

El uso de biodigestores representa la mejor alternativa para el tratamiento y aprovechamiento de residuos rurales y orgánicos, técnica que implementa la generación de gas y la cogeneración. En el presente trabajo se realiza un análisis multidisciplinar de los aspectos por los cuales en la región Norte de Colombia no se han gestionado proyectos de biodigestión anaerobia con residuos sólidos orgánicos en comparación con la región Central, donde ya se ha dado inicio al tema. Y finalmente se presenta una propuesta metodológica para la implementación de biodigestores tipo tubular y campana flotante para el sector rural y urbano de la región Norte y Central de Colombia

Gestión ambiental para la implementación de Biodigestores Anaeróbicos



Escanee el código QR para conocer más títulos publicados por Ediciones Universidad Simón Bolívar



ALEXANDER HERNANDO **TOBÓN ABELLO** · JOSÉ LUIS **LUGO ARIAS**
ELKYN RAFAEL **LUGO ARIAS** · DAVID **OVALLOS** · JAVIER **BURGOS VERGARA**
NESTOR **LUGO ARIAS** · YEISMY **RODRÍGUEZ MENDOZA**
ALBERTO **REDONDO SALAS**

EDICIONES
**UNIVERSIDAD
SIMÓN BOLÍVAR**



ISBN 978-958-52980-4-0



9 789585 298040 >

**UNIVERSIDAD
SIMÓN BOLÍVAR**
BARRANGUILLA Y CÚCUTA - COLOMBIA | VIGILADA MINEDUCACIÓN



Res. 23095 del MEN

**Gestión ambiental
para la implementación de**
**Biodigestores
Anaeróbicos**

reductores de residuos contaminantes
en el medioambiente de los departamentos
de la Región Norte y Central de Colombia

**GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA
IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES
ANAERÓBICOS. REDUCTORES DE RESIDUOS
CONTAMINANTES EN EL MEDIOAMBIENTE DE
LOS DEPARTAMENTOS DE LA REGIÓN NORTE Y
CENTRAL DE COLOMBIA**

© Alexander Hernando Tobón Abello - José Luis Lugo Arias - Elkyn Rafael Lugo Arias - David Ovallos - Javier Burgos Vergara - Nestor Lugo Arias - Yeismy Rodríguez Mendoza - Alberto Redondo Salas

Facultad: Ciencias Económicas y Administrativas - UNIMINUTO
Grupo de Investigación: Desarrollo social y gerencial, DESOGE
(UNIMINUTO)

Director: Elkyn Rafael Lugo Arias

Proceso de arbitraje doble ciego

Recepción: Junio 2020

Evaluación de propuesta de obra: Julio 2020

Evaluación de contenidos: Julio 2020

Correcciones de autor: Agosto 2020

Aprobación: Agosto 2020

Gestión ambiental para la implementación de Biodigestores Anaeróbicos

reductores de residuos contaminantes
en el medioambiente de los departamentos
de la Región Norte y Central de Colombia

ALEXANDER HERNANDO **TOBÓN ABELLO**
JOSÉ LUIS **LUGO ARIAS**
ELKYN RAFAEL **LUGO ARIAS**
DAVID **OVALLOS**
JAVIER **BURGOS VERGARA**
NESTOR **LUGO ARIAS**
YEISMY **RODRÍGUEZ MENDOZA**
ALBERTO **REDONDO SALAS**

Gestión ambiental para la implementación de Biodigestores Anaeróbicos.
Reductores de residuos contaminantes en el medioambiente de los departamentos de la
Región Norte y Central de Colombia / Alexander Hernando Tobón Abello [y otros 6] --
Barranquilla: Ediciones Universidad Simón Bolívar, 2020.

150 páginas ; 17x24 cm; figuras a color, tablas a blanco y negro

ISBN: 978-958-52980-4-0 (Pdf descargable)

1. Biodigestores – Investigaciones 2. Biodigestores – Implementación 3. Gestión
ambiental --Proyectos 4. Protección del medio ambiente 5. Conservación de los recursos
naturales 6. Contaminantes I. Tobón Abello, Alexander Hernando II. Lugo Arias, José Luis
III. Lugo Arias, Elkyn Rafael IV. Ovallos, David V. Burgos Vergara, Javier VI. Lugo Arias,
Néstor VII. Rodríguez Mendoza, Yeismy VIII. Título

333.72 G393 2020 Sistema de Clasificación Decimal Dewey 22ª. edición
Universidad Simón Bolívar – Sistema de Bibliotecas

Producido en Barranquilla, Colombia. Depósito legal según el Decreto
460 de 1995. El Fondo Editorial Ediciones Universidad Simón Bolívar
se adhiere a la filosofía del acceso abierto y permite libremente la
consulta, descarga, reproducción o enlace para uso de sus contenidos,
bajo una licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



©Ediciones Universidad Simón Bolívar
Carrera 54 No. 59-102
<http://publicaciones.unisimonbolivar.edu.co/edicionesUSB/>
dptopublicaciones@unisimonbolivar.edu.co
Barranquilla - Cúcuta

Producción Editorial
Editorial Mejoras
Calle 58 No. 70-30
info@editorialmejoras.co
www.editorialmejoras.co

Octubre 2020
Barranquilla

Made in Colombia

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	15
2. MARCO REFERENCIAL	25
3. CONSTRUCTO METODOLÓGICO	65
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	133
REFERENCIAS	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Infraestructura de tratamiento y aprovechamiento de residuos en Colombia	20
Figura 2.	Etapas de la digestión anaerobia.....	32
Figura 3.	Variación de la producción de biogás en función del proceso de fermentación y la etapa de desintegración.....	33
Figura 4.	Gráfica Biodigestor Tipo Campana Flotante. Viabilidad técnica para producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos orgánicos.....	36
Figura 5.	Clasificación de los reactores anaeróbicos.....	37
Figura 6.	Biodigestor discontinuo	38
Figura 7.	Biodigestor hindú y chino.....	38
Figura 8.	Biodigestor de carga continua	39
Figura 9.	Clasificación de biodigestores rurales	40
Figura 10.	Esquema de un biodigestor hasta la cocina.....	42
Figura 11.	Biodigestor tipo hindú de 4 m ³ de capacidad.....	42
Figura 12.	Esquema de metodología de diseño de un biodigestor	43

Figura 13.	Esquema de carga de un biodigestor tubular	47
Figura 14.	Esquema de carga de un biodigestor cúpula flotante.....	48
Figura 15.	Tratamiento y usos del biogás	49
Figura 16.	Fases del trabajo investigativo	67
Figura 17.	Relación demográfica región Central vs. región Norte	90
Figura 18.	Residuos generados región Norte vs. región Central.	91
Figura 19.	Gráfico de la variable Megatoneladas de CH ₂ equivalente.....	97
Figura 20.	Gráfico de caja y bigotes de la variable Megatoneladas de CH ₂ equivalente	97
Figura 21.	Correlación de similitudes entre departamentos de ambas regiones	103
Figura 22.	Plan de educación	121
Figura 23.	Mesas de trabajo.....	121
Figura 24.	Organización promoción de proyecto.....	122
Figura 25.	Caracterización de población	122
Figura 26.	Cartillas	123
Figura 27.	Jornadas de promoción y divulgación.....	123
Figura 28.	Implementación de proyectos.....	124
Figura 29.	Selección de biodigestores	124
Figura 30.	Estudios técnicos.....	125
Figura 31.	Análisis de factores	125
Figura 32.	Aplicación modelo GEI.....	126

Figura 33. Cursos especializados	126
Figura 34. Selección de biodigestores	127
Figura 35. Auditoría y control	127
Figura 36. Estudio de oferta y demanda	128
Figura 37. Mesas de trabajo	128
Figura 38. Aplicación modelos de biogás	129
Figura 39. Equipos de trabajo.....	129
Figura 40. Diseño	130
Figura 41. Trámites licencias	130
Figura 42. Censo.....	131
Figura 43. Mesas de trabajo campesinos.....	131
Figura 44. Gestión de pagos.....	132
Figura 45. Creación de empresas.....	132

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Análisis elemental típico de residuos sólidos orgánicos.....	31
Tabla 2.	Características generales del biogás	33
Tabla 3.	Producción de biogás a partir de residuos vegetales y animal	35
Tabla 4.	Parámetros de implementación de biodigestores.....	43
Tabla 5.	Condiciones en cada etapa del proceso de biodigestión anaerobia...	46
Tabla 6.	Tratamiento de purificación del biogás.....	52
Tabla 7.	Modelos matemáticos para la generación de biogás	52
Tabla 8.	Producción de biogás por zona climática.....	55
Tabla 9.	Parámetros de sustratos	57
Tabla 10.	Proyección producción de biogás y metano con dos sustratos	58
Tabla 11.	Parámetros de diseño de un biodigestor tipo hindú	59
Tabla 12.	Ejemplo capacidad digester cúpula	59
Tabla 13.	Corporaciones Autónomas responsables por departamento	66
Tabla 14.	Total proyectos relacionados con biodigestores en Colombia	72

Tabla 15.	Datos comparativos regiones Norte y Central	73
Tabla 16.	Comparación de tecnologías para biodigestores.....	74
Tabla 17.	Cultivos por departamentos	76
Tabla 18.	Relación demográfica por departamento.....	78
Tabla 19.	Disposición final de los residuos sólidos	79
Tabla 20.	Tipo de disposición final de residuos sólidos.....	80
Tabla 21.	Datos de entrada de la contaminación atmosférica y sus factores...	93
Tabla 22.	Resumen estadístico para cada variable.....	94
Tabla 23.	Resumen estadístico para Y	95
Tabla 24.	Matriz de correlación para las estimaciones de los coeficientes	99
Tabla 25.	ANOVA	99
Tabla 26.	Análisis de Varianza.....	101
Tabla 27.	Asignación numérica de departamentos en estudio.....	103
Tabla 28.	Priorización de variables según análisis conglomerado	105
Tabla 29.	Potencial energético biomasa residual del sector agrícola	106
Tabla 30.	Potencial energético biomasa residual del sector avícola	107
Tabla 31.	Potencial energético biomasa residual del sector bovino	107
Tabla 32.	Potencial energético biomasa residual del sector porcino	108
Tabla 33.	Potencial energético biomasa residual del sector pecuario	108
Tabla 34.	Caracterización biomasa agrícola departamentos región Norte	110

Tabla 35.	Datos con logaritmos de entrada de la contaminación atmosférica y sus factores	113
Tabla 36.	Tabla ANOVA del modelo de los factores determinantes de la emisión de metano.....	115
Tabla 37.	Análisis de Varianza del modelo de metano.....	116
Tabla 38.	Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes.....	116
Tabla 39.	Pruebas de Normalidad de Shaphiro-Wilk para el modelo 2 de metano	117
Tabla 40.	Prueba de Kolmogorov-Smirnov.....	117
Tabla 41.	Tabla ANOVA del modelo de los factores determinantes de la emisión de metano.....	118
Tabla 42.	Análisis de Varianza del modelo de metano.....	119
Tabla 43.	Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes.....	119
Tabla 44.	Pruebas de Normalidad de Shaphiro-Wilk	120
Tabla 45.	Prueba de Bondad de Ajuste y Normalidad de Kolmogorov-Smirnov para CH ₄	120

1. INTRODUCCIÓN

El uso de alternativas sostenibles para la generación de energía limpia es un reto para la economía actual; en los últimos años la mejor opción para cualquier país que luche por la conservación del medioambiente y por la incorporación a organismos internacionales como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) radica en la implementación de proyectos que permitan la generación de energía renovable, dentro de los cuales se destaca el uso de biogás, generado a través de la biomasa de la degradación de residuos orgánicos, para la generación de energía calorífica y eléctrica.

Hay que mencionar que Colombia genera alrededor de 11.6 millones de toneladas de residuos anuales, los cuales en su mayoría son recolectados por las empresas de aseo de cada municipio, correspondiente al 94,7 % en el sector urbano y de 24,1 % para el rural (DNP, 2017). La generación de residuos agroindustriales y orgánicos producen grandes impactos ambientales que ocasionan en el medioambiente contaminación de cuerpos de aguas y emisiones que se forman en el proceso de degradación de la materia orgánica, dentro de los cuales se encuentra el CO_2 y el CH_4 , y que son gases que se pueden tratar y aprovechar para generar energía renovable. Por lo tanto, es ideal conocer de una manera detallada los procesos que se presentan en la biodigestión anaerobia de los residuos agrícolas, pecuarios y domésticos para

el aprovechamiento, la mejora y eficiencia tecnológica de la generación energética. El objetivo principal de esta investigación es identificar y establecer estrategias, mediante un plan de gestión ambiental eficiente para la aplicación de este proceso de tratamiento y aprovechamiento de los residuos sólidos y rellenos sanitarios en la reducción de la emisión de los gases efecto invernadero, que estos generan en el medioambiente de la zona Norte y Central de Colombia, dado que en el área de estudio de este proyecto (región Caribe Norte de Colombia) se presentan las condiciones ideales de temperatura, presión y producción agrícola para el proceso propuesto en la cinética de la biodigestión. De esta manera, en un biodigestor se deposita la materia orgánica para ser degradada bajo las condiciones anaerobias y así producir metano (CH₄), que puede ser usado como gas para cocción o para mover turbinas eléctricas. También, el uso de biodigestores como medio para tratar los desechos orgánicos es una alternativa eficaz para evitar la contaminación ambiental en zonas rurales, y aprovechar los residuos agroindustriales, agropecuarios, entre otros, como materia prima; dentro de sus usos principales permiten suministrar energía y abono, por lo que se le considera como una alternativa de generación de energía renovable (Gunnerson & Stuckey, 1986).

En este sentido, para los dirigentes colombianos a pesar de intentar impulsar la producción de energía por procesos amigables con el ambiente (eólica, fotovoltaica, biodigestores, etc.) a través de incentivos tributarios, como por ejemplo la Ley 1715 de 2014, cuyo objetivo es propiciar el aumento de inversiones en generación de energías alternativas; no les ha resultado fácil que en la mayoría de sus departamentos se desarrollen este tipo de proyectos; sin embargo, hay que resaltar que la tecnología de biodigestión anaerobia (industrializada y casera) es una opción que hasta el momento no ha tenido una visión más consistente ni políticas claras del Gobierno para su desarrollo a nivel nacional.

En este trabajo se estudiaron los departamentos sectorizados en estas regiones, según el Ministerio del Medio Ambiente en el año 2014 en su Programa Nacional

de Biocomercio Sostenible, encaminado a la planificación de rutas que permitan el desarrollo de proyectos relacionados con las energías sostenibles aprovechando las potencialidades de cada región (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Es así, que la región Norte con una extensión de 153.896 Km², donde el departamento del Atlántico ocupa el 2,2 % de la superficie de la región, un 16,9 % a Bolívar, Cesar 14,9 %, Córdoba 16,3 %, La Guajira 13,5 %, Magdalena 15,1 %, Norte de Santander 14,1 %, San Andrés 0,03 % y Sucre 7,1 %. Los municipios que integran la región corresponden a: 23 en el Atlántico, 45 en Bolívar, 25 en Cesar, 28 en Córdoba, 15 en La Guajira, 30 en el Magdalena, 40 en Norte de Santander, 2 en San Andrés y 26 a Sucre para un total de 234. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).

Según la Encuesta Anual Agropecuaria de 2016, en los 26 departamentos objeto de estudio, el 79,3 % del área se dedicó a la actividad pecuaria, el 7 % a la actividad agrícola, el 11,3 % a bosques y un 2,3 % del área del suelo se dedicó a otros usos. La región Norte aporta 36,1 % en ganado vacuno, lo que indica una de las actividades económicas más importante de la región.

