo potencial, pero son importantes debido al nivel de producción en el municipio. Adicional a ello se establece que el alto BMP que presenta el municipio de Suesca se encuentra relacionado con la alta producción de claveles y rosas la cual es de 116.940.000 t en 190 ha, esto aumenta la cantidad de residuos generados. Por último, la generación de residuos durante el beneficio del café corresponde al 95% del cultivo representado en mucilago, pergamino, pulpa y cisco [20], entre estos materiales el mucilago y la pulpa pueden aprovecharse para la producción de metano [21].

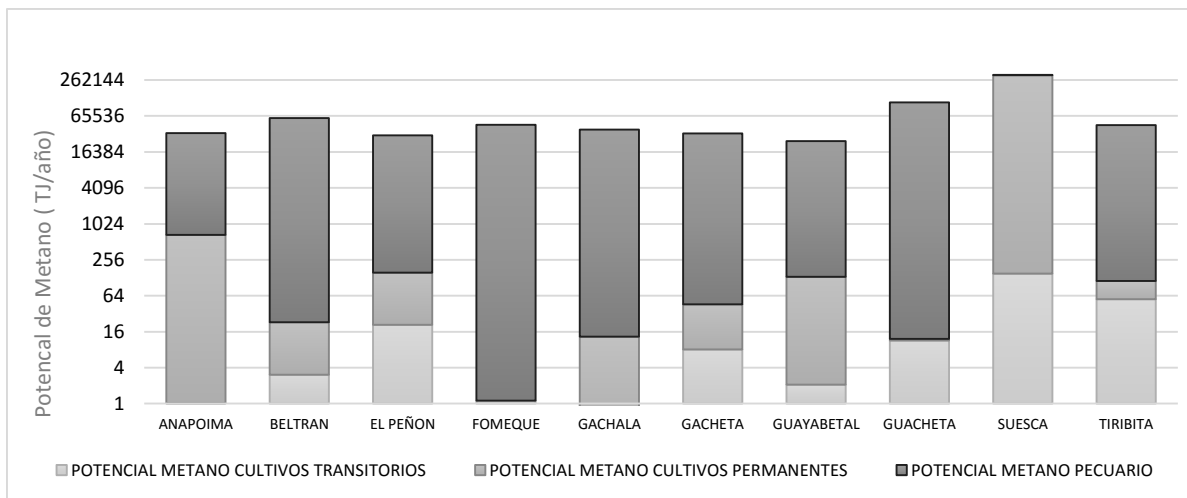


Figura 1. Potencial teórico de metano estimado por municipio.

Durante la poda y/o mantenimiento de los cultivos se generan alrededor de 15 a 25% de los residuos, los cuales corresponden a hojas, tallos y producto en descomposición o defectuoso [22,23]. Aunque estos materiales son principalmente lignocelulósicos, los sólidos volátiles pueden ser elevados como para el caso del cultivo de arveja donde se tiene 60%, cebada 77%, papa 78% y tomate con 93% [24,25]. Tibirita muestra un alto potencial de metano asociado a la existencia de cultivos transitorios los cuales ocupan un 51% de

hectáreas disponibles para siembra, se encuentran cultivos como arveja, frijol, habichuela, papa, tomate y ahuyama generando 4.851 t de residuos. Sin embargo, la dispersión de la producción a lo largo del municipio es una limitante para el aprovechamiento a gran escala de estos residuos, aunque se pueden implementar sistemas a pequeña escala los cuales tienen una operación y mantenimiento sencillo y sus desempeños ambientales y económicos son mejores comparados con sistemas a mediana y gran escala [26].

El mayor potencial de biometano generado por actividades pecuarias (Figura 1) se encuentra en el municipio de Fomeque, donde registran 9.200 bovinos, entre los 12 y 36 meses que producen un total de 2.508 t/d de estiércol, 8.560 cabezas porcinas generando 20 t/d de estiércol y 9.962.416 de aves generando 1.058 t/d de estiércol. En el municipio de Gachala se tienen 8.300 bovinos entre machos y hembras de 12 a 36 meses generando 2.121 t/d de estiércol, en el sector porcino existen 2.346 cabezas en granjas tradicionales generando 2 t/d de estiércol, en el sector avícola hay 8.303.400 aves generando 1.005 t/d de estiércol [11]. De acuerdo a esto, la cantidad de estiércol generadas dependerá de la edad del animal, ya que se estima que los animales entre los 24 y 36 meses podrán producir una mayor cantidad de estiércol dependiendo de la especie [27].

Identificación BMP por residuo

De acuerdo a la alta generación de residuos producidos por actividades agrícolas y pecuarias en el departamento, se estimó el potencial de producción de metano para cada residuo a manera de contrastar su importancia frente a la generación de residuos aprovechables. De acuerdo a esto (Figura 2) se logró establecer que, en función de la generación y BMP, los residuos que mayor potencial presentan son los pecuarios y los generados por cultivos transitorios como el café, caña panelera, mora, rosa y clavel, arveja, frijol y papa. A partir de variables como generación de residuos de cada cultivo y la evaluación de BMP de cada sustrato se seleccionaron una serie de residuos con alto potencial de metano como pulpa, y mucilago obtenidos del cultivo de café, bagazo de caña resultado de la producción de caña panelera, hojas de poda recolectadas en el cultivo de rosas y claveles, hojas y tallos procedentes de los cultivos de mora, frijol, arveja y papa.