No obstante, la inadecuada gestión de los residuos domiciliarios es uno de los principales problemas ambientales del norte colombiano, especialmente en áreas rurales; apenas el 18,9 % de los municipios de esta sección del país, realizan una adecuada disposición de sus residuos sólidos. Esta situación resulta especialmente grave en los departamentos de La Guajira, Bolívar, Cesar y Córdoba, que dan cuenta del mayor número de municipios donde no se realiza una adecuada gestión de los residuos. San Andrés, Atlántico y Sucre son los departamentos donde se lleva una correcta gestión de los residuos sólidos (Rodríguez Gómez, 2013); respecto a Norte de Santander solo el 7,5 % no realiza una segura disposición final de residuos sólidos (CORPONOR, 2017). Respaldao lo mencionado, el informe de la Contraloría General de la Nación sobre el estado de los Recursos Naturales y el Ambiente menciona que la Política

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos no ha cumplido sus objetivos de reducción de residuos, aprovechamiento ambiental, técnica y económica incluyendo la disposición final de estos (Contraloría General de la República, 2016).

Por otro lado, la región Central con más de 198.000 Km², que corresponde al 17,4 % de la superficie total de Colombia, en una relación superficie-cantidad de municipios comprende los departamentos de Antioquia con un 32 % -125 municipios, Boyacá 11,7 % - 123, Caldas 4 % - 27, Cundinamarca 12,2 % - 117, Huila 10 % - 37, Quindío 0,9 % -12, Risaralda 2,1 % - 14, Santander 15,4 % - 87 y Tolima 11,8 % - 47; hacen parte de la región 589 municipios (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). Con respecto a las emisiones de gases de efecto invernadero "GEI", se generan 71,43 % de dióxido de carbono y 18,62 % de metano en promedio. Cabe destacar que el 4 % de los municipios de esta región presenta un inadecuado proceso de disposición final de residuos sólidos. En este sector del país ya se están ejecutando en forma exitosa proyectos de biomasa en un 88 % de los departamentos que lo conforman.

18

Se pretende mejorar el proceso de innovación en los planes de gestión ambiental del manejo de los residuos y de la emisión de gases contaminantes en las zonas urbanas y rurales de Colombia, para que el Gobierno, el sector privado, los especialistas e investigadores, tengan una mejor opción de inversión en este proyecto, dada la necesidad que tiene Colombia de iniciar un proyecto socioambiental viable, amigable, eficiente y sostenible, así como también, dado a que no se han implementado sofisticadamente en el país, tecnologías limpias de última generación, como son: los biodigestores anaerobios, los cuales son usados para la degradación de residuos sólidos, teniendo en cuenta que las principales actividades económicas de esta región, propician la implementación de este tipo de procesos.

Como datos se tienen que la producción de residuos sólidos agrícolas y pecuarios en la región Norte colombiana corresponden a 611.820 hectáreas de suelo con uso agrícola y 9.462.268 hectáreas para el sector pecuario (DANE, 2016). Otro problema a solucionar, es que, a pesar de existir estudios previos, no se han podido implementar

por falta de políticas gubernamentales y de Estado, que den las herramientas para implementar biodigestores rurales. Especialmente en regiones apartadas, donde no hay acceso a la red de distribución de gas domiciliario, puede ser una alternativa para solucionar este problema social y de salud, teniendo entre otra ventaja la de contribuir a la disminución de enfermedades respiratorias (IRA) y cáncer de pulmón ocasionado por el uso de fogón por la quema tradicional de la biomasa (leña, carbón, desechos de animales y residuos agrícolas), estimada según la encuesta de Calidad de vida en Colombia en 344.000 hogares en la región Norte (DANE, 2016). En la región Central se viene implementando poco a poco, este tipo de proyectos para remplazar las fuentes tradicionales de quema de biomasa en los hogares rurales por biogás obtenido del proceso de biodigestión, como es el caso de Bogotá con proyectos liderados por la Universidad Minuto de Dios y en Antioquia, con sistemas más tecnificados de captura y combustión en los rellenos sanitarios.

En áreas Urbanas se puede otorgar un enfoque tecnológico a los rellenos sanitarios para obtener biogás con el fin de aprovechar o generar energías limpias. La gran mayoría de los residuos sólidos generados terminan su ciclo de vida en los rellenos sanitarios (modelo lineal), de persistir esta situación, no habrá espacios suficientes para disponer de estos residuos; ocasionando graves problemas ambientales en todo el territorio nacional; sin embargo, se han realizado grandes inversiones de infraestructura y diseño para el tratamiento de residuos en los rellenos sanitarios ubicados en toda la geografía colombiana (CONPES, 2016). La Figura 1 permite identificar la situación actual de los proyectos instalados en el país con relación a la generación de biogás con residuos.

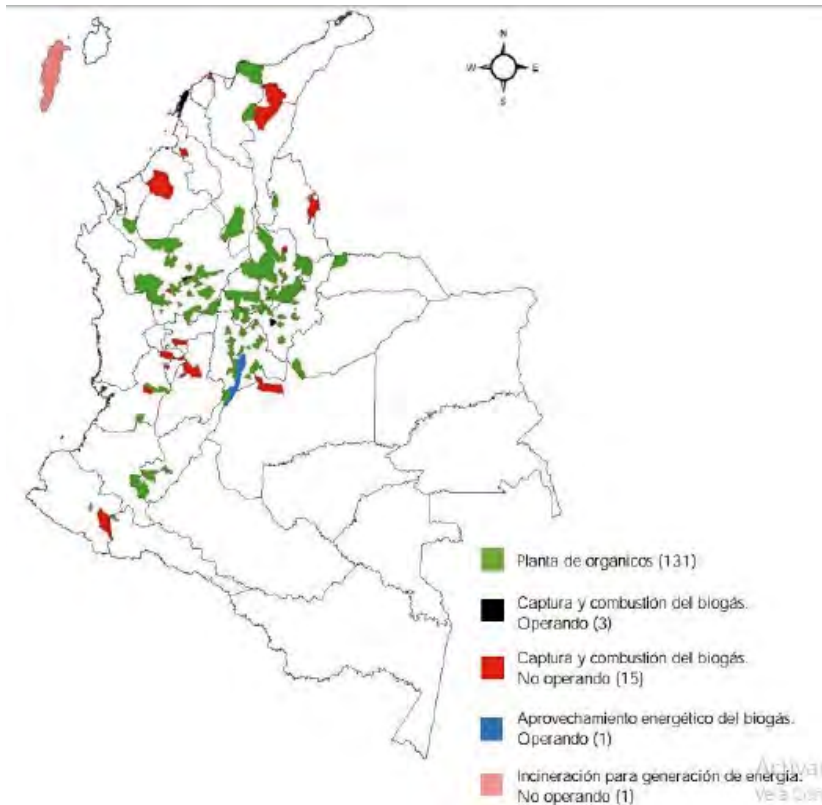


Figura 1. Infraestructura de tratamiento y aprovechamiento de residuos en Colombia

Fuente: Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2016

Durante el Acuerdo de París (2015), Colombia se comprometió a reducir la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos; para esto el Ideam (2016) especifica que tanto el metano como el dióxido de carbono se generan en cualquier tipo de disposición final de residuos sólidos; encontrándose como principal fuente de emisión los rellenos sanitarios, por otro lado, el aprovechamiento del CH_4 como fuente de energía tanto para el área rural contrarrestaría la tala de árboles y las enfermedades respiratorias. Los gases que se liberan en los sitios de disposición final pueden afectar el medioambiente, para esto, deben tomarse las medidas necesarias para reducir

y aprovechar las emisiones de estos gases (IPCC, 1996), el biogás resulta ser una alternativa ideal para la utilización de gas metano en sitios de disposición final de residuos sólido.

El Gobierno de Colombia a través de los últimos años, ha promovido el desarrollo y empleo de fuentes no convencionales de energía, en especial las renovables. Esto en búsqueda del desarrollo económico sostenible, en la Ley 1715 de 2014 para contribuir con los compromisos ambientales de las reducciones de las emisiones de gases de efecto invernadero y asegurar el abastecimiento energético, tal como lo señala esta Ley, en su artículo 1. Dentro de la normatividad existente hasta la fecha se estipula que las Corporaciones Autónomas Regionales son responsables de propiciar la implementación de proyectos que en todos los municipios de Colombia permitan el manejo integral y adecuado de los residuos sólidos generados en cada uno de ellos.

El Gobierno nacional está trabajando para tomar en cuenta las recomendaciones de la Organización para la Cooperación del Desarrollo Económico a través de la evaluación del desempeño ambiental (OCDE, 2014), lo que ha permitido una mayor sinergia entre las entidades del sector a nivel nacional, regional y local. La mayor parte de las estadísticas encontradas sobre residuos sólidos se calculan por la cantidad de desechos presentados a las empresas de servicios públicos de aseo y pesadas en básculas; sin dejar de mencionar que otra gran parte no puede ser estimada porque llegan a sitios no autorizados como cuerpos de agua, botaderos y en algunos casos se realizan quemas al aire libre. Algunos municipios no cuentan con datos estadísticos de recepción de residuos sólidos. La distribución de los residuos sólidos presentados para disposición final por departamento durante el año 2014, indica que los departamentos que más cantidad de residuos están disponiendo, en orden descendente son: Antioquia, Valle del Cauca, Atlántico, Cundinamarca, Bolívar, Santander y Norte de Santander. Bogotá a pesar de no ser departamento, se toma como uno generador importante, estando en primer lugar de producción.

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

Mientras tanto, las características socio-económicas y climáticas de la región Norte colombiana deberían ser garantía de implementación de proyectos de digestión anaerobia, pero existen otro tipo de problemáticas que impiden la implementación en esta zona del país, liderados por las trabas en las organizaciones gubernamentales. La recuperación ambiental debe ser una tarea permanente en este tipo de actividades, por lo que el conocimiento relacionado con el potencial energético de la biomasa contribuiría a mejorar las acciones para el aprovechamiento eficiente de los residuos sólidos orgánicos con fines energéticos, ligado a beneficios ambientales como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la minimización de la disposición de contaminantes al suelo, agua y aire.

Con el objeto de disminuir debilidades en este aspecto y fomentar proyectos con energías limpias, el Estado colombiano creó el sistema de Gestión de Información y conocimiento en Fuentes No convencionales de Energía Renovable “SGIC-FNCER” iniciativa apoyada por el Banco Interamericano de Desarrollo BID (UPME, 2017); que permite analizar la razón por la cual los proyectos con biodigestores para producción energética no se han desarrollado en Latinoamérica.

Por otra parte, tampoco se están implementado estos proyectos como políticas de las Corporaciones Autónomas Regionales ni hacen parte de las estrategias utilizadas por las empresas de aseo; situación que pone en desventaja económica y ambiental a toda la región.

Dada la situación de la problemática anterior, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

- ¿Cuáles serían las mejores estrategias para el diseño de un plan de gestión ambiental eficiente para la implementación de biodigestores anaerobios reductores de residuos sólidos orgánicos y contaminantes en el medioambiente de los departamentos de las zonas norte y central de Colombia?

El presente trabajo tiene como objetivo principal, establecer una propuesta metodológica de gestión ambiental para la implementación de este tipo de biodigestores, de acuerdo a los proyectos planeados, en desarrollo y/o en ejecución, como medida de aprovechamiento de los residuos sólidos generados en los municipios; relacionando los indicadores más importantes a nivel social y económico, por lo cual se requiere determinar el estado actual del uso de biodigestores anaerobios en la región Norte de Colombia para aprovechamiento de residuos sólidos en comparación con la región Central del país.

2. MARCO REFERENCIAL

ESTADO DEL ARTE

Existen pocos estudios conocidos a nivel internacional y nacional para la implementación de biodigestores y de otros sistemas para reducir la cantidad de residuos contaminantes y de gases de efecto invernadero en el medioambiente, entre los cuales se destaca:

En Suecia, un trabajo de investigación, en el que se utiliza un método para hacer estimaciones regionales del potencial de producción de biogás con residuos de cosechas y estiércol para la Unión Europea; destacándose las limitaciones relacionadas con las mezclas de los sustratos carbono-nitrógeno y la concentración de material seco. Se tienen como antecedentes estudios relacionados con las estimaciones de disponibilidad de residuos agrícolas; proporcionando un modelo potencial de biogás, por reducción de escala estadística agrícola en la producción de cultivos. El estudio se dividió en estimar la cantidad de estiércol y residuos de cultivos para la producción de biogás; en segundo lugar, se redujo la cantidad de sustrato a escala para elaborar un mapa de cobertura terrestre y de densidad de población de ganado; y por último, se estimó el potencial de biogás maximizando los sustratos disponibles en cada ubicación geográfica (Einarsson & Persson, 2017).

Según el estudio Impacto social y ambiental para el biogás sostenible la producción en la ciudad de Johannesburgo, en septiembre de 2016; establece la comparativa entre aumento de población y de residuos sólidos generados por este comportamiento, hecho que puede ser aprovechable para la generación de biogás como sustituto de los combustibles fósiles para los autobuses de metro (Chingono & Mbohwa, 2016). Dentro de este marco, se encarga de demostrar los beneficios a nivel económico respecto a tomar como alternativa de reducción de la pobreza, de mejoramiento de la seguridad ecológica y del desarrollo monetario. Mientras que, la información para el desarrollo del estudio se obtuvo a través de observaciones y entrevistas; dentro de sus conclusiones se referencian priorizar la integración de ciertos grupos minoritarios al desarrollo de este tipo de proyectos, y la intervención del Gobierno para tomar medidas de protección a quienes generen biocombustibles.

No obstante, en noviembre de 2014 fue presentado el informe “Una perspectiva global de Digestión Anaerobia Políticas e incentivos”, por Global Methane Initiative con participantes de varios países líderes en proyectos de biocombustibles, en búsqueda de una perspectiva general de las políticas, reglamentos e incentivos gubernamentales para promover la digestión anaerobia, quienes identificaron entre los grandes obstáculos los altos costos, la poca familiaridad con el proceso de biodigestión y falta de políticas e incentivos; cuestionan los autores la incertidumbre de precios para el biogás producido y su periodo de retorno. Con esa finalidad, la metodología utilizada fue la recolección de información de los países en estudio a través de búsqueda en internet (Global Methane Initiative, 2014). Igualmente, este informe confirma que las políticas y los incentivos juegan un papel determinante en la viabilidad y la escala de los proyectos de digestión anaerobia: utilizando esta tecnología a escala para la gestión de residuos sólidos ganaderos, reducción de la contaminación del aire y del agua (Lugo, 2017; Lugo y Lugo, 2018; Lugo et al, 2018).

Ahora bien, en otro de los estudios consultados se establece que en Cuba los biodigestores emplean una de las alternativas más relevantes para el tratamiento de

los desechos orgánicos generados en las empresas agropecuarias, pues permiten disminuir la carga contaminante, mejorar la capacidad fertilizante del material, eliminar los malos olores y generar energía renovable, el cual se utilizó para la cocción de alimentos, calentar agua, generar electricidad, y obtener luz directamente usando lámparas de gas (Campos, 2011). El propósito de la investigación fue mostrar una metodología para facilitar el análisis y cálculo de los parámetros para la construcción de biodigestores de cúpula fija; además, la metodología está desarrollada con el objetivo de facilitar el análisis y cálculo de los parámetros para el diseño y construcción de plantas de biogás de cúpula fija (biodigestores), teniendo como herramienta de trabajo el procesador de cálculo Microsoft Excel.

Mientras tanto, en la investigación llevada a cabo por Chacón y Tulcán (2012) se aborda la normatividad de los planes de gestión integral de residuos sólidos con el objetivo de elaborar un estudio del manejo de los desechos generados en la zona de exhibiciones del Zoológico de Cali, con el fin de mejorar gradualmente los procesos involucrados en la gestión. Este estudio fue desarrollado en varias etapas: recolección de la información, análisis de la situación actual con un diagnóstico de los procesos y procedimientos, planteamiento de un modelo conceptual, y establecimiento de propuestas y cambios. El estado concluyente de este trabajo radicó en la creación de unidades de almacenamiento de residuos, junto a la implementación de un biodigestor.