El estiércol producido por especies avícolas, bovinas y porcinas presenta un alto potencial de metano debido a diversos factores, entre ellos se encuentra el gran volumen de estiércol producido en el departamento. Esto está asociado a la cantidad de animales que, según las estadísticas agropecuarias presentadas por la Gobernación de Cundinamarca para el año 2013, estaban presentes en el departamento: 1.241.834 cabezas de especies bovinas, 735.860 cabezas de especies porcinas y 157.950.279 aves; se estima que el volumen de estiércol producido por especies bovinas encontradas en el departamento es 337.924.793 t/d, para especies porcinas 411.733.302 t/d y el sector avícola 6.335.368 t/d.

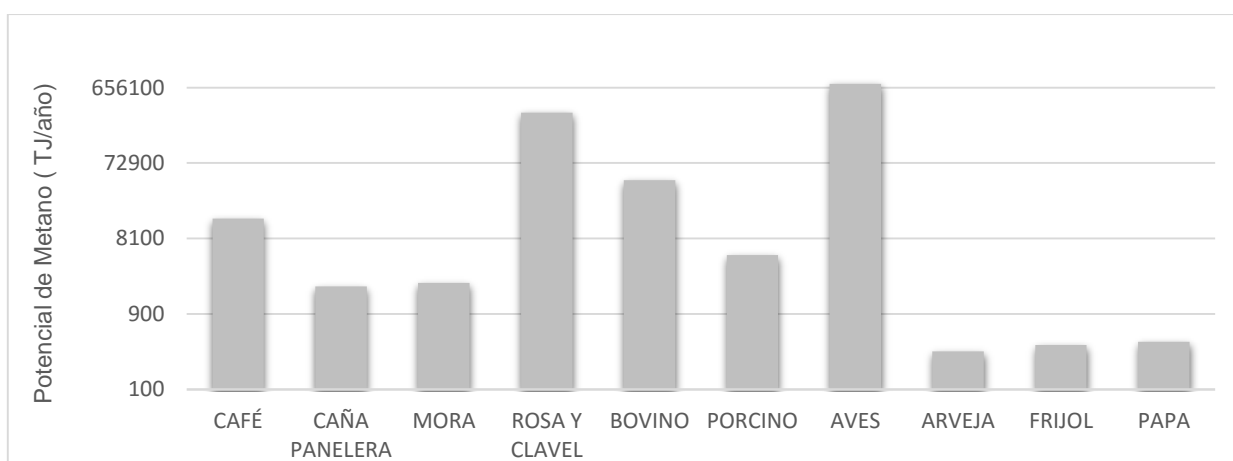


Figura 2. Potencial teórico de metano por tipo de residuo.

La relación carbono / nitrógeno (C/N) es un factor determinante en la producción de metano ya que a valores bajos de C/N incrementa el riesgo por exceso de nitrógeno y a su vez la inhibición del proceso, mientras que valores altos indican deficiencia de nitrógeno para la síntesis de biomasa [17]. Valores de C/N entre 20-30 presentan valores positivos e incrementan el rendimiento y el potencial para la producción de metano (Tabla

1). La relación para el estiércol producido por especies bovinas, porcinas y avícolas es de 20 [19], por lo que estos residuos son capaces por si solos de mantener el proceso de digestión anaerobia, también gracias a las elevadas relaciones de SV/ST (Tabla 1), podrá garantizar un buen proceso para la producción de metano [15,28]. Sin embargo, el rendimiento de la producción de metano se puede ver afectado por la presencia de un alto porcentaje de proteínas ya que podrían ser responsables de la baja biodegradabilidad del residuo debido a los productos intermedios de la degradación de proteínas [24].

En cuanto a los residuos vegetales de cultivos, los elevados valores de C/N y la escasez de elementos traza pueden afectar el correcto desarrollo del proceso por la producción de ácidos grasos y el decrecimiento del pH del sistema [29]. De acuerdo a esto, y en general, para contrarrestar las deficiencias de los diferentes residuos se deben plantear procesos de co-digestión que ayudan a incrementar las producciones de metano respecto a los potenciales individuales [30]. En la co-digestión, los sustratos pueden estimular la síntesis de enzimas por la composición del material o la presencia de microorganismos que favorecen la sinergia del proceso [31].

Tabla 1. Características de los residuos generados.