Por otro lado, en la tesis de Serrano Camacho (2006), se especifica que deben evaluarse cuidadosamente todos los componentes tecnológicos, que van desde los entornos geográficos para la ubicación del biodigestor hasta la idiosincrasia de producción y consumo de bienes y servicios, toma como referencia el relleno sanitario de Doña Juana en Bogotá; utilizando tres modelos predictivos: EPA, México y Scholl Canyon; con bases de datos existentes en entidades gubernamentales en las etapas de recolección y quema del biogás y valoración energética para generación eléctrica. Resalta que los rellenos sanitarios se pueden describir como un inmenso biodigestor

anaeróbico que genera metano; este gas tiene un potencial de calentamiento atmosférico (“GWP” Global Warming Potentials), 21 veces superior al del CO₂. Como ejemplo de otras fuentes de metano, están los cultivos de arroz, las plantas anaeróbicas de tratamiento de aguas residuales y el ganado bovino, y, en general, la descomposición anaeróbica de la materia orgánica. En su estudio Serrano concluye que una de las barreras para el desarrollo de este tipo de proyectos es la legislación colombiana, dado que algunas empresas afirman que no existen estudios que evidencien la ausencia de efectos fisicoquímicos a las redes propias de gas natural. Dentro de las recomendaciones de este estudio está fortalecer la capacidad de seguimiento y monitoreo a los residuos sólidos orgánicos a través de entidades como el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MAVDT) y Corporaciones Autónomas Regionales, y para la implementación de políticas y planes claros, adoptar modelos como Scholl Canyon, mexicano y Swana.

Casos de éxito de biodigestores anaerobios con residuos sólidos orgánicos (a nivel Latinoamérica)

Argentina: la División de Energía Eléctrica en convenio con el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) realizó un análisis para evaluar la factibilidad de la generación de biogás en sitios de disposición final de residuos sólidos en la ciudad de Salta, determinando la composición de los residuos que llegan al relleno sanitario y las condiciones climáticas del mismo, es un proyecto que genera impactos positivos a nivel económico y ambiental, disminuyendo la cantidad de emisiones de GEI; dentro de los factores relevantes identificados para la generación de biocombustible está la composición de los residuos sólidos, temperatura y humedad, el uso principal del gas obtenido en la producción de electricidad (BID, 2017). En su metodología se utilizan motores de combustión interna que alcanzan mejores rendimientos que las turbinas de gas. En el aspecto ambiental los proyectos de biogás en rellenos sanitarios favorecen la disminución de emisiones de gas de efecto invernadero.

Chile: la empresa KDM S.A. propietaria del relleno sanitario Loma los Colorados desarrolló e implementó un proyecto de generación de biogás, aplicando el modelo cinético, para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero; con una metodología que incluye desde el transporte de residuos a partir del origen hasta el almacenamiento en sitios herméticos donde posteriormente son trasladados al relleno por ferrocarril; establecieron una categorización de los tipos de residuos que llegan al relleno sanitario, utilizando el modelo cinético para la estimación del potencial de biocombustible. El biogás captado a través de una red de tuberías extendidas y motores de combustión interna tiene como fin la inyección a la red eléctrica (KDM Energía S.A., 2011).

Cuba: En el proyecto de López Vega & Santos Herrero (2012), seleccionaron un reactor tipo Bach estático, por su economía y simplicidad, reduciendo el proceso a la recirculación de lixiviados producidos directamente al propio reactor; concluyendo que debe aplicarse la recirculación de lixiviados para eliminar carga orgánica.

Colombia: La Red Colombiana de Energía de la Biomasa (RedBioCol, 2016), tiene como misión construir en la sociedad colombiana el desarrollo sostenible mediante el aprovechamiento energético de residuos orgánicos; dentro de las expectativas de esta organización, se encuentra la conformación de una red de apoyo, que permita implementar proyectos relacionados con la biodigestión mediante la articulación, gestión del conocimiento e incidencia política, económica, social y ambiental del país.

En uno de sus proyectos líderes el responsable es la alcaldía de Guapotá en el departamento de Santander donde implementan biodigestores plásticos de flujo continuo.

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Los conceptos vinculados al desarrollo de este estudio se relacionan a continuación, con el objetivo de establecer un marco teórico que fundamente las condiciones

necesarias para implementar proyectos de biodigestores anaerobios de acuerdo a las características propias de la región Norte y la región Central.

Residuos Sólidos

Puede definirse Residuo Sólidos como “cualquier elemento sólido (objeto, material, sustancia) que se obtiene al consumir o usar un bien en cualquier actividad y que es abandonado, rechazado o entregado por quien lo genera y a su vez es susceptible de aprovechar o transformar, clasificándose en aprovechables y no aprovechables, o en su defecto aquellos que provienen del barrido de áreas públicas” (Decreto 1713, 2002). En esta misma normativa, en el artículo 8 se establece la obligatoriedad de los municipios y distritos de elaborar y mantener actualizado un plan para la Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS). Así de esta forma recae en la empresa prestadora del servicio de aseo la responsabilidad desde la recolección hasta la disposición final, y agrupa a los usuarios como residenciales y no residenciales, pequeños y grandes generadores.

Los residuos sólidos han sido gestionados por el servicio público de aseo bajo un modelo lineal. Este se define como un modelo en el cual la materia prima se extrae, se utiliza para fabricar bienes y finalmente se dispone. La premisa es que las empresas extraen los materiales, les aplican energía para la fabricación de un producto y venden dicho producto al consumidor final, quien luego lo descarta cuando ya no sirve al propósito del usuario. Bajo este modelo, la disminución de los precios reales de los recursos en las economías avanzadas, ha apoyado el crecimiento económico en la mayor parte del siglo pasado, pero también ha creado el desperdicio actual en el uso de los recursos.

Los residuos de rellenos sanitarios se clasifican en orgánicos e inorgánicos, siendo la primera la que contribuye anaeróbicamente generando biogás. La Tabla 1 muestra el análisis elemental de residuos sólidos orgánicos según diferentes autores.

Tabla 1. Análisis elemental típico de residuos sólidos orgánicos

Fuente	Componente	% en peso (base seca)					
		C	H	O	N	S	Cenizas
Adaptado de EMCOM, (1982) y Tchobanoglous, (1994)	Restos de comida	48.0	6.4	37.6	2.6	0.4	5.0
	Papel – cartón	44.0	6.0	44.0	0.3	0.2	6.0
	Residuos jardín	48.0	6.0	38.0	3.4	0.3	4.5
	Madera	49.5	6.0	42.7	0.2	0.1	1.5
	Plástico	60.0	7.2	22.8	-	-	10.0
	Textil	55.0	6.6	31.2	4.6	0.2	2.5
	Goma	78.0	10.0	0.0	2.0	0.0	10.0
	Cuero	60.0	8.0	11.6	10.0	0.4	10.0
	Vidrio	0.5	0.1	0.4	<0.1	-	98.9
	Metales	4.5	0.6	4.3	<0.1	-	90.5
	Cenizas, suciedad, etc	26.0	3.0	2.0	0.5	0.2	68.0
Jeon et al (2007)	Restos de comida	38.1	2.5	23	-	-	-
	Papel	38.7	5.5	43.9	-	-	-
	Madera	47.5	6.2	42.3	-	-	-
	Plástico	79.4	13.5	3.3	-	-	-
	Textil	52.9	5.6	40.5	-	-	-
	Goma	68.1	7.8	5.3	-	-	-
	Cuero	52.2	6	28.6	-	-	-

Fuente: Tomada de Rodrigo Clavero, 2016

Por otra parte, la biomasa residual en el sector agrícola está conformada por los subproductos (residuos agrícolas y agroindustriales) que se generan durante los procesos de recolección y transformación de las cosechas.

Proceso de la Biodigestión

Se identifican en un biodigestor anaerobio componentes principales como el reactor, el contenedor de gas, los accesorios de salida del biogás, entrada de materias orgánicas y descarga de sustrato (Varnero Moreno, 2011).

La degradación anaerobia involucra cuatro etapas, en cada una de ellas la materia orgánica es transformada por una serie de bacterias tal como se muestra en la Figura 2: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

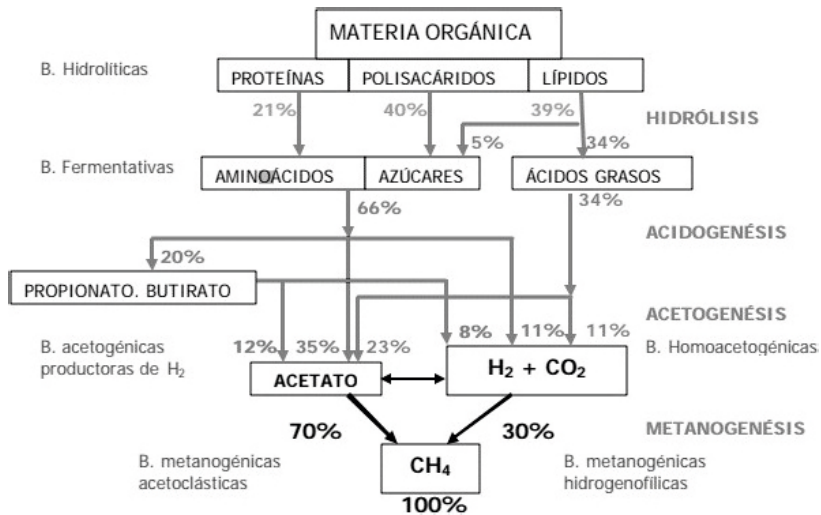


Figura 2. Etapas de la digestión anaerobia

Fuente: (Madigan, (1997), VanHaandel, (1994)

El proceso de la digestión anaerobia inicia con la licuefacción o hidrólisis, donde las bacterias liberan enzimas descomponiendo la materia orgánica en compuestos simples, tales como azúcares, grasas y aminoácidos; depende del tiempo de retención de la naturaleza del sustrato (Kondusamy, Kalamdhah, 2014). Del resultado de esta primera etapa intervienen las bacterias cuya función es realizar la fermentación, intensificando la producción de ácidos y la eliminación de todo el oxígeno disuelto. La siguiente fase corresponde a la degradación de ácidos obteniendo hidrógeno, dióxido de carbono y ácido acético. Por último, en la etapa de la metanogénesis pueden existir factores que inhiban el proceso anaeróbico, tales como la presencia de elevadas concentraciones en el sustrato. La cantidad de ácido sulfhídrico y metano dependerá del proceso termodinámico y cinético de las bacterias sulfato-reductoras (Varnero

Moreno, 2011). Es importante destacar que el proceso biológico de digestión anaerobia resulta complejo y degradativo, y al convertirse en biogás más del 90 % de energía disponible se transforma en metano (Varnero Moreno, 2011); del mismo modo, una de las condiciones para la producción de biogás es el tiempo de residencia en el reactor, debido al cambio de etapa del tipo de digestión como se muestra en la Figura 3 (Pérez, 2010).

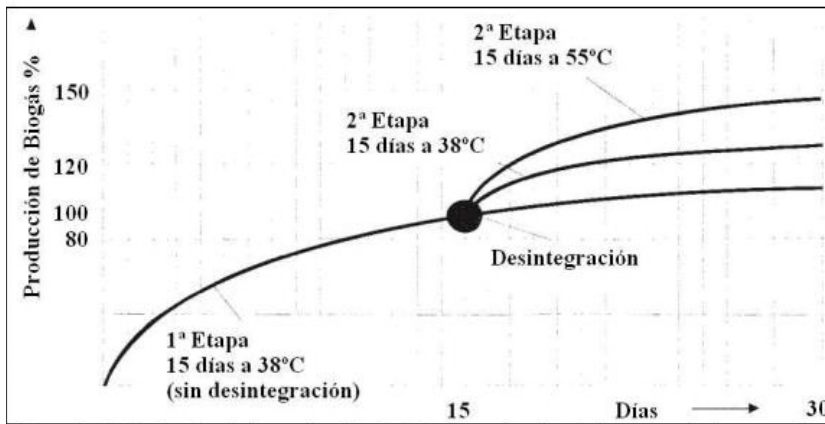


Figura 3. Variación de la producción de biogás en función del proceso de fermentación y la etapa de desintegración

Fuente: Pérez, (2010)

Biogás

Es un gas que se genera de manera natural o en recipientes por procesos de biodegradación de la materia orgánica, formada principalmente de metano y dióxido de carbono, tal como se muestra en la Tabla 2, que presenta la composición y características específicas.

Tabla 2. Características generales del biogás

Composición	55 – 70 % metano (CH ₄) 30 – 45 % dióxido de carbono (CO ₂) Trazas de otros gases
--------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

Contenido energético	6.0 – 6.5 kW h m ⁻³
Equivalente de combustible	0.60 – 0.65 L petróleo/m ³ biogás
Límite de explosión	6 – 12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 – 750°C (con el contenido de CH ₄ mencionado)
Presión crítica	74 – 88 atm
Temperatura crítica	-82.5°C
Densidad normal	1.2 kg m ⁻³
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg kmol ⁻¹

Fuente: Tomada de Varnero Moreno (2011), Manual de Biogás

Ventajas y desventajas

La producción de biogás conlleva a beneficios económicos, tales como la venta del mismo, constituye una fuente de ingreso adicional (Sorathia, Rathod, & Sorathiya, 2012), puede usarse como combustible para uso personal o comercial con elevado poder energético (Pérez, 2010), requiere baja inversión en el proceso de instalación; el mantenimiento resulta ser de bajo costo que permite eliminar CO₂ de manera eficiente (Cabildo Miranda *et al.*, 2008); se disminuyen problemas sanitarios generados por la cocción de alimentos, producto de la combustión generada en los hogares rurales al cocinar con leña (Sebastian Nogues, García Galindo, & Rezeau, 2010).

En cuanto a las desventajas, se encontró que el suministro de materia prima orgánica debe ser permanente, lo cual suele caracterizarse por expeler malos olores, al mezclarse con el aire puede ser explosivo (Bridgewater & Bridgewater, 2008).

Biomasa y su composición

La cantidad de materia prima debe ser lo suficiente como para producir gas metano, (Rodríguez, 1982); condición fundamental para el buen funcionamiento del

biodigestor, tal como se muestra en la Tabla 3 las proporciones por tipo de residuo al obtener biogás.

Tabla 3. Producción de biogás a partir de residuos vegetales y animal

Residuos	Cantidad Residuo Ton/Ha	Relación C/N	Volumen de biogás	
			M ³ /Ton	M ³ /ha
Trigo	3,3	123:1	367	1200
Maíz	6,4	45:1	514	3300
Cebada	3,6	95:1	388	1400
Arroz	4,0	58:1	352	1400
Papas	10,0	20:1	606	6000
Betarragas	12,0	23:1	501	6000
Porotos	3,2	38:1	518	1650
Habas	4,0	29:1	608	1400
Tomate	5,5	12:1	603	3300
Cebolla	7,0	15:1	514	3600
Estiércol	Disponibilidad Kg/día	Relación C/N	Volumen de biogás	
			m ³ /kg húmedo m ³ /día/año	m ³ /kg húmedo m ³ /día/año
Bovino (500 kg)	10.00	25:1	0.04	0.400
Porcino (50 kg)	2.25	13:1	0.06	0.135
Aves (2 kg)	0.18	19:1	0.08	0.014
Ovino (32 kg)	1.50	35:1	0.05	0.075
Caprino (50 kg)	2.00	40:1	0.05	0.100
Equino (450 kg)	10.00	50:1	0.04	0.400
Conejo (3 kg)	0.35	13:1	0.06	0.021

Fuente: Varnero Moreno, María Teresa, (2011). Manual de Biogás. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

La caracterización de residuos sólidos en algunas ciudades de Colombia manifiesta un 61,54 % para materia orgánica, 10,78 % de plástico y 6,55 % papel y cartón Depto.Nacional de planeación (2016). Gran parte de la materia orgánica en

descomposición es enterrada en los rellenos sanitarios y produce una mezcla de gases conocida como biogás, generando que a veces se pierda el poder calorífico de estos residuos.

Biodigestores

Una planta de biogás está conformada por la tubería de entrada, tal como se observa en la Figura 4, donde desde la entrada hasta el tanque, la suspensión ingresa en movimiento; en el tanque de mezclado se combina agua, materia prima y el estiércol. La fermentación se lleva a cabo en el digestor donde luego el biogás se recoge en el gasómetro; a través de un tubo se descarga en el gasoducto que transporta el biogás hasta el uso final (Rodríguez, 2014).

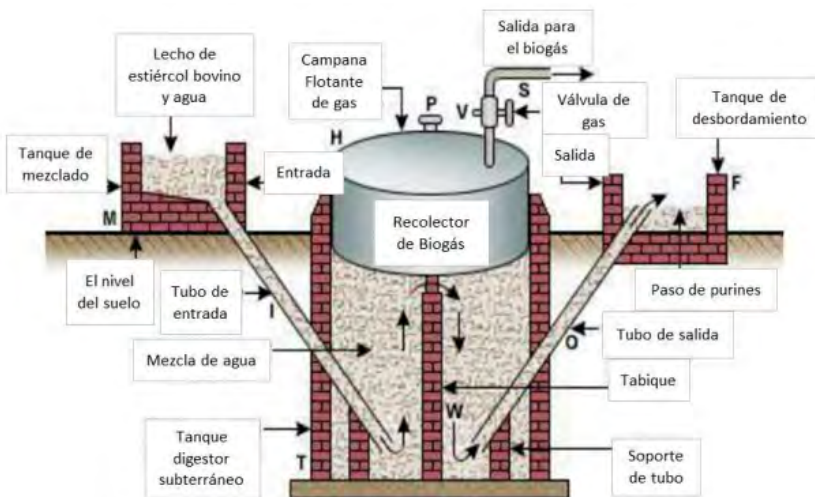


Figura 4. Gráfica Biodigestor Tipo Campana Flotante. Viabilidad técnica para producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos orgánicos

Modelos de Biodigestores

Existen varios modelos de biodigestores que se clasificará (ver la Figura 5) de acuerdo a su grado de popularidad:

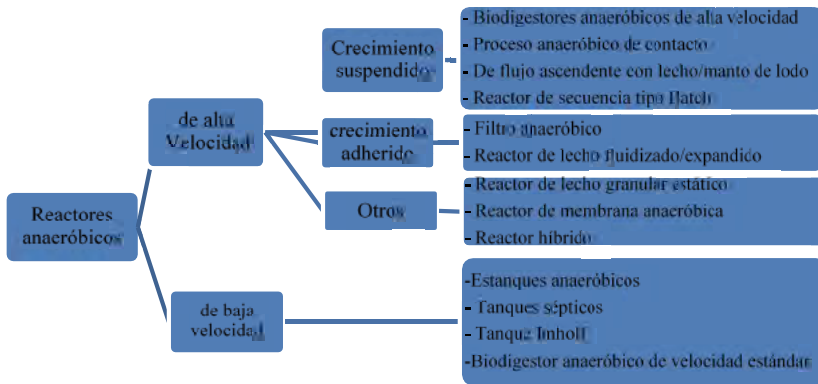


Figura 5. Clasificación de los reactores anaeróbicos

Fuente: Minenergía / Pnud / Fao / Gef. Manual de Biogás. Santiago de Chile. 2011

Tipos de Biodigestores

Existen diferentes clases de biodigestores de acuerdo a su uso y complejidad, distinguiéndose los siguientes tipos:

Discontinuos: también conocidos como biodigestores Batch (Ver Figura 6). En estos, el flujo de operación se realiza en un solo lote. Cada cierto tiempo de acuerdo a la cantidad de gas generado o de materia prima utilizada se debe vaciar por completo el biodigestor y cargarlo iniciando de nuevo el proceso; conformado a su vez por una salida de gas y un gasómetro (campana de almacenamiento separada del biodigestor). Dentro de las ventajas de este biodigestor están la facilidad de construcción, y la simplicidad en el proceso de digestión (Varnero Moreno, 2011).

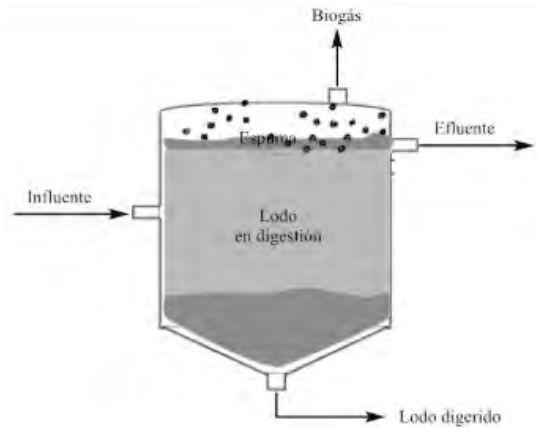


Figura 6. Biodigestor discontinuo

Fuente: Nogués F., Galindo D., Rezeau A. (2010). Imagen de un biodigestor discontinuo

Semicontínuos: el proceso de cargue de materia prima se realiza a diario, la producción de biogás es equivalente a la cantidad de residuos orgánicos que ingresan. El uso más común es en la zona rural o doméstico; el gasómetro incorporado al biodigestor en forma de campana flotante (sitio de almacenamiento). Los diseños más conocidos (Ver Figura 7) son el modelo chino, donde el gas se almacena en el mismo recipiente, su principal uso es la producción de bioabono; y el modelo indio, donde la presión del biogás permite que la campana suba almacenándolo; su proceso de cargue es de uno a dos veces diarios (Rodríguez Perdígón, 2014).

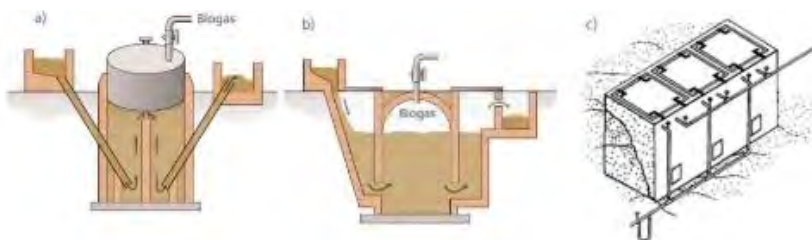


Figura 7. Biodigestor hindú y chino

Fuente: Inglese P. et al (2018). Biodigestor hindú y chino

Continuos: Utilizados para aguas residuales, residuos de agroindustria y orgánicos (Ver Figura 8). Su proceso de cargue es permanente; manejan una gran producción de biogás (Bautista Buhigas, 2010).

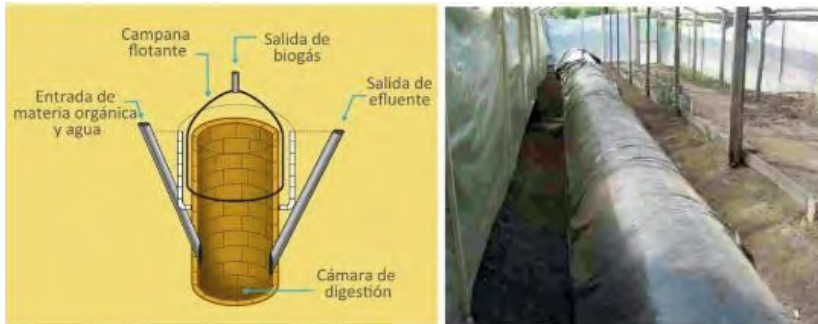


Figura 8. Biodigestor de carga continua

Fuente: Ramos, I. (2014). Imagen de un biodigestor de carga continúa

Clasificación de biodigestores rurales

De acuerdo a la forma y estructura del biodigestor se pueden clasificar tal como aparecen en la Figura 9; se distinguen biodigestores de cúpula fija, cúpula móvil, con depósito flotante, o de presión constante, con gasómetro de caucho teniendo en cuenta el almacenamiento.

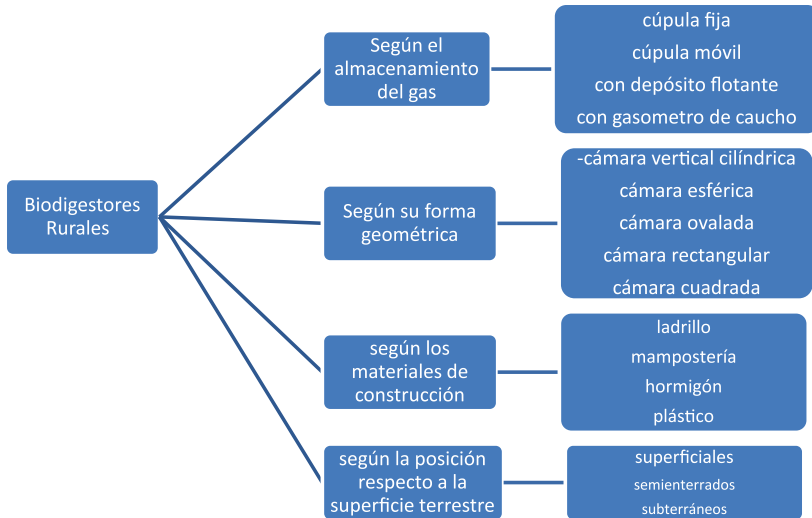


Figura 9. Clasificación de biodigestores rurales

Fuente: Guevara (1996)

Fundamentos Básicos para el diseño de biodigestores anaerobios rurales

En referencia a la clasificación mostrada en la Figura 5, el más antiguo de los biodigestores es el pozo séptico, las aguas servidas no pueden contener detergentes ya que son inhibidores de la producción de biogás, si no es posible separarlos deben tratarse químicamente. Por otra parte, el biodigestor que al acumular el biogás se eleva el tambor se denomina tambor flotante; mientras que para el diseño en el que combinan la cámara de fermentación y el soporte del biogás se conoce como cúpula fija. El biodigestor tipo cúpula móvil se construye con una estructura de concreto y en forma de campana el depósito de gas, el cual se encuentra en la parte superior del área de contenido o cámara de biodigestión; a medida que la presión dentro del biodigestor va aumentando también lo hace la producción de biogás, tal como se observa en la Figura 7, en la parte superior se almacena el biogás.

- Pozo de entrada: También llamado tanque de mezcla, empleado para realizar la mezcla de desechos orgánicos y agua; normalmente se construye con cemento y ladrillos.
- Válvula de seguridad: Este dispositivo necesario para el control y regulación del gas, cuyo tamaño depende de la tubería instalada en el sistema de conducción; mínimo deben instalarse dos, una en el inicio de la línea de conducción en el reactor y la otra se instala en el lugar de uso. El material utilizado para las válvulas debe ser resistente a la corrosión; preferiblemente PVC o acero inoxidable.
- Sistema de conducción: Comprende el conjunto de tuberías desde el reactor del biodigestor hasta el lugar de uso; e incluye en esta la sección de acondicionamiento.
- Salida de biogás: Es generada en el reactor y dispuesta en el área de contenedor de gas; permiten que salga la mezcla para su posterior tratamiento y uso.
- Salida de sólidos: Su objetivo es descargar el líquido o lodos, estos efluentes pueden utilizarse para la elaboración de abono. Suele utilizarse un tanque de almacenamiento ubicado abajo del nivel de carga.
- Reservorio: Área de disposición o almacenamiento del gas; se dispone aquí el producto generado en los biodigestores. Los materiales de construcción pueden ser plástico o geomembrana, ubicado horizontal o verticalmente, evitando ubicarlo en un lugar de alto tránsito.

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS
 reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
 de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

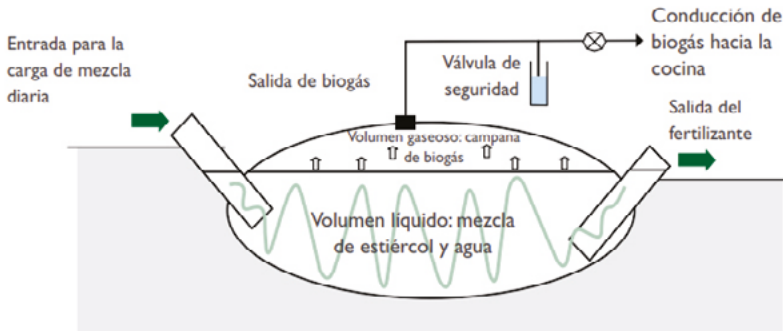


Figura 10. Esquema de un biodigestor hasta la cocina.

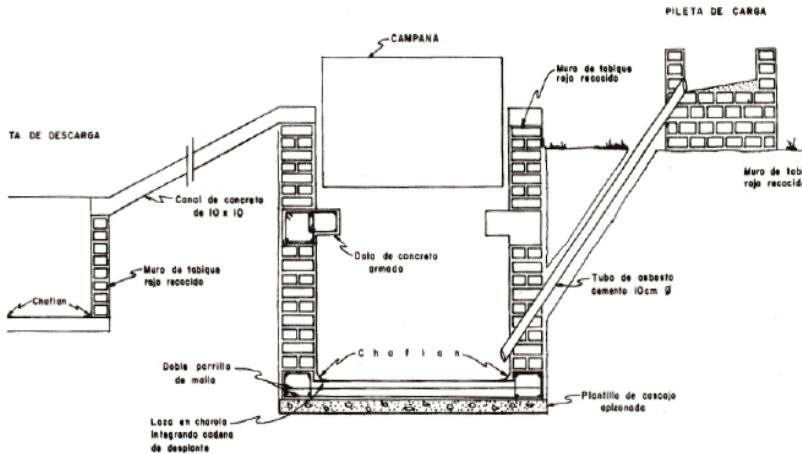


Figura 11. Biodigestor tipo hindú de 4 m³ de capacidad.

Metodología para el diseño de biodigestores

En relación al diseño del biodigestor (Ver Figura 12), se debe tener en cuenta los parámetros técnicos, como la temperatura, el tiempo de retención, la relación agua: estiércol (proporción 4:1), y las actividades de carga diaria para garantizar la producción permanente en el biodigestor.

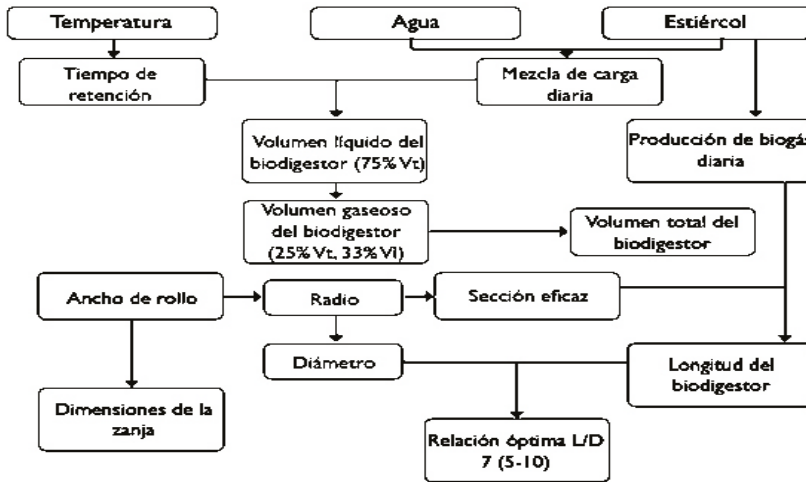


Figura 12. Esquema de metodología de diseño de un biodigestor

Los volúmenes dependerán de la cantidad de residuos generados por los semovientes y el tipo de requerimiento energético (uso).

Parámetros de implementación de biodigestores

Se referencian aspectos que durante el proceso de digestión anaerobia permiten la obtención óptima del metano. Es así como, diferentes autores han determinado parámetros al momento de diseñar e instalar biodigestores anaerobios, en la Tabla 4 se relacionan algunos aspectos tomados en cuenta como referencia para el desarrollo de este trabajo.

Tabla 4. Parámetros de implementación de biodigestores

Parámetro	Observaciones	Autor
Temperatura	condición mesófila (25-40 °C) temperatura óptima de 35 °C termófila (50-65 °C) c	(Pavithran, Kannan, Raja Jayasingh, & Ganesh Karthikeyan, 2015)
Ph	6,7-7,5	(Guo Guo, 2010)
Relación C-N	20-30	(Guo Guo, 2010)
Contenido de MS	20-30	(Guo Guo, 2010)

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

C:N:P:S	600: 15: 5: 3	(Guo Guo, 2010)
Tiempo de Retención (días) de acuerdo al ambiente	Psicrofilico > 40 Mesofilico 10 – 40 Termofilico < 10	(Olaya, 2006)

La generación de gases se ve afectado por múltiples factores que conforman un escenario ideal para la producción de biogás, a continuación, se detallan a nivel técnico, ambiental, social, legal y político.