Origen	Residuos	Características		
		Relación C/N	SV/ST	%proteínas
Porcino [15]	Estiércol	20	6,54	13,2
Vacuno [15]	Estiércol	20	5,71	17
Aves [15]	Estiércol	20	0,77	20,5
Papa [15]	Hojas y tallos	40	2,43	1,9
Frijol [32]	Hojas y tallos	12	1,62	15,2
Mora [15]	Hojas y tallos	10	2,46	20
Arveja [33]	Hojas y tallos	11	1,62	20
Rosas y clavel [34]	Hoja de poda	13	2,60	2,2
Café [35,36]	Mucilago	20	0,68	21,4
	Pergamino	20	0,40	6,4
Caña panelera [19,37]	Bagazo de caña	150	2,33	20
	Caña	21	1,53	15,3

Distribución regional

La selección de las regiones (Figura 3) se realizó involucrando como variable principal municipios con elevado BMP. De acuerdo a esto, el elevado potencial de metano calculado para municipios como Fomeque para la región uno, Guacheta para la región dos y Anapoima para la región tres, los hizo candidatos para el planteamiento de las regiones alrededor de ellos. La región uno está conformado por los municipios de Choachi, Fomeque, Gachala y Junin; la región dos se encuentran los municipios de Guacheta, Fuquene, Lenguazaque, Ubaté y Susa; finalmente la región tres está constituida por Anapoima, El Colegio, La Mesa y Viota. Otra de las variables involucradas es la distancia entre municipios oscilando en un rango de 10 a 30 km entre el municipio de mayor potencial como punto central y los municipios aledaños a este, teniendo en cuenta los costos asociados de transporte mencionados anteriormente.

En la región número uno se estima una distancia de 25 km entre el municipio de Fomeque y Gachala, 30 km entre Fomeque y Junin, 20 km y 29 km desde Choachi hasta el punto central de dicha región. En la región número dos se encuentra a una distancia de 11,4 Km desde Fuquene a Guacheta, 19 km entre Guacheta y el municipio de Susa, desde el municipio de Ubaté y Guaduas hay una distancia de 18 km, y 9 km desde Lenguazaque a Guacheta. Finalmente, para la región número tres se estima una distancia de 11 km desde el punto central a la mesa, 10 km entre El Colegio y Anapoima y 14 km desde Anapoima hasta Viota. El potencial de cada una de las zonas regionales (Figura 4) se encuentra entre 31.800 TJ/año y 127.949 TJ/año, valores que están en los rangos de instalaciones implementadas en Alemania, España, Dinamarca y Polonia las cuales utilizan purines de especies bovinas y porcinas utilizando como co-sustratos residuos lignocelulosos

provenientes de cultivos de maíz, hojarasca, residuos de industrias de alimentos y residuos de lodo de depuradora, dichas instalaciones tienen en promedio una potencia instalada de 104.179 TJ/año [38,39,40].

El mayor potencial de biogás se obtuvo para la región 2 con 127.749 TJ/año lo cual se vio influenciado principalmente por la generación asociada a las excretas avícolas (Figura 4). La generación de residuos en la región 1 varía de acuerdo a la disponibilidad y a las épocas de cultivos transitorios como zanahoria, maíz, frijol, habichuela, tomate y arveja. Adicionalmente, cultivos permanentes como caña panelera, aguacate, cacao, café y plátano tienen un gran aporte de residuos ya que se encuentran disponibles los 12 meses del año. Las actividades pecuarias también realizan un gran aporte en la generación de sustratos, debido a que la proporción de excretas de animales provenientes de granjas tecnificadas es alta, esta región cuenta con 8.848 bovinos y 3.104 porcinos en granjas tradicionales, 41.060 aves de traspatio, 4 granjas productoras de leche y 35 granjas productoras de carne bovina las cuales en su mayoría son tecnificadas, lo que permitirá una recolección eficiente de parte del residuo. Respecto a la región dos se encuentran cultivos permanentes como fresa, mora, uchuva y flores, cultivos transitorios como arveja, cebolla, maíz, papa y frijol, esta región cuenta con 293 granjas productoras de leche y 282 granjas productoras de carne. Finalmente, la región 3 presenta cultivos permanentes como mango, mandarina, limón café aguacate, banano, cacao y caña panelera, cultivos transitorios como maíz, arveja, tomate y frijol; encontrándose 825 granjas productoras de leche, 15 granjas productoras de carne y 24 granjas de engorde, 4 granjas de postura para un total de 15.000 aves de traspatio.