Características técnicas

- a. Disponibilidad de nutrientes: Las diversas materias primas utilizadas en el proceso de biodigestión pueden ser de origen vegetal, animal, agrícola, industrial, entre otros. La presencia o no de carbono, nitrógeno, hidrógeno, fósforo, y algunos micronutrientes permite la obtención de biogás de manera proporcional a la cantidad del nutriente. Cabe destacar que en caso de que un relleno disponga de lodos, los sistemas de tratamiento de aguas residuales aceleran el proceso de generación de gas (Colmenares Mayanga & Santos Bonilla, 2007); mientras que para el sector rural el estiércol contiene el carbono necesario para la producción de biogás (Pérez, 2010).
- b. Temperatura. En cuanto al rango de temperaturas necesarias para el proceso de biodigestión anaerobia se establece entre 10°C a 60°C de acuerdo a cada una de las etapas (Graña Magariños, 2014); tal como se observa en la Tabla 5 para cada una de las fases de la digestión anaerobia se requieren ciertas condiciones climatológicas. De tal manera, en zonas tropicales se tiene el clima óptimo de manera natural; las temperaturas menores retrasan el proceso de producción de biogás (Martí, 2008).
- c. Humedad: Las condiciones anaeróbicas que favorecen la generación de metano es del 50 al 60 % de humedad. Es recomendable la recirculación

de lixiviados, ya que si se aumenta la humedad levemente se acelera el proceso de generación de gas considerablemente (Colmenares Mayanga & Santos Bonilla, 2007).

- d. pH: El rango debe oscilar entre 6 y 8. Altos valores de pH no favorecen la generación de metano. La alcalinidad natural del sistema controla el nivel de acidez de un sistema anaerobio; en algunos casos es necesario el uso de químicos (bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, cal, hidróxido de sodio y potasio) para mantener el pH óptimo (Varnero Moreno, 2011). Por otra parte, pH con valores menos de 6,2 interrumpen la producción de biogás.
- e. Factor de mezclado: El objetivo de este proceso de agitación es el incremento de producción de biogás, dado que se mantiene la temperatura dentro del biodigestor, y se frena que en la parte superior del mismo se acumule el de lodo. Los métodos pueden variar entre manuales a los que denominan mecánicos, con el uso de bombas para recircular la biomasa (hidráulico) o el burbujeo de biogás en el que a través de cañerías se produce burbujeo para que el biogás que está al fondo pueda fluir hacia todo el biodigestor.
 - Ácidos volátiles: En condiciones óptimas debe existir una concentración baja de ácidos grasos en un rango de 50 – 250 mg HAC/l; son de gran importancia en la formación del metano, ya que el aumento de la concentración de los mismos podría desencadenar una disminución del pH inhibiendo el proceso de producción de metano (Reynoso, 2017).
 - Promotores e inhibidores de la fermentación: Las sustancias tóxicas pueden entrar al biodigestor a través de las materias primas que ingresan a este; de acuerdo a la concentración de estas pueden fomentar o inhibir el proceso (Acosta y Abreu, 2005).

- **Potencial Redox:** Las reacciones de óxido-reducción que se presentan en el proceso metanogénico deberían estar en un rango entre -300 y -330 mV y garantizar que el biodigestor no se vea expuesto a sustancias oxidantes.
- **Relación C/N:** Se considera aceptable una relación de 20:1 hasta 30:1, ya que los materiales de fermentación están conformados en su mayoría por Carbono y Nitrógeno (Rynk, 1992).
- **Tiempo de retención:** Relacionado directamente con la temperatura ambiente en condiciones ideales (30°C) correspondería a 20 días, pero puede variar de acuerdo al cambio de temperatura; se establece entonces que el tiempo de retención es inversamente proporcional a la temperatura (Martí Herrero, 2008). El tiempo de permanencia dentro del biodigestor depende también de las características del sustrato y del contenedor; la temperatura de la región donde se instale el biodigestor influye inversamente proporcional al tiempo de retención, así tal como se observa en la Tabla 4, entre mayor temperatura menor tiempo de retención será necesario.

Tabla 5. Condiciones en cada etapa del proceso de biodigestión anaerobia

Parámetro	Hidrólisis	Acidogénesis	Acetanogénesis
Temperatura	<20°	Entre 30° y 40°	Entre 50° y 70°
pH	7,2 - 7,4	7 - 7,2	6,5 - 7-5

Nota: González, (2014) Estudio técnico-económico para la producción de biogás a partir de residuos agrícolas mediante digestión anaerobia

Esquema para la carga de un biodigestor tubular

La cámara de carga, como se muestra en la Figura 13, está conformada por el tanque de mezcla y el desarenador, para facilitar las operaciones con las materias primas

e insumos y evitar que residuos de arena, piedras y partículas gruesas entren al biodigestor. En esta área se suministra una carga de proporción materia orgánica inicial de heces (estiércol, gallinaza, porcínaza, etc.) con agua. Esta cámara está conectada con el reactor, pero debe tener una declinación con relación al mismo, para aprovechar la gravedad y favorecer la carga del reactor.



Figura 13. Esquema de carga de un biodigestor tubular

Fuente: Elaboración propia

El volumen del tanque de mezcla debe mantener entre un 10 a 20 % mayor al del volumen interno (Hernández, 2014). La carga debe efectuarse hasta el momento en el que por el tubo de descarga empiece a salir la materia orgánica. Por otro lado, para un biodigestor cúpula flotante (Ver Figura 14), el volumen del digestor debe ser igual al de la carga, y esta debe ser diaria para garantizar la producción continua de biogás.

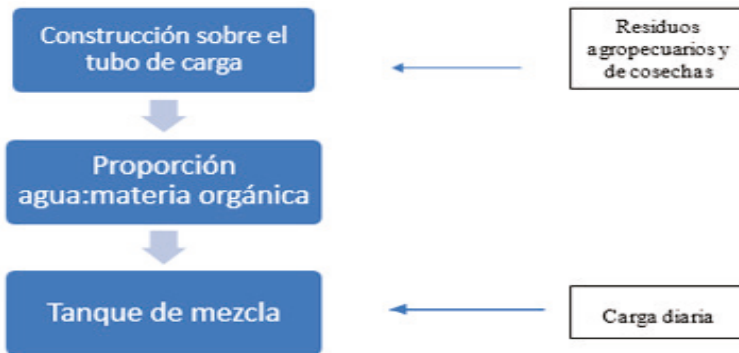


Figura 14. Esquema de carga de un biodigestor cúpula flotante

Fuente: Elaboración propia

Características sociales

A nivel social los factores que tienen influencia en la generación de gases son: la vinculación de recicladores, la coparticipación de comunidades y autoridades locales, así mismo las características de los usos de suelos, el poder adquisitivo y la economía de la región que permiten reducir o aumentar la aplicación de esta tecnología. Para la implementación de estos proyectos es fundamental tener políticas claras generadas por los entes gubernamentales y de control, que permitan mejorar los intereses particulares y públicos, la inversión privada y todos el apoyo económico y estatutario que pueda permitir el impulso y desarrollo de este tipo de proyectos (UPME, 2007).

La vinculación de organizaciones productivas sectoriales regionales en la iniciativa de biodigestores para que se generen talleres y cursos de capacitación, educación e innovación en tecnologías y más enfocado al uso de biodigestores (Martí Herrero, 2008).

Características ambientales

Luego de la revisión bibliográfica se establecen los factores ambientales más incidentes en la decisión de implementación de proyectos de biodigestores, que son:

- La reducción en la emisión de gas de efecto invernadero por una nueva forma de disposición final de los residuos sólidos.
- Fuente de energía renovable.
- Gestión integral de residuos por zonas geográficas.
- Reducción sobre la presión sobre los rellenos sanitarios.
- Reducción en la emisión de olores.

Aplicaciones del Biogás

La generación combinada de calor y electricidad “combined heat and power, CHP” (Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe 2010) es el mayor consumo de la generación de biogás, la Figura 15 muestra las aplicaciones que puede tener el biogás, en especial de rellenos sanitarios. Los usos que pueden darse al producto obtenido del proceso de biodigestión se describen en la Figura 15.

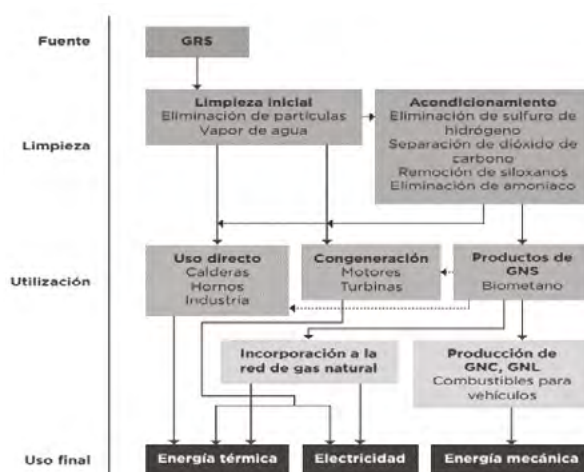


Figura 15. Tratamiento y usos del biogás

Fuente: BID, (2017)

- **Electricidad.** Para la generación de este tipo de energía se utilizan micro turbinas, motores de combustión interna y turbinas; para la obtención se emplean tecnologías que incluyen los procesos de remoción del dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y otros componentes; es así como, en las plantas de biogás se puede realizar la quema directa de biomasa en una caldera de combustión generando vapor, el cual es conducido a través de una turbina a un generador eléctrico. La generación de este tipo de energía a partir de biogás en rellenos sanitarios presenta doble ventaja respecto a la mitigación de gases de efecto invernadero, al capturarse el metano y sustituir los combustibles no renovables (BID, 2017).
- **Calor o vapor.** Corresponde a uno de los subproductos de la generación de la energía, sugerido para regiones donde se necesita suministrar calefacción en especial a hogares. Entre otros usos la energía térmica es el mínimo producto obtenido del proceso; en este, la producción de calor de una planta pequeña (190 kw) permite abastecer aproximadamente 30 hogares (Fachverband Biogas, 2017). El uso directo del calor puede hacerse a través de hornos y calentadores.
- **Biometanol (Combustible).** Se considera que con un contenido del 98 % de metano se puede alimentar la red de gas existente para suministrar a vehículos en una estación de gas, con ventaja de la reducción de CO₂ en un 90 % a mitad de costo por kilómetro recorrido (Fachverband Biogas, 2017); este puede ser utilizado como combustible de los camiones del relleno y de recolección; para autobuses o el sistema de transporte público.
- **Gas domiciliario.** Mediante la utilización de CHP a través de tubos es posible alimentar la red de gas doméstico, el cual puede ser únicamente con biogás o mezclado con gas natural.

Tecnologías de purificación del biogás

Upgrading. Consiste en separar el dióxido de carbono, nitrógeno y otras impurezas para obtener el biometano seguido de un proceso de secado. Las técnicas utilizadas para la eliminación de dióxido de carbono, ácido sulfúrico, siloxanos y especies orgánicas halogenadas, pueden ser:

- Absorción física: Requiere poca complejidad e inversión; el proceso es contra corriente, comprimiendo el biogás crudo y rociando agua presurizada desde la cima de la columna (Ortega, Rodríguez, Fernández, & Bárcenas, 2015).
- Separación por membranas: Debe existir una alta permeabilidad para garantizar alta purificación del metano (Varnero, Carú, Galleguillos, & Achondo, 2012).
- Separación criogénica: Este proceso implica la condensación fraccionadas y destilaciones a bajas temperaturas para lograr la separación, el biogás es comprimido en múltiples etapas, y luego secado (Morero, Gropelli, & Campanella, 2010).
- Método de conversión química: Este proceso se emplea después de la remoción de otros métodos; resulta costoso (Morero, Gropelli, & Campanella, 2010).
- Procesos de oxidación: Cuando el H₂S se presenta en bajas concentraciones se utiliza el tratamiento de gases en fase líquida (Ortega Viera, Rodríguez Muñoz, Fernández Santana, & Bárcenas Pérez, 2015).

En resumen, en la Tabla 6 se comparan los contaminantes que deben ser eliminados del biogás.

Tabla 6. Tratamiento de purificación del biogás

Finalidad	H ₂ S	CO ₂	Agua	Siloxanos	Compuesto halogenados
Caldera de vapor	√	X	X	√√	X
Motores de cogeneración	√√	X	√√	√√	√√
Microturbinas	√	X	√√	√√	√√
Producción de H ₂ /Metanol	√√	X	√√	√√	√√
Combustible para vehículos	√√	√√	√√	√√	√√
Inyección en la red de gas natural	√√	√√	√√	√√	√√

Nota: √ Eliminación recomendable √√ eliminación necesaria X Eliminación no necesaria

Fuente: Condorchem Envitech, (2017)

Modelos matemáticos para determinación de la generación de biogás

Existen muchos modelos para la estimación de generación de biogás, los cuales se resumen en la Tabla 7:

Tabla 7. Modelos matemáticos para la generación de biogás

Modelo	Ecuación
Modelo de orden cero: la generación de biogás es constante en el tiempo. La edad de los residuos no está incluida en el modelo.	$Q = \frac{M \cdot L_0}{(t_i - t_f)}$ Swana, 1997
Modelo de primer orden: la generación de biogás decrece exponencialmente.	$Q = M \cdot L_0 \cdot k \cdot e^{-k(t-t_i)}$ Donk y Boom 1995
Modelo modificado de primer orden: se considera un tiempo de desfase en la generación de metano. Inicia lentamente para luego crecer hacia un pico que decrece exponencialmente, como en el modelo de primer orden.	$Q = M \cdot L_0 \frac{k + s}{s} \cdot (1 - e^{-s(t-t_i)})(k e^{-k(t-t_i)})$ Swana, 1998

<p>Modelo multifase de primer orden: se consideran diferentes fracciones de residuos y distintas tasas de producción.</p>	$Q = M \cdot L_0 \cdot [F_R(k_R \cdot e^{-k_R(t-t_i)}) + F_M(k_M e^{-k_M(t-t_i)}) + F_S(k_S e^{-k_S(t-t_i)})]$ <p>Scharf y Jacobs, 2006</p>
<p>Modelos de segundo orden: describen las complejas reacciones que ocurren durante la degradación de los residuos, a partir de las reacciones de primer orden con diferentes tasas.</p>	$Q = M \cdot k \left(\frac{L_0}{kL_0t + 1} \right)^2$ <p>Donk y Boom 1995</p>

Fuente: Rodrigo (2016) BIOLEACH: un modelo matemático para la evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de RSU.

El programa Methane to Markets (M2M), propuso el Modelo colombiano de Biogás diseñado por el programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la Agencia para la Protección del Ambiente de los EEUU, con el fin de brindar a operadores y propietarios de rellenos sanitarios una herramienta para evaluar la viabilidad de proyectos de generación de biogás en estos sitios. Este modelo estima la generación de biogás usando la ecuación de degradación de primer grado, modificada con el modelo LandGEM:

$$Q_{LFG} = \sum_{t=0}^n \sum_{j=0.1}^1 2kL_0 \left[\frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}})(MCF)(F) \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde Q_{LFG} = Flujo de biogás máximo esperado (m³/año)

- i = Incremento en tiempo de 1 año
- n = (año del cálculo) – (año inicial de disposición de residuos)
- j = Incremento de tiempo en 0.1 años
- k = Índice de generación de metano (1/año)
- L₀ = Generación potencial de metano (m³/Mg)

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

- M_i = Masa de residuos dispuestos en el año i (Mg)
- t_{ij} = Edad de las secciones j de la masa de residuos dispuestas en el año i (años decimales)
- MCF = Factor de corrección de metano
- F = Factor de ajuste por incendios

Mientras que para el sector rural debe considerarse el cultivo principal de la zona donde se implemente el biodigestor, de tal forma que para aprovechar la energía de la biomasa agrícola (Bhattacharya *et al.*, 2005) se recomienda la ecuación 2 para calcular la biomasa seca del residuo; y la ecuación 3 para calcular el potencial energético global:

$$M_{rs} = A * R_c * M_{rg} * Y_{rs} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

- M_{rs} : Masa de residuo seco [t/año]
- A : Área cultivada [ha/año]
- R_c : Rendimiento del cultivo [t producto principal / ha sembrada]
- M_{rg} : Masa de residuo generada del cultivo [t de residuo/ t de producto principal]
- Y_{rs} : Fracción de residuo seco [t residuo seco/t de residuo húmedo]

$$PE_{brae} = \infty * A * RC * \sum_{i=1}^n * \sum_{k=1}^m * M_{rgki} * Y_{rski} * PCI_{ki} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Por su parte, según el último inventario nacional de gases de efecto invernadero la emisión total presenta un incremento del 2 % promedio anual durante el periodo reportado, influenciado principalmente por el aumento de la participación de la categoría de eliminación de desechos sólidos, la cual al final del periodo representa el 45 % de las emisiones de este grupo; establecen también que la principal fuente de emisión es la descomposición orgánica en los sitios de disposición de residuos sólidos (Ideam - Pnud, 2016). Así mismo, según Demirel & Scherer (2008) el comportamiento de las bacterias en la fase metanogénica, acetanogénica e hidrólisis, se ven afectadas por las condiciones ambientales; al respecto, el Ministerio de ambiente diseñó una calculadora de Carbono 2050, herramienta que permite planear y tomar decisiones relacionados con la reducción de emisiones de efecto invernadero y fomentar el uso de energías renovables; determinando el clima cálido, tal cual se observa en la Tabla 8, como el escenario ideal para el factor de producción de biogás con mayor rendimiento (Minambiente, 2017).

Tabla 8. Producción de biogás por zona climática

Zona	M ³ /año/tonelada
Cálido	64,04
Frío	14,31
Templado	63,43

Fuente: MinAmbiente (2017) Calculadora Colombiana de Carbono 2050

Propuesta metodológica para la implementación de biodigestores en la zona norte de Colombia

En el diseño de biodigestores anaerobios se debe tener en cuenta los parámetros y condiciones del lugar donde será instalado. A continuación, se describen los factores necesarios para un biodigestor tipo tubular y los criterios para el cálculo de cada parámetro.

- Carga de mezcla diaria de entrada: La mezcla requiere una porción de estiércol por cuatro de agua, ya que en este tipo de biodigestores debe evitarse la formación de natas, por lo tanto, se diluye para asegurar un flujo continuo Olaya, y. (2009). El volumen de carga diaria se establece en caso de estiércol de animales, según la cantidad de los mismos.
- Cálculo de sólidos totales: Corresponde a la proporción de un kilogramo de estiércol por el porcentaje de sólidos totales de estiércol fresco entre un kilogramo de estiércol fresco más el agua agregada, tal como lo indica la ecuación 4:

$$ST = \frac{1 \text{ kg excretas} * \%ST \text{ excretas frescas}}{1 \text{ kg excretas frescas} + \text{agua agregada}} \quad \text{Ecuación 4}$$

- » Volumen total del biodigestor: Dentro del biodigestor se distribuye una parte líquida (3/4) y una porción gaseosa (1/4); teniendo en cuenta las ecuaciones 5 y 6.

$$V_t = V_l + V_g \quad \text{Ecuación 5}$$

$$V_l = V_t * 0.75 \quad \text{Ecuación 6}$$

- » El volumen de gas CH₄: Se calcula a partir de la ecuación 7:

$$\frac{\text{Volumen de gas } CH_4}{\text{Kg de desecho}} = \frac{\%ST}{100} * \frac{\%SV}{100} * \frac{m^3 \text{ biogás}}{\text{Kg}} * \%CH_4 \quad \text{Ecuación 7}$$

- Temperatura y tiempo de retención: La región Norte se caracteriza por una temperatura promedio de 30°C. El tiempo de retención hidráulica corresponde como se muestra en la ecuación 8, a la proporción entre el volumen del digestor y el volumen diario de la carga Torre Caritos, N.D.I. (2008).

$$TRH = \frac{\text{Volumen del digestor}}{\text{Volumen diario de carga}} \quad \text{Ecuación 8}$$

- » Localización y ubicación del biodigestor: El lugar donde se desee ubicar el digestor debe estar cercano a una fuente permanente de agua y donde se arrojen los desechos de humanos y animales; de tal forma que sea fácil y económico el traslado de estos hasta la entrada del biodigestor, a través de tuberías. Se proyectará la salida del biodigestor de manera estratégica para fertilizar los cultivos.

Cálculo del diámetro de la estructura tubular:

$$diámetro = \frac{circunferencia}{Pi}$$

Cálculo de la capacidad total del biodigestor:

$$Volumen\ del\ cilindro = Pi \times Radio^2 \times longitud$$

$$Fase\ líquida = 75\% \quad Depósito\ para\ el\ biogás = 25\%$$

Es así como para determinar los contenidos de humedad, sólidos volátiles y cenizas en diferentes sustratos y teniendo en cuenta las ecuaciones anteriormente descritas, se utilizaron en la Tabla 9 los datos bibliográficos seleccionados para visualizar el comportamiento de cada uno de ellos, Considerando MS1: estiércol, MS2: granja avícola; MS3: rastro municipal; para el cálculo de la masa de sólidos volátiles se resta de la masa seca el valor de la masa de cenizas; para el porcentaje del contenido en la masa $M_{rsv} = M_{sv}/M_s \times 100 \%$ y $M_{rc} \% = M_c / M_s \times 100$ (Bautista, 2010).

Tabla 9. Parámetros de sustratos

Parámetros/Muestra de Masa seca	MS1	MS2	MS3
Masa seca(g)	100000	100000	100000
Sólidos volátiles(g)	79680	78740	80720
Cenizas(g)	20320	21260	19280
Porcentaje de sólidos volátiles	79,68 %	78,74 %	80,72 %
Porcentaje de cenizas	20,32 %	21,26 %	19,28 %

Fuente: Mojica, Vidal, Rueda, Acosta (2016). Estudio de las características físico-químicas de residuos orgánicos para su uso

Teniendo en cuenta la literatura revisada se comparan dos sustratos como producción de biogás proyectados a 10 años, tal como se muestra en la Tabla 10, tanto para estiércol de cerdo más pulpa de yuca y el estiércol de vaca más residuos de comida.

Tabla 10. Proyección producción de biogás y metano con dos sustratos

Sustrato	Estiércol de cerdo + pulpa de yuca (1:4)		Estiércol de vaca + residuos de comida	
	biogás	CH4	biogás	CH4
L/L *d	0.59	0.33	1.69	1.53
Año 1	215	120.45	617	558.45
Año 2	431	240.9	1234	1116.9
Año 3	646	0.99	1851	1675.35
Año 4	861	1.32	2467	2233.8
Año 5	1077	1.65	3084	2792.25
Año 6	1292	1.98	3701	3350.7
Año 7	1507	2.31	4318	3909.15
Año 8	1723	2.64	4935	4467.6
Año 9	1938	2.97	5552	5026.05
Año 10	2154	3.3	6169	5584.5

Nota: González, (2017). Sustratos y producción de biogás en biodigestores. Una revisión sistemática

Por otra parte, para un biodigestor tipo cúpula flotante se requieren los datos relacionados en la Tabla 11 con el fin de determinar sus dimensiones para los parámetros 1, 2 y 3 (Martí Herrero, 2008) y para los otros (Martínez, Cruz, 2015).

Tabla 11. Parámetros de diseño de un biodigestor tipo hindú

Parámetro	Ecuación
1. Rendimiento biogás /día	$B = m^3 \text{ biogás/día}$
2. Relación volumen biogás diario por volumen del digestor	$R = \frac{m^3 \text{ biogás/día}}{m^3 \text{ digestor}}$
3. Volumen del digestor (m^3)	$V = \frac{B}{R} \text{ ó } Vd = (Kg_{residuos} + Kg_{agua}) * t_r$
4. Volumen de la cámara de fermentación	$V_{cf} = V_d * (0,75 \sim 0,80), m^3$
5. Altura de la cámara de fermentación (h_{cf})	$h_{cf} = \sqrt[3]{\frac{4V_{cf}}{\pi X^2}}$
6. Diámetro cámara de fermentación	$d_{cf} = \sqrt[3]{\frac{4V_{cf}}{\pi h_{cf}}}$
7. Radio de cámara de fermentación	$r_{cf} = \frac{d_{cf}}{2}$
8. Radio de la cúpula	$r_c = \sqrt{h_{cf}^2 + r_{cf}^2}$
9. Volumen de la cúpula	$V_c = V_d (0,2 \sim 0,25), m^3 \quad V_c = \pi h_c \left(\frac{d_{cf}^2}{8} + \frac{h_c^2}{6} \right)$
10. Volumen total del digestor	$V_d = V_{cf} + V_c$

Fuente: Rodrigo, (2016) BIOLEACH: un modelo matemático para la evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de RSU

Para efectos de simular la capacidad de un digestor tipo cúpula flotante se realiza el siguiente ejemplo descrito en la Tabla 12:

Tabla 12. Ejemplo capacidad digestor cúpula

Kg diario	160
Cantidad de animales	16
Relación 1:4	4
TRH	25
Volumen diario	20 m^3
Volumen cámara de fermentación	15 ~ 16 m^3
Volumen de la cúpula	4 ~ 5 m^3
volumen total del digestor	19 ~ 21 m^3

MARCO NORMATIVO Y LEGAL

El Ministerio de Vivienda en uno de sus últimos informes establece el marco normativo aplicable a la gestión integral de residuos sólidos (Minvivienda, 2015); de las cuáles para la sustentación de este trabajo se utilizaron las siguientes:

Ley 1715 de 2014. El objetivo de esta norma es incentivar la producción, autogeneración y uso de energía renovable; así como la gestión eficiente de la misma; esta normativa denomina las FNCER, como las fuentes no convencionales de energías renovables; dentro de las cuales se encuentra la energía de la biomasa: producto de la degradación de cualquier tipo de materia orgánica de forma espontánea o provocada, originada como consecuencia de un proceso biológico o por el proceso de fotosíntesis en el material vegetal, así como de los procesos metabólicos de los organismos heterótrofos, siempre y cuando no hayan tenido contacto con productos tóxicos y representen algún grado de peligrosidad (Congreso de Colombia, 2014).

60

Así mismo, se establecen los incentivos o beneficios que obtendrían las empresas que desarrollen estas tecnologías; agrupándolos en descuentos en declaraciones de renta, exclusión de IVA en compra de equipos, no pago de aranceles en importación de maquinarias, materiales o insumos y la depreciación acelerada de los mismos. Para tal efecto, establecen como entidades públicas responsables de la integración de este tipo de proyectos a los municipios, al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), las Corporaciones autónomas regionales (CAR), el Ministerio de Minas y Energía, La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Ministerio de Hacienda y Crédito Público, Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA). Indica así mismo, que las CAR están obligadas a dictar mecanismos de fomento para la realización de planes que incorporen la aplicación energética de residuos. En cuanto al artículo 18, establece que estas entidades en conjunto deben reglamentar normas técnicas para definir los parámetros de calidad que deben cumplir los combustibles sólidos.

De acuerdo con la resolución de la CREG 202 de 2013, se permite en sectores rurales la financiación de proyectos con o sin tarifa aprobada que no sea parte de expandir empresas. Para proyectos con biogás podrían aplicar a este tipo de fondos evaluando su factibilidad en la prestación de servicios energéticos aplicables a entidades como el Fondo Especial Cuota de Fomento “FECF” y el Sistema General de Regalías “SGR” (UPME, 2015).

Corporaciones Autónomas Regionales (CAR). La Ley 99 de 1993 asume las CAR como “entes corporativos de carácter público, creados por la ley, integrados por las entidades territoriales que por sus características constituyen geográficamente un mismo ecosistema o conforman una unidad geopolítica, biogeográfica o hidrogeográfica, dotados de autonomía administrativa y financiera, patrimonio propio y personería jurídica, encargados por la ley de administrar, dentro del área de su jurisdicción, el medioambiente y los recursos naturales renovables y propender por su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales y las políticas del Ministerio del Medio Ambiente” (Congreso de Colombia, 1993, art. 23). Establece esta norma la forma de constitución y sus funciones, entre las cuales se destacan en el artículo 31:

1. Ejecutar las políticas, planes y programas nacionales en materia ambiental definidos por la ley aprobatoria del Plan Nacional de Desarrollo y del Plan Nacional de Inversiones o por el Ministerio del Medio Ambiente, así como los del orden regional que le hayan sido confiados conforme a la ley, dentro del ámbito de su jurisdicción.

4. Coordinar el proceso de preparación de los planes, programas y proyectos de desarrollo medioambiental que deban formular los diferentes organismos y entidades integrantes del Sistema Nacional Ambiental (SINA) en el área de su jurisdicción y en especial, asesorar a los Departamentos, Distritos y Municipios de su comprensión territorial en la definición de los planes de desarrollo ambiental y en sus programas y proyectos en materia de protección del medioambiente y los recursos naturales renovables... .

7. Promover y realizar conjuntamente con los organismos nacionales adscritos y vinculados al Ministerio de Medio Ambiente, y con las entidades de apoyo técnico y científico del Sistema Nacional Ambiental (SINA), estudios e investigaciones en materia de medioambiente y recursos naturales renovables.

Para tal efecto, toda CAR deberá realizar el análisis integral de los componentes socioeconómicos y culturales además del estado de los recursos naturales renovables consolidados en un diagnóstico ambiental de la región bajo su jurisdicción; se deben considerar tanto las relaciones urbano-rurales y regionales como las dinámicas entre la oferta y la demanda de bienes y servicios ambientales. Este deberá incluir indicadores de gestión, ambientales y de impacto (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2006); por otra parte, para gestionar la planificación ambiental regional, el Estado colombiano determinó con el Decreto 1200 de 2004, instrumentos de planificación ambiental, tales como:

- Plan de Gestión Ambiental Regional. Este tendrá una vigencia de mínimo 10 años y permite a las Corporaciones Autónomas Regionales para el área de su jurisdicción, determinando las acciones que involucren a todos los actores regionales con el fin de garantizar el avance hacia la sostenibilidad de las regiones.
- Plan De Acción Trienal –Pat. Es el instrumento proyectado a 3 años en el cual se establece un compromiso institucional de las Corporaciones Autónomas Regionales para lograr las metas y objetivos establecidos en el Plan de Gestión Ambiental Regional; para esto se definen acciones e inversiones que se ejecutarán en el área de su jurisdicción.

Las Corporaciones Autónomas Regionales deben realizar una priorización de las acciones y metas a determinar en los periodos de tiempo planeados en cada instrumento; para, ello, se deben considerar las directrices de alta relevancia a nivel

nacional y regional, consolidadas en los documentos emitidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007).

PGIRS. Los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos son instrumentos que le Permiten a los municipios desarrollar programas sostenibles para el aprovechamiento de los residuos sólidos. De conformidad con el artículo 88 del Decreto 2981 de 2013, los programas y proyectos adoptados en el PGIRS deben incorporarse en los planes de desarrollo municipales o distritales y asignar los recursos correspondientes para su implementación dentro de los presupuestos anuales municipales o distritales. En el caso de PGIRS regionales de un área metropolitana, los programas y proyectos adoptados deberán incorporarse en el plan integral de desarrollo metropolitano. Corresponde a la entidad territorial la formulación, implementación, evaluación, seguimiento y control y actualización del PGIRS (Presidencia de la República de Colombia, 2013).

A través de la Resolución 754 de 2014 se adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de gestión Integral de Residuos Sólidos. En sus artículos 6, 7 y 8 establece la articulación de los PGIRSa las empresas de aseo, planes de desarrollo municipales o distritales, planes o esquemas de ordenamiento territorial.

El Decreto 298 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016) establece el funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático en el que específicamente se abarca el tema del aprovechamiento de los sitios de disposición final de residuos sólidos para la generación de biogás; en el marco de la Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono: se desarrollaron los planes de Acción Sectorial de mitigación (PASm), se evaluó la viabilidad para rellenos sanitarios con más de 100.000 ton/año, cifra que habilita a 8 de los 9 departamentos categorizados dentro de la región Norte colombiana, para la implementación de proyectos de biodigestores

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

anaerobios. Se destaca también como metas de este proyecto promover esquemas regionales para el aprovechamiento de los residuos y la estructuración de esquemas de responsabilidad extendida (Minambiente, 2015).