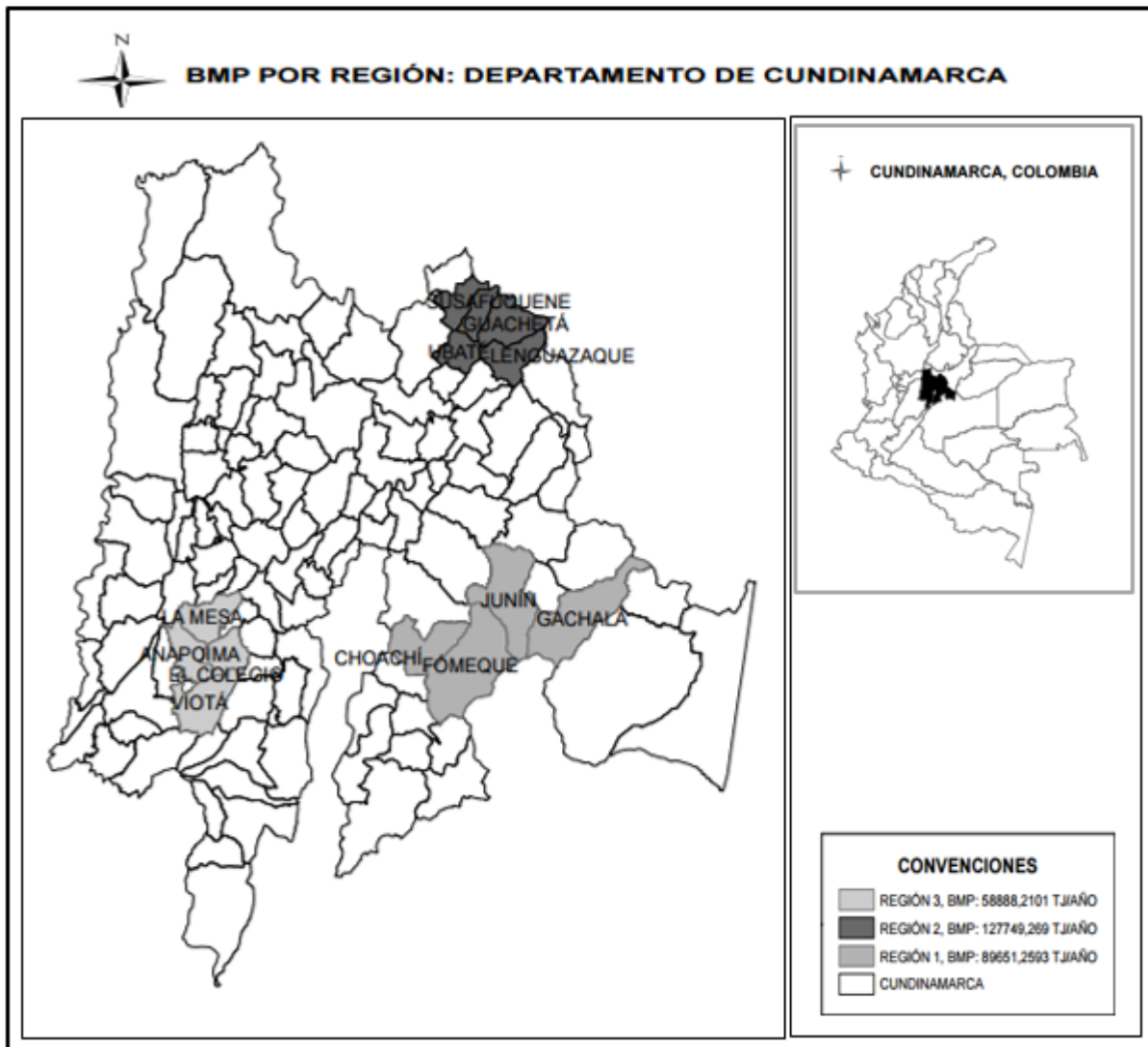


Figura 3. Mapa de selección de puntos para el cálculo de potencial de metano por regiones.

En resumen, en la región 1 el municipio de Fomeque es el mayor generador de estiércol [avícola](#) lo cual se encuentra relacionado con el alto BMP de esta región; en la Región 2 los municipios que mayor aportan sustratos provenientes de los sub sectores porcinos, avícolas y bovino son Fuquene, Guacheta y Ubate respectivamente. En la región 3 sobresalen los municipios de Viota con la mayor producción de excretas por actividades porcícolas y Anapoima por actividades avícolas. La distribución de residuos en cada central propuesta (Tabla 2) es coherente con la participación que se da en las centrales de biogás instaladas en varias regiones del mundo principalmente en España, donde el mayor BMP registrado en estas instalaciones fue de 421.142 TJ/año el cual se obtuvo a partir del uso de estiércol de porcinos y aves en Andalucía y Melilla [38].

Tabla 2. Potencial de metano por tipo de residuos en cada región.

Especies y Cultivos	BMP (TJ/año)		
	Región 1	Región 2	Región 3
Bovinos	1273,19	1819,6	674,2
Avícolas	86864,42	125322,4	53989,2
Porcinas	412,7	158,2	591,8
Permanentes	139,9	9,9	3285,7
Transitorios	30,4	203,1	3,2

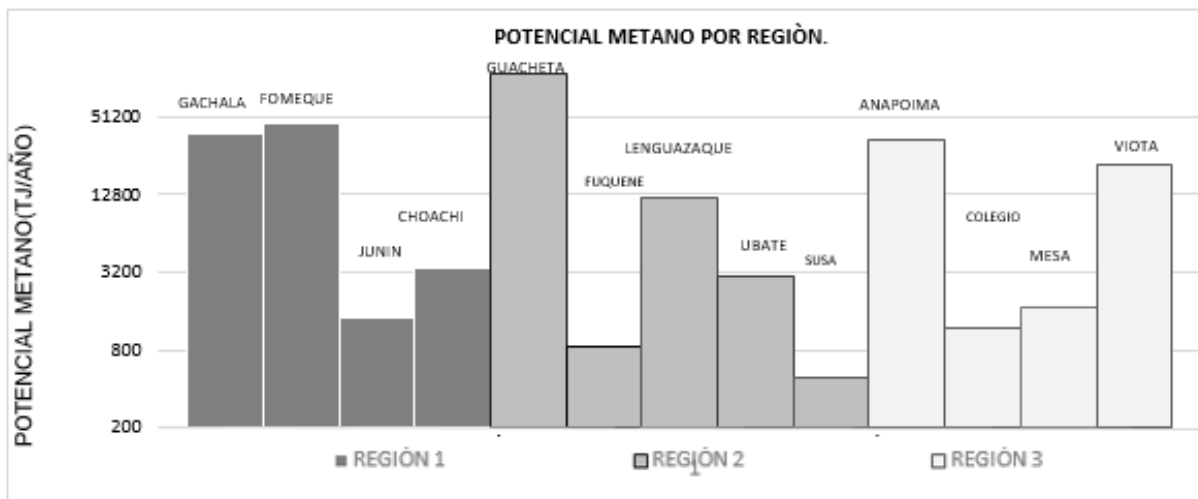


Figura 4. Potencial de metano por región.

Adicionalmente se tiene que, para el aprovechamiento de los residuos existentes en las tres zonas, se podrá utilizar el proceso de co-digestión anaerobia con la utilización de reactores de cúpula fija y móvil. Estos sistemas por la sencillez de sus materiales para su construcción, son recomendables para granjas que pretendan producir biogás para autoconsumo [41]. Si por el contrario se pretende aprovechar una gran cantidad de residuos lignocelulosos y estiércol será recomendable el uso de un digestor continuo con el fin de tener una operación constante, también se espera que la carga añadida a los reactores se mezcle en su totalidad debido a la heterogeneidad de los residuos, por ello será necesario la utilización de un biodigestor de mezcla completa o biodigestores tubulares [42]. Los costos para la elaboración de estos biodigestores no son altos, lo que permitirá que dicha tecnología esté al alcance de toda la población de las regiones nombradas [28]. Este modelo de biodigestores se ajusta a las características de la zona, lo que permitirá un funcionamiento óptimo.

Previo a la implementación de este tipo de tecnología es importante evaluar los impactos que tiene la construcción y el funcionamiento de los digestores, siendo el principal efecto negativo sobre el medio ambiente la posible emisión de gases de efecto invernadero presentando una mayor emisión por biodigestores que tratan residuos agrícolas y procesan estiércol a diferencia de los biodigestores que utilizan los cultivos

energéticos como materia prima, debido a las características los sustratos [43,44]. Por otra parte, la disponibilidad de los sustratos a lo largo del año es un factor fundamental para la viabilidad de la instalación de una planta de aprovechamiento de estos residuos, por ende, en la Figura 5 se muestra la disponibilidad de sustratos provenientes de cultivos transitorios y permanentes en las regiones seleccionadas.

En la Figura 5 se observa la dinámica del potencial de metano asociada a la disponibilidad de los residuos acorde al tiempo, esto afecta a los cultivos sean transitorios o permanentes. Mientras que la generación de estiércol se asume como constante a lo largo del año. Por esta razón y sumado al potencial de los residuos se encuentra que el potencial total de la región se ve ligeramente afectado por esta disponibilidad. De acuerdo a esto, los municipios de Guacheta, Fuquene, Lenguazaque, Susa y Ubate, los cuales se encuentran clasificados en la Región 2, presentan BMP similar debido a la generación permanente de estiércol proveniente de especies bovinas, porcinas y avícolas en cada uno de los municipios nombrados anteriormente, presentándose un mayor aporte al potencial por parte de los cultivos transitorios a comparación de los permanentes principalmente en los meses de Junio, Julio y Octubre, la recolección de estiércol en esta zona es viable, debido a que según el censo agropecuario el 70% de los animales presentes en esta región se encuentran en granjas tecnificadas. En caso que el sistema de digestión anaerobia dependa principalmente de los residuos de cultivos (transitorio / permanente) este se ve fuertemente afectado ya que se tendrían dos periodos del año adecuados para el aprovechamiento de los residuos y habría escasez de sustratos para mantener la operación del sistema.