Así también, el plan de acción sectorial de mitigación de gases de efecto invernadero agropecuario, establece la necesidad de incrementar el uso de biocombustibles, ya sea por desconocimiento de las opciones o por sus prácticas tradicionales imperativas. Se prioriza en este plan el aumento en el aprovechamiento de estas tecnologías.

3. CONSTRUCTO METODOLÓGICO

Esta investigación se basa en un modelo o método descriptivo de tipo documental, dada la intención de analizar la información disponible para la implementación de proyectos tipo biodigestores con residuos sólidos en la zona Norte colombiana comparado con la zona Central. Este tipo de investigación es la más adecuada, ya que se hace necesario apoyarse en las fuentes de carácter normativo como Decretos, Leyes, entre otros. De igual manera, se utiliza el método de análisis señalando características propias del manejo integral de residuos sólidos orgánicos en cada región objeto de este estudio.

Este tipo de investigación permitirá tener claridad en temas relacionados con el uso de biodigestores para el tratamiento de residuos sólidos buscando construir un marco teórico en una temática recientemente priorizada en Colombia. De igual manera, se establecen variables de investigación con el fin de evaluar las características de las zonas objetos de estudio (Norte y Central).

- Área de estudio. Los departamentos objetos de estudio en este trabajo corresponden a los sectorizados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en su Programa Regional de Negocios Verdes (Minambiente, 2014), la cual es el perfil de estudio del Estado Colombiano en cuanto a

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

producción de biomasa. Para cada zona se identificaron, según la Tabla 13, las autoridades ambientales de la región que tienen jurisdicción en los departamentos mencionados.

Tabla 13. Corporaciones Autónomas responsables por departamento

Región	Departamento	Nombre de la Corporación Responsable	Sigla
Norte	Atlántico	Corporación Autónoma Regional del Atlántico	(CRA)
	Bolívar	Corporación Autónoma Regional del Canal del Dique	(CARDIQUE)
	Cesar	Corporación Autónoma Regional del Cesar	(CORPOCESAR)
	Córdoba	Corporación Autónoma y Regional de los Valles del Sinú y del San Jorge	(CVS)
	La Guajira	Corporación Autónoma Regional de La Guajira	(CORPOGUAJIRA)
	Magdalena	Corporación Autónoma Regional del Magdalena	(CORPAMAG)
	Norte de Santander	Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental	(CORPONOR)
	San Andrés	Corporación para el Desarrollo Sostenible del Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina	(CORALINA)
	Sucre	Corporación Autónoma Regional de Sucre	(CARSUCRE)
Central	Antioquia	Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia	(CORANTIOQUIA)
	Boyacá	Corporación Autónoma Regional de Boyacá	(CORPOBOYACÁ)
	Caldas	Corporación Autónoma Regional de Caldas	(CORPOCALDAS)
	Cundinamarca	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca	(CAR)
	Huila	Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena	(CAM)
	Quindío	Corporación Autónoma Regional del Quindío	(CRQ)
	Risaralda	Corporación Autónoma Regional de Risaralda	(CARDER)
	Santander	Corporación Autónoma Regional de Santander	(CAS)
	Tolima	Corporación Autónoma Regional del Tolima	(CORTOLIMA)

Fuente: Elaboración propia

FASES DE DESARROLLO METODOLÓGICO

La propuesta metodológica se definió desde la selección del biodigestor y el tipo de biomasa disponible, desglosada en las fases que se indican en la Figura 16.

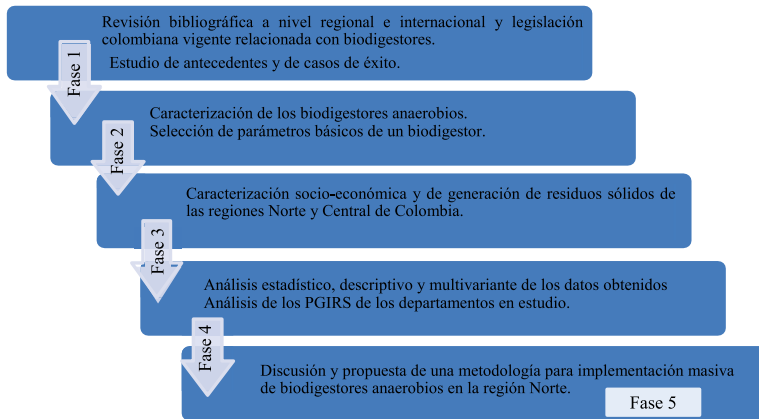


Figura 16. Fases del trabajo investigativo

Fuente: Elaboración propia

- Fase 1. Revisión bibliográfica a nivel regional e internacional y legislación colombiana vigente relacionada con biodigestores, estudio de antecedentes y de casos de éxito. En esta se recopiló la normatividad vigente para el manejo integral de residuos sólidos en Colombia y para el uso de biodigestores como posibles generadores de energía y gas natural; así mismo se investigaron casos de éxito a nivel nacional, internacional y local.
- Fase 2. Caracterización de los biodigestores anaerobios y selección, de parámetros básicos de un biodigestor. En esta sección según la revisión bibliográfica realizada, se determinaron los parámetros básicos para el buen funcionamiento de un biodigestor anaerobio, seleccionando el ideal para el tratamiento de residuos sólidos agrícolas y orgánicos.

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

- Fase 3. Caracterización socio-económica y de generación de residuos sólidos de las regiones Norte y Central de Colombia. Teniendo en cuenta las fichas de caracterización nacional presentadas por el Departamento Nacional de Planeación (2016), se establecieron como variables de estudio para el análisis socio-económico de cada departamento, en ambas regiones.

Se agrupan las variables de las Tablas estadísticas en cuatro categorías dependiendo de los parámetros a evaluar, así:

- Relación demográfica: Cantidad de habitantes, extensión, PIB *per cápita*, cantidad de municipios y cantidad de PGIRS vinculados al plan de acción.
- Residuos Sólidos generados: Cantidad de residuos sólidos generados Ton/día, porcentaje de residuos sólidos, porcentaje de residuos dispuestos en los rellenos sanitarios, porcentaje de disposición final inadecuada, porcentaje disposición final autorizada.
- Tipo de disposición final de los residuos: Cantidad de rellenos sanitarios, cantidad de botaderos a cielo abierto, cantidad de celdas transitorias, cantidad de cuerpos de aguas, cantidad de celda de contingencia, cantidad quemada a cielo abierto, cantidad plantas de aprovechamiento.
- PGIRS actualizados: Líneas priorizadas en el plan de acción departamental, cantidad de proyectos viabilizados.
- Emisiones de Gases de Efecto Invernadero, porcentaje y CO₂ equivalente.

Por otra parte, para los datos correspondientes al sector agrícola se tuvieron en cuenta los inventarios del Departamento Nacional de Estadística (DANE), según su

Encuesta Nacional Agropecuaria (2016). Así mismo, para la investigación de tipo cualitativo se utilizaron técnicas, como observación, análisis e interpretación de datos estadísticos encontrados en los documentos descargados de sitios web autorizados de las entidades mencionadas y otros como la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS).

- Fase 4. Análisis estadístico, descriptivo y multivariante de los datos obtenidos y Análisis de los PGIRS de los departamentos en estudio. A través de la revisión bibliográfica de los planes de gestión integral de residuos sólidos municipales, los planes de desarrollo territorial y páginas web de entidades gubernamentales relacionadas con el tema en estudio, se realizó una lista de chequeo y una síntesis del alcance de implementación y proyección de biodigestores anaerobios en cada departamento, las recolecciones de los datos de las variables mencionadas en la fase anterior se tuvieron en cuenta.

De lo anterior expuesto, la tabulación y el análisis de los resultados se presentaron a través de gráficos que ayudan a la interpretación de los datos obtenidos en las etapas anteriores; de acuerdo a esto y gracias a la herramienta *Statgraphics*, se realizó el análisis estadístico, descriptivo y multivariante, y se definieron los factores determinantes en la priorización de proyectos tipo biodigestor para aprovechamiento de los residuos sólidos generados en los departamentos focos del estudio.

- Fase 5. Discusión y propuesta de una metodología para implementación masiva de biodigestores anaerobios en la región Norte. Por último, se propuso una metodología para la implementación de biodigestores anaerobios en la región norte de Colombia, teniendo en cuenta cuatro factores: cultural, técnico-ambiental, económico, y por último legal y político; cada uno dividido en Figuras tipo procesos que se identifican

como conceptos central que corresponde a la acción a ejecutar, con una entrada en la parte izquierda, en la parte superior la legislación vigente relacionada, en la parte inferior de la Figura las entidades responsables y los recursos necesarios, para terminar con una salida o meta a cumplir.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS DESCRIPTIVO Y DISCUSIÓN DE LA INFORMACIÓN

Proyectos relacionados con biodigestores

En la plataforma Sistema de Gestión y Conocimiento en Fuentes No Convencionales de Energía Renovable en Colombia (SGI&C-FNCER-2015), se encuentran los proyectos que se detallan en la Tabla 14 y que pone a la vista la situación actual del país respecto a la intención de implementar proyectos que generen energías limpias:

Tabla 14. Total proyectos relacionados con biodigestores en Colombia

Proyecto	Tipo de proyecto	Estado	Tecnología	Ejecutor	Iniciativa	Dpto	Propósito
Biodigestores a escala de 50 a 1000 litros	Investigación y desarrollo	En desarrollo (1)	Biodigestor fermentación	Universidad minuto de dios soacha	Privada	Bogotá	Biocombustibles Generación Eléctrica
Generación de energía a partir de la biomasa obtenida de la extracción de aceite de palma en las plantas de beneficio de palma de aceite	Comercial	En planeación (1)	Biodigestor, caldera, turbina de gas	Plantas de beneficio de palma de aceite	Mixta	Bogotá	Generación eléctrica, producción de calor
Biogas en producción lechera	Comercial	En planeación (1)	Biodigestor	Javier Diaz	Privada	Bogotá	Generación eléctrica
Biogás Doña Juana s.a. E.s.p	Comercial	En ejecución (2)	Biodigestor	Proactiva Colombia	Mixta	Bogotá	Extracción tratamiento y aprovechamiento del biogás
Asociación de productores indígenas y campesinos (Asproinca)	Comercial	En ejecución (3)	Biodigestor	Asproinca	Privada	Caldas	Generación eléctrica
Sistema de captura y combustión de biogás, en los rellenos sanitarios curva de rodas y la pradera del área metropolitana del Valle de Aburrá.	Comercial	En desarrollo (4)	Biodigestor	Empresas varias de Medellín s.a. E.s.p, universidad de Antioquia	Mixta	Antioquia	Generación eléctrica

Fuente: 1 Sistema de Gestión de información y Conocimiento en Fuentes No Convencionales de Energía Renovable en Colombia SGI&C –FNCER, 2015. 2 Proactiva Colombia-Veolia, 2017. 3 Asproinca, 2016. 4 Empresas Varias de Medellín S.A. ESP, 2015

Parametrización básica de biodigestores anaerobios

El proceso de biodigestión requiere ciertas características fundamentales a tener en cuenta, tales como: ubicación y tamaño, composición de la biomasa, temperatura, continuidad de producción, uso que pretenda dársele, cogeneración de calor, incluyendo la eliminación de agua y otras partículas inherentes al proceso (Gabriel, & Sierra, 2017). Así también, es primordial el nivel de pH, los sustratos y nutrientes, el nitrógeno es fundamental para la actividad de las bacterias (Guerrero, Pérez, &

Cometta, 2015). La información contenida en la Tabla 15, muestra los datos comparativos de parámetros básicos en las regiones de estudio.

Tabla 15. Datos comparativos regiones Norte y Central

Factor	Óptima para biodigestión	Región Norte	Región Central
Temperatura	30°-35°	27°-34°C	10°-24°C
pH	6.7-7.5	>7	<7
Disponibilidad Nutrientes	Proporcional a la cantidad de biomasa	1624 ton/día	547,5 ton/día
Presión atmosférica y Humedad	50-60	Clima tropical con precipitaciones concentradas entre mayo y noviembre.	En general presenta dos estaciones húmedas (de abril a junio y de septiembre a noviembre) y dos secas (de diciembre a marzo y julio y agosto) y una amplia variación de las temperaturas en función de la altitud.

Nota: Fuente: Elaboración propia

Ha de considerarse la temperatura ambiente para el potencial de generación de biogás, lo cual resulta beneficioso en la región Caribe. En cuanto a la disponibilidad de nutrientes es evidente que la cantidad de residuos sólidos en rellenos sanitarios en la región Central duplica a la región Norte (DNP, 2016).

En cuanto a las características de los biodigestores anaerobios, los más utilizados se caracterizan en la Tabla 16, donde se especifican las ventajas y desventajas de algunas tecnologías existentes en biodigestores anaerobios.

Existen muchas descripciones y clasificaciones de los biodigestores, para efectos de este estudio se toman los siguientes por su uso a nivel mundial.

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS
reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

Tabla 16. Comparación de tecnologías para biodigestores

Diseño / criterio	Digestor cúpula flotante (1)	Digestor cúpula flotante de película acuosa (1)	Digestor de cúpula fija (1)	Digestor estérilico (1)	Digestor tubular (2)
Principio de diseño	Alimentación continua, digestor mixto	Alimentación continua, digestor mixto	Alimentación continua, digestor mixto con almacenaje de biol	Alimentación continua, canal de fermentación	Alimentación semicontinua, canal de fermentación
Componentes principales: digestor/almacén de gas	Digestor construido, almacenaje de gas en tambor flotante metálico	Digestor construido, almacenaje de gas en tambor flotante metálico, en película acuosa separada	Digestor construido, con fosa excavada	Digestor y almacenaje de gas integrados, de material plástico	Estructura flexible construida a base de polietileno
Sustratos más adecuados	Estiércol animal, con o sin residuos vegetales	Estiércol animal, con o sin residuos vegetales	Estiércol animal más residuos vegetales	Estiércol animal, solamente	Estiércol animal con o sin residuos vegetales
Vida útil prevista	8-12 años	10-15 años	12-20 años	2-5 años	3-8 años
Volumen del digestor	6-100 m ³	6-100 m ³	6-20 m ³	4-100 m ³	5-100 m ³
Conveniencia					
Ventajas	Fácil construcción y operación, presión uniforme de gas, tecnología madura	Muy fiable, fácil construcción y operación, presión uniforme de gas, vida útil larga, tecnología madura	Coste de construcción bajo, vida útil larga, buen aislamiento	Construcción prefabricada, fácil operación	Menor costo de construcción y operación
Desventajas	La cúpula de metal puede oxidarse	Coste elevado	Aislamiento de la parte superior de almacenaje de gas fluctuación de la presión de gas	No se construye in-situ, vida útil corta (2-5 años) de material plástico, producción de gas baja	Baja presión de gas, vida útil corta, el material plástico está sujeto a daños por la exposición
Todas las plantas precisan de un control rutinario y cuidadoso de los almacenajes del biogás					

Operación y mantenimiento	Simple y sencillo, necesidad de pintar regularmente la cúpula de gas	Simple y sencillo, necesidad de pintar regularmente la cúpula de gas	Simple y sencillo, necesidad de pintar regularmente la cúpula de gas	Fácil después de una cuidadosa familiarización con la planta	Fácil, control regular de los pesos de presión del gas	Fácil, puede instalarse en la comunidad con poco dominio en el tema
Producción diaria de gas	0.3-0.6	0.3-0.6	0.3-0.6	0.2-0.5	0.3-0.8	0.2-1
En m de gas por m de volumen de digestión. Depende del sustrato, aquí estiércol vacuno						
Elementos costosos	La cúpula metálica de gas, el digestor	La cúpula metálica de gas, el digestor	La cúpula metálica de gas, el digestor	La combinación de digestor y acumulador de gas, la excavación	La loma de plástico	PVC o geomembrana
Factor de comparación	100	120	120	60-90	20-110	
Usos recomendados	Muy desarrollado, fiable en tamaños familiares	Igual que cúpula flotante, más una vida útil más larga y una mayor fiabilidad operacional	Igual que cúpula flotante, más una vida útil más larga y una mayor fiabilidad operacional	Equipo no muy caro, bueno para residuos agrícolas, construcción cara, con experiencia necesaria	Para plantas de gran escala o soluciones rápidas	Para sitios donde predominan las temperaturas altas y constantes
Adecuado para la promoción	+	++	++	+	o	

++ muy recomendable, + recomendable con ciertas observaciones, o recomendado en ciertas circunstancias

Nota: Fuente: (Jaraúta, Laura (2006) Digestión anaerobia para el tratamiento de residuos orgánicos: estudio de las necesidades para la implantación en el Perú.) (2) Olaya, Veison (2009)

Teniendo en cuenta esto se sugiere el uso de digestores tubulares para el área rural, dada su versatilidad, bajo costo, fácil instalación y capacidad para aprovechar los residuos; para los rellenos sanitarios se recomienda el domo flotante ya que maneja altos volúmenes, y es muy fiable; siguiendo la bibliografía citada en este proyecto para la estimación de los mismos (Ver Tabla 6 y Tabla 10).