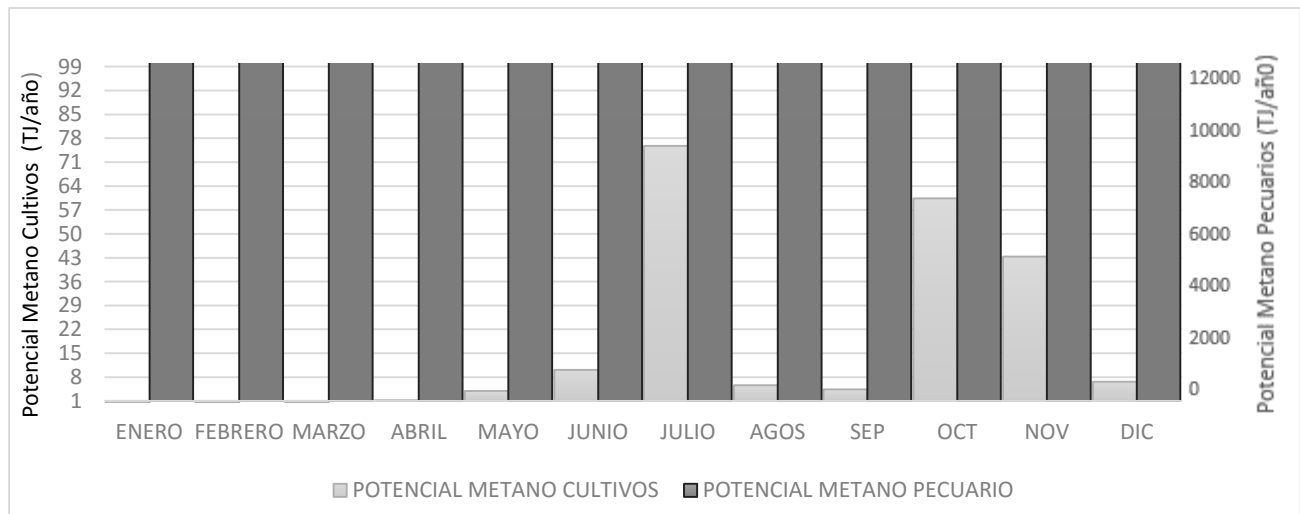


Figura 5. Evolución temporal del potencial de metano estimado para la región 2.

Ajustes al potencial encontrado

Un aspecto crucial para la obtención del potencial de biogás teórico es la temperatura del proceso, esta se puede ver afectada por la localización del sistema. Respecto a esto, las temperaturas en estos municipios fluctúan entre 12 y 30 °C lo cual está por fuera de los rangos óptimos de la digestión anaerobia. Sin embargo, mientras los valores de temperatura se puedan mantener entre 35 y 50 °C, los rendimientos de la producción de metano pueden mantenerse similares, lo que indica que es posible que el proceso requiera calefacción lo cual debe tenerse en cuenta en el balance energético y en el estudio de viabilidad de dichas plantas [45]. Sumado a esto, se debe tener en cuenta, para acotar este potencial, la competencia que se genera por los residuos para mantener las propiedades del suelo, forraje, otros tipos de aprovechamiento energético, la cobertura de suelos para evitar erosión, entradas orgánicas para soportar las comunidades en el suelo, propiedades y procesos de los ecosistemas [46]. Esto está ligado a posibles usos que se le da actualmente a los residuos generados por las actividades pecuarias y agrícolas. En el tema de aporte de minerales o nutrientes a suelos, esto se podría cubrir utilizando los biosólidos obtenidos en la digestión anaerobia como enmienda orgánica, lo cual tendría un doble valor agregado ya que sería un material estable con mejores

propiedades que el residuo. Así mismo, la disponibilidad de los residuos es vital para la optimización de los sistemas buscando minimizar costos, transporte, almacenamiento y aspectos ambientales [13].

El potencial establecido para municipios o regiones tendrá que tener en cuenta que la disponibilidad de diversos residuos requerirá un proceso de co-digestión anaerobia, donde el potencial de dicha mezcla podrá variar de acuerdo a las proporciones de los sustratos y las características físico-químicas de cada uno de ellos [30]. Estudios han demostrado que la mezcla de residuos de alimentos con diferentes mezclas de estiércol resultaron en un aumento del rendimiento de producción de metano, en comparación con la digestión de estiércol o residuos de alimentos y de actividades pecuarias evaluados individualmente [47]. La producción anual de metano generado en diferentes plantas centralizadas utilizando sustratos como estiércol bovino, estiércol de aves de corral y pollos, residuos orgánicos e industriales es de $7,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ /año, donde gracias a esta mezcla se aumentó el BMP generado en un 80% [37]. Las mezclas realizadas generalmente utilizan estiércol principalmente de especies bovinas, residuos vegetales y residuos lignocelulosos. En estos casos el potencial de dos plantas generadoras, de $2,4 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ /año y $4,5 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ /año, se vio afectado significativamente al agregar a la mezcla estiércol bovino lo cual produjo un aumento exponencial en la producción de biogás [38]. La adición de residuos de vegetales en un 2,5% de volumen y de residuos de granjas para estiércol de cerdo presenta un aumento de 124% en la producción de metano a diferencia del potencial obtenido con la digestión del estiércol por separado gracias a la reducción de la humedad al aumentar dicho residuo [36].

El aumento en la producción de biogás en las mezclas mencionadas se debe a que la presencia de estiércol produce un ajuste en la relación C/N, la cual es fundamental a la hora de producir biogás, ya que si esta relación es alta, el nitrógeno será consumido rápidamente por las bacterias metanogénicas presentes para formar proteínas y no reaccionará con el material restante, por lo tanto la producción de gas será alta. Lo contrario sucede si dicha relación es baja ya que el nitrógeno al ser la proporción mayor será liberado y acumulado en forma de amoníaco, el cual afectará el pH del biodigestor causando una acidificación del medio provocando una baja producción de gas, por ende dicha relación debe encontrarse entre 20/30 [15,37,48]. De acuerdo a esto, la co-digestión anaerobia de los residuos puede favorecer los resultados del potencial de metano. Mientras que la temperatura del sistema se puede regular a través del uso del biogás que se produce en el proceso.

Conclusiones

El departamento de Cundinamarca tiene un potencial bruto de biogás de 1.117.567 TJ/año producto de la transformación de los residuos agroindustriales. La distribución de los residuos generados en el departamento es heterogénea debido a la falta de tecnificación en varias de las actividades, principalmente agrícolas. Los residuos de mayor aporte en el potencial encontrado corresponden a aquellos alcanzados de actividades relacionadas con los cultivos de café, caña panelera, arveja, papa y excretas de bovinas y avícolas. Es importante tener en cuenta los ajustes que se deben plantear para los potenciales teóricos teniendo en cuenta actividades de competencia por los residuos, condiciones operativas del proceso, acceso a los residuos, características de los residuos de la región, generación de estos y distancias entre los puntos de generación y planta centralizada. Por ende el mejor acercamiento para la realización de la evaluación del potencial del departamento de Cundinamarca es por medio de la identificación de dicho potencial por municipio debido a que se podrá tener en cuenta la generación de residuos, potencial y así mismo se tendrá en cuenta las distancias de recorrido desde el punto de generación hasta la planta de producción de biogás lo que permitirá realizar un análisis detallado de zonas aptas para la instalación de dicha planta, teniendo en cuenta los requerimientos básicos para su funcionamiento. El potencial de biogás analizado podrá variar de acuerdo a los sustratos que se mezclen en el proceso de co-digestión anaerobia, debido a que el potencial individual está influenciado por variables como relación C/N, relación de sólidos volátiles y sólidos totales, lignina y proteínas. Por último, las zonas que podrían cobijar sistemas centralizados para el aprovechamiento de los residuos se identificaron en eje a los municipios Guaduas, Guacheta y Anapoima con potenciales cercanos a los reportados para plantas de biogás en varias regiones del mundo, donde registran una potencia instalada entre 9421,2 – 130.780 TJ/año.

Referencias bibliográficas

- [1] Gobernacion de Cundinamarca. Estadísticas agropecuarias. Volumen 23. Secretaria de agricultura y desarrollo rural, editor. Cundinamarca: Gobernacion de Cundinamarca; 2013. p. 3–525.
- [2] Gobernacion de Cundinamarca. Caracterización general de Cundinamarca. Cundinamarca; 2010 p. 3–337.
- [3] Gobernacion de Cundinamarca. Lineamientos de política de residuos sólidos para Cundinamarca. Cundinamarca; 2012 p. 1–9.
- [4] AINIA centro tecnologico. Co-digestión anaerobia. Valencia,España; 2008 p. 1–2.
- [5] Agencia andaluza de la energia. Estudio básico del biogás. Andalucía,España; 2011 p. 3–166.
- [6] Superintendencia de servicios. Disposición Final de Residuos Sólidos en Colombia 2013. Quinta edi. Bogota; 2013. p. 1–61.
- [7] Henao GJ. Aprovechamiento de los residuos organicos en Colombia. Universidad de Antioquia; 2008. p. 3–116.
- [8] Metropolitana Valle de Aburra. Manual de Compostaje. primera ed. Asociacion Colombiana de ingenieria ambiental y sanitaria, editor. Valle de Aburra: Asociacion Colombiana de ingenieria ambiental y sanitaria; 2010. p. 82–8.
- [9] Cervi RG, Esperancini MST, Bueno ODC. Viabilidad Económica de la Utilización de Biogás para la Conversión en Energía Eléctrica. Información tecnológica. 2011;22(4):3–14.
- [10] Castillo ÉF, Cristancho DE, A VA. Anaerobic digestion of urban solid waste. A study of operational conditions for anaerobic digestion of solid urban waste. Biomass and Bioenergy. 2003;2:11–22.
- [11] DANE. Encuesta agropecuaria. Bogota, Colombia; 2013 p. 1–10.
- [12] Ministerio de transporte. Sistema de informacion de costos eficientes para el transporte automotor de carga. 2015 p. 1–3.
- [13] Kumarappan S. Spatially and Temporally Optimal Biomass Procurement Contracting for Biorefineries. 2014;9:2069–89.
- [14] Gobernacion de Cundinamarca. Estadísticas agropecuarias. Estadísticas de Cundinamarca. Tercera ed. Colombia; 2013. p. 3–90.
- [15] Li Y, Zhang R, Liu G, Chen C, He Y, Liu X. Comparison of methane production potential, biodegradability, and kinetics of different organic substrates. Bioresource technology. Elsevier Ltd; 2013 Dec;149:565–9.
- [16] Qiao W, Yan X, Ye J, Sun Y, Wang W, Zhang Z. Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment. Renewable Energy
- [17] Parra B. Producción de metano a partir de la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal. Universidad del Valle; 2014. p. 1–79.
- [18] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. El manejo de los residuos de cultivos , de los cultivos de cobertura y de la rotación de cultivos. Valencia,España; 2008 p. 1–26.