Caracterización Socioeconómica y de Gestión de Residuos de las Regiones Norte y Central de Colombia

Teniendo en cuenta los datos obtenidos de las consultas realizadas en las fichas de caracterización territorial (actualizadas hasta el año 2016) por el DNP; soportadas en los datos estadísticos emitidos por el DANE; también se obtuvieron datos de los planes de desarrollo de cada departamento y de los informes de los programas regionales de negocios verdes publicados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, así como del informe generado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, se agruparon las variables según los rasgos afines discriminados así:

- Cultivos. Se especifica en la Tabla 17, según el Departamento Nacional de Planeación (2016) los cultivos más importantes de cada departamento.

Tabla 17. Cultivos por departamentos

Zona	Departamento	Cultivos
Región Central	Antioquia	café, cacao, caucho, caña, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, papa, otros tubérculos, arroz, maíz, arveja, cebolla, frijol, tomate, zanahoria, otras legumbres, banano, limón, mandarina, naranja, aguacate, granadilla, guanábana, guayaba, lulo, mango, maracuyá, mora, tomate de árbol, otros frutales,
	Boyacá	café, cacao, caña, tabaco, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, papa, otros tubérculos, arroz, maíz, cebada y otros cereales, arveja, cebolla, frijol, haba, tomate, zanahoria., hortalizas, otras legumbres, banano, limón, mandarina, naranja, aguacate, granadilla, guayaba, lulo, mango, mora, pera, pitahaya, tomate de árbol, otros frutales,
	Caldas	Café, cacao, caucho, caña, plátano, yuca, papa, otros tubérculos, maíz, arveja, frijol, tomate, otras legumbres, banano, limón, mandarina, naranja, aguacate, guanábana, guayaba, lulo, maracuyá, mora, otros frutales,

Región Central	Cundinamarca	café, cacao, caña, algodón, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, papa, otros tubérculos, arroz, maíz, cebada y otros cereales, arveja, cebolla, frijol, haba, tomate, zanahoria, hortalizas, otras legumbres, banano, limón, mandarina, naranja, aguacate, granadilla, guanábana, lulo, mango, maracuyá, mora, pitahaya, tomate de árbol, otros frutales,
	Huila	café, cacao, caña, tabaco, algodón, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, otros tubérculos, arroz, maíz, arveja, frijol, tomate, otras legumbres, banano, limón, mandarina, naranja, aguacate, granadilla, lulo, maracuyá, mora, pitahaya, tomate de árbol, otros frutales,
	Quindío	café, caña, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, maíz, frijol, tomate, otras legumbres, banano, limón, mandarina, naranja, aguacate, granadilla, guayaba, otros frutales,
	Risaralda	café, cacao, caña, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, papa, otros tubérculos, maíz, arveja, cebolla, frijol, tomate, otras legumbres, banano, limón, mandarina, naranja, aguacate, granadilla, guanábana, guayaba, lulo, mora,
	Santander	café, cacao, caucho, tabaco, algodón, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, papa, otros tubérculos, arroz, maíz, cebada y otros cereales, arveja, cebolla, frijol, haba, tomate, otras legumbres, limón, mandarina, naranja, aguacate, guanábana, guayaba, lulo, mango, maracuyá, mora, pitahaya, tomate de árbol, otros frutales,
	Tolima	café, cacao, caucho, algodón, soja, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, papa, otros tubérculos, arroz, maíz, cebada y otros cereales, arveja, frijol, tomate, otras legumbres, banano, limón, naranja, aguacate, granadilla, guanábana, guayaba, lulo, mango, maracuyá, tomate de árbol, otros frutales,
Region Norte	Atlántico	caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, otros tubérculos, maíz, cebada y otros cereales, frijol, otras legumbres, limón, naranja, guanábana, guayaba, mango, otros frutales,
	Bolívar	café, cacao, caña, tabaco, algodón, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, otros tubérculos, arroz, maíz, cebada y otros cereales, frijol, otras legumbres, banano, limón, naranja, aguacate, otros frutales,
	Cesar	café, cacao, caña, algodón, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, arroz, maíz, frijol, otras legumbres, banano, limón, naranja, aguacate, mango, maracuyá, otros frutales,
	Córdoba	cacao, algodón, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, otros tubérculos, arroz, maíz, frijol, otras legumbres, naranja, guayaba, mango, otros frutales,
	La Guajira	café, cacao, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, otros tubérculos, arroz, maíz, frijol, tomate, otras legumbres, banano, mango, otros frutales,
	Magdalena	café, cacao, caña, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, otros tubérculos, arroz, maíz, frijol, otras legumbres, banano, limón, naranja, mango, otros frutales,
	Norte de Santander	café, cacao, caña, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, papa, otros tubérculos, arroz, maíz, cebada y otros cereales, arveja, cebolla, frijol, haba, zanahoria, hortalizas, otras legumbres, banano, limón, mandarina, naranja, aguacate, granadilla, guanábana, lulo, maracuyá, mora, tomate de árbol, otros frutales,
	San Andrés	n/a
	Sucre	café, cacao, caña, tabaco, algodón, caña de azúcar, palma africana, plátano, yuca, otros tubérculos, arroz, maíz, cebada y otros cereales, frijol, otras legumbres, limón, mango, maracuyá, otros frutales,

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

- Relación Demográfica. Se describe por departamento en la Tabla 18, la cantidad de habitantes (expresado en millones), la extensión en km², el total de municipios que conforman cada departamento, el número de sitios con disposición autorizada y el ingreso Producto Interno Bruto *per Cápita* en miles de pesos corriente.

Tabla 18. Relación demográfica por departamento

	REGION CENTRAL					
	DEPARTAMENTO	CANTIDAD DE HABITANTES	EXTENSIÓN	TOTAL MUNICIPIOS DPTO.	No. DE MUNICIPIOS AUTORIZADOS	PIB PER CAPITA (MILES DE PESOS CORRIENTE)
REGION CENTRAL	Antioquia	6534857	63612	125	119	15937.27
	Boyacá	1278107	23189	123	115	17437.42
	Caldas	989934	7888	27	27	11135.43
	Cundinamarca	9840818	24210	117	117	18791.84
	Huila	1168869	19890	37	37	12383.62
	Quindío	568506	1845	12	12	10076.25
	Risaralda	957254	4140	14	14	11407.81
	Santander	2071016	30537	87	79	29756.87
	Tolima	1412220	23562	47	41	11645.98
	PROMEDIO	2757953.44	22097.00	65.44	62.33	15396.94
REGION NORTE	Atlántico	2489514	3388	23	22	12282.06
	Bolívar	2121956	25978	46	17	15013.48
	Cesar	1041204	22905	25	21	13223.38
	Córdoba	1736170	25020	30	30	7765.26
	La Guajira	985452	20848	15	11	8154.66
	Magdalena	1272442	23188	30	12	7672.86
	Norte de Santander	1367708	21658	40	40	9321.91
	San Andrés	77101	44	2	2	14854.69
	Sucre	859913	10917	26	24	7233.14
	PROMEDIO	1327940.00	17105.11	26.11	19.89	10613.49

Nota: Datos obtenidos de fichas de caracterización territorial DNP (2017).

Se evidencia que la región Central posee aproximadamente el doble de habitantes que la región Norte; en la primera se encuentra el municipio de Cundinamarca donde se concentra gran parte de la población. En la Región Central 5 de los 9 departamentos tienen el 100 % de los municipios con disposición autorizada y el resto con un porcentaje mayor al 87 %, el promedio de municipios autorizados corresponde al 95 %; mientras que en la región Caribe, solo tres de los nueve municipios alcanza el 100 % y en promedio un 77 % tienen autorizado la disposición final de los residuos.

- Por Residuos Sólidos Generados. En esta categoría de variables se recopilieron las que corresponden a la gestión de cada departamento descritas en la Tabla 19 en cuanto a la disposición final de residuos sólidos se refiere; teniendo así, datos porcentualizados de los residuos sólidos generados por cada ente territorial respecto a la región a la que pertenece; la capacidad de rellenos sanitarios implementados, el porcentaje de la disposición final en sistemas inadecuados y el equivalente a la disposición final autorizada. Se pretende, entonces, establecer la correlación entre el índice de sitios autorizados comparado con el porcentaje de sitios inadecuados para disposición final de los desechos.

Tabla 19. Disposición final de los residuos sólidos

REGION	DEPARTAMENTO	TOTAL RESID SOLID TON/DIA	% RESID SOLID	% RELLE SANIT	% DISPOS. EN SISTEM INADEC	% DISPOS FINAL AUTORIZ
REGIÓN CENTRAL	Antioquia	3713	25.39	84.8	15.2	95
	Boyacá	431.8	2.95	92.48	7.52	93
	Caldas	572.8	3.92	99.23	0.77	100
	Cundinamarca	6986.8	47.77	99.3	0.7	100
	Huila	423.3	2.89	97.13	2.87	100
	Quindío	441	3.02	100	0	100
	Risaralda	416	2.84	100	0	100
	Santander	1012	6.92	96.4	3.6	91
	Tolima	628	4.29	94.4	5.6	87
	REGIÓN NORTE	Atlántico	966	19.6	97.3	2.7
Bolívar		1011	20.5	78.2	21.8	37
Cesar		414.89	8.4	83.7	16.3	84
Córdoba		630.42	12.8	67.7	32.3	100
La Guajira		299.4	6.1	3.4	96.6	73
Magdalena		478.9	9.7	90.38	9.62	40
Norte de Santander		731.4	14.8	98.7	1.29	100
San Andrés		77.25	1.6	100	0	100
Sucre		318.9	6.5	89	10.24	92

Fuente: Datos obtenidos de Disposición Final de Residuos Sólidos, Superservicios, DNP (2016)

La región Central genera un 70 % más de residuos sólidos diario en comparación con la región Norte, factor relevante a la hora de priorizar los biodigestores como proyecto de mitigación o de aprovechamiento. El porcentaje de residuos sólidos generados es directamente proporcional a la cantidad de habitantes por municipio. El número de rellenos sanitarios en la región Norte es 20 % menor al de la región

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS
 reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
 de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

Central. Así mismo, en la región Central los municipios cuentan con un 96 % de sitios autorizados para disposición final de residuos sólidos, mientras que en la región Norte en promedio los departamentos cuentan con el 80 %, resaltando condiciones críticas en Bolívar, La Guajira, y Magdalena donde solo tienen un 37 %, 73 % y 40 % de sitios autorizados respectivamente, evidenciando un problema ambiental de grandes consecuencias.

- Por tipo de disposición final. Las variables asociadas a esta categoría de análisis muestran la distribución de los residuos sólidos según las condiciones adoptadas en cada región y departamento.

Tabla 20. Tipo de disposición final de residuos sólidos

REGION	DEPARTAMENTO	No. RELL SANITA	No. BOTAD A CIELO ABIERTO	CELDA TRANSI	CUERPO DE AGUA	CELDA DE CONTING	QUEMA A CIELO ABIERTO	PLANTA DE APROV
REGION CENTRAL	Antioquia	117	5	2	1	0	0	0
	Boyacá	106	2	6	0	1	0	8
	Caldas	27	0	0	0	0	0	0
	Cundinamarca	117	0	0	0	0	0	0
	Huila	23	0	0	0	0	0	14
	Quindío	12	0	0	0	0	0	0
	Risaralda	14	0	0	0	0	0	0
	Santander	73	8	0	0	1	0	5
	Tolima	39	3	3	0	1	0	1
	PROMEDIO	86.7	2.00	1.22	0.11	0.35	0.00	3.11
REGION CARIBE	Atlántico	22	1	0	0	0	0	0
	Bolívar	16	27	0	0	1	2	0
	Cesar	21	4	0	0	0	0	0
	Córdoba	30	0	0	0	0	0	0
	La Guajira	11	1	3	0	0	0	0
	Magdalena	12	17	1	0	0	0	0
	Norte de Santander	38	0	0	0	0	0	?
	San Andrés	2	0	0	0	0	0	0
	Sucre	24	2	0	0	0	0	0
PROMEDIO	19.56	5.78	0.44	0.00	0.11	0.22	0.22	

Nota: datos obtenidos de Disposición Final de Residuos Sólidos, Superservicios, DNP, (2015).

Se establece la cantidad de rellenos sanitarios autorizados, botaderos a cielo abierto, celdas transitorias, cuerpos de agua, celdas de contingencia, quema a cielo abierto

reportadas y plantas de aprovechamiento ya establecidas, con datos obtenidos de la página web de la Superintendencia de Servicios Públicos, en la Tabla 20 se detallan los valores de cada variable analizada. Los datos muestran la capacidad para aprovechamiento de residuos sólidos con disposición final en rellenos sanitarios, situación de gran ventaja para la región Central; fácilmente se demuestra las condiciones inadecuadas para disposición final de residuos sólidos en la región Norte; situación que es determinante en el momento de priorizar la implementación de proyectos. En este aspecto, dentro del análisis estadístico realizado a las variables se observó baja correlación con la variable CH_4 , adicionalmente se procesaban los datos y el modelo con esta variable y las demás, no encontrándose nivel de dependencia en los datos (como se analiza en los modelos expuestos en secciones posteriores), pero al realizar el proceso con la variable CO_2 , arrojaba mayor grado de correlación y a la vez dependencia con las demás variables de estudio, por razones de homocedasticidad y heterocedasticidad en el comportamiento de análisis de los datos la variable metano debió excluirse del modelo debido a su baja significancia, para este caso se podría decir que el modelo se ajusta a las condiciones de disposición inadecuadas de los residuos sólidos en los rellenos sanitarios en las áreas menos industrializadas de la región Norte y Centro proliferando más la producción de CO_2 , porque gran parte de este proceso se surte a la intemperie mientras se cumplen los niveles de la cámara y el cierre o llenado con material agregado de cada nivel de disposición en el relleno.

Puesto que el gas metano CH_4 se genera de una manera diferente al CO_2 a partir de los residuos orgánicos, se plantea un segundo modelo basado en la expresión de logaritmos naturales de los datos de entrada de la Tabla 21, con el fin de darle soporte a las variables porcentuales o relativas para proyectar el modelo de metano en Colombia, determinante para la reducción de gases de metano en la atmósfera, de los departamentos de Colombia, donde todas las variables incluyendo el CO_2 explican positivamente la variación en la emisión del gas metano en el segundo modelo, puesto que en las variables de residuos sólidos solo se usan los datos de la variable porcentaje y no la cantidad absoluta de estos datos.

En relación a las emisiones de metano provenientes de los rellenos sanitarios, se puede establecer que la baja infraestructura en los sistemas de disposición en la región Norte es preponderante, para implementar enfoques de aprovechamiento, se deben propiciar inversiones en instalaciones, diseño y metodologías de redes de captación en las celdas para la apropiación de proyectos de biodigestores en rellenos sanitarios.

- Por PGIRS actualizados. Se mencionan a continuación los elementos relevantes identificados en cada uno de los planes de desarrollo de los departamentos en estudio, en cuanto a la disposición final de residuos sólidos proyectados en el programa de implementación de biodigestores