- [19] Krishania M, Kumar V, Vijay VK, Malik A. Analysis of different techniques used for improvement of biomethanation process: A review. *Fuel*. 2013 Apr;106:1–9.
- [20] Rodriguez, N; Zambrano D. Los subproductos del café: fuente de energía renovable. *Biomass and Bioenergy*. 2010;3:1–8.
- [21] Romero, R; Mamani H. Obtención de biogás como fuente de energía renovable a partir de los subproductos del café. *Biomass and Bioenergy*. 2013;15:241–52.
- [22] Casas, E ;Orrego, E ;Acevedo A, ; Giraldo S. Biomasa de residuos agrícolas en el departamento de Antioquia. Segunda edi. Ramirez M; CA, editor. [Medellin-Antioquia]: Universidad Pontificia Bolivariana; 2010. p. 3–117.
- [23] Dupri I. Estimación de los residuos agrícolas generados en la isla de Tenerife. Tenerife- España; 2006 p. 3–20.
- [24] Martinez A. Diseño de un modelo semi empírico de co digestión anaerobia. Universidad de Zaragoza; 2014. p. 1–41.
- [25] Probiogas PSE. Manual de Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales. Barcelona-españa; 2009 p. 1–55.
- [26] Song Z, Zhang C, Yang G, Feng Y, Ren G, Han X. Comparison of biogas development from households and medium and large-scale biogas plants in rural China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier; 2014 May;33:204–13.
- [27] Subsecretaria de desarrollo rural. Utilización de estiércoles. Ciudad de Mexico, Mexico; 2010 p. 1–8.
- [28] Herrero J, Alvarez R, Cespedes R, Rojas MR, Conde V, Aliaga L, et al. Cow, sheep and llama manure at psychrophilic anaerobic co-digestion with low cost tubular digesters in cold climate and high altitude. *Bioresource Technology*. 2015 Apr;181:238–46.
- [29] Jiang Y, Heaven S, Banks CJ. Strategies for stable anaerobic digestion of vegetable waste. *Renewable Energy*
- [30] Garcia, M.Gomez X. Anaerobic digestion of livestock wastes:vegetales residues co.substrate and digestate pot treatment. Universidad de Valladolid; 2010. p. 11–170.
- [31] Mac S, Llabr P. Anaerobic digestion of organic solid wastes . An overview of research achievements and perspectives. 2000;74.
- [32] Carmona MJ. Manual técnico del frijol voluble. primera ed. Ramirez A, editor. Medellin-Antioquia: Corpoica; 2007. p. 13–168.
- [33] Prieto G. El cultivo de Arveja. *Biomass and Bioenergy*. 2010;3:1–13.
- [34] Rocha A. Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino. *Bioresource Technology*. 2009;12:1–12.
- [35] Quintero M. Estudio preliminar para la producción de biogás a partir de la digestión anaerobia de mucilago de café. Universidad industrial de Santander; 2012. p. 1–59.
- [36] Valencia N. Manejo de residuos en la agroindustria cafetera. Chinchina, Caldas; 2000 p. 1–10.

- [37] Larrahondo JE. Calidad de la Caña de Azúcar. In: Cenicaña, editor. Cultivo de caña. primera ed. Cali, Valle del Cauca; 2008. p. 337–55.
- [38] Pascual, A;Ruiz B. Situacion y potencial de generacion de biogas. primera ed. Instituto para la diversificacion y ahorro de energia, editor. Madrid-España: Instituto para la diversificacion y ahorro de energia; 2011. p. 1–104.
- [39] Huba EM. Co - digestion : Some European Experiences Co-digestión : Algunas experiencias Europea. 2011 p. 25–59.
- [40] Igliński B, Buczkowski R, Cichosz M. Biogas production in Poland—Current state, potential and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy*
- [41] Montenegro M. Biogás: una alternativa ecológica para la producción de energía. *Biomass and Bioenergy*. 2012;7(85):881–94.
- [42] Infantes P. Diseño y Construcción de un Biodigestor Industrial para tratamiento de residuos orgánicos. Arequipa, Peru; 2010 p. 3–55.
- [43] Fuchsz M, Kohlheb N. Comparison of the environmental effects of manure- and crop-based agricultural biogas plants using life cycle analysis. *Journal of Cleaner Production*. 2015 Jan;86:60–6.
- [44] Fantin V, Giuliano A, Manfredi M, Ottaviano G, Stefanova M, Masoni P. Environmental assessment of electricity generation from an Italian anaerobic digestion plant. *Biomass and Bioenergy*
- [45] Lindorfer H, Waltenberger R, Köllner K, Braun R, Kirchmayr R. New data on temperature optimum and temperature changes in energy crop digesters. *Bioresource technology*. 2008 Oct;99(15):7011–9.
- [46] Franzluebbbers AJ. Farming strategies to fuel bioenergy demands and facilitate essential soil services. *Geoderma*
- [47] Lisboa MS, Lansing S. Characterizing food waste substrates for co-digestion through biochemical methane potential (BMP) experiments. *Waste management (New York, N.Y.)*. Elsevier Ltd; 2013 Dec;33(12):2664–9.
- [48] Unidad minero energetica. Guia para la implementacion de sistemas para la produccion de biogas. Bogota, Colombia; 2003 p. 1–47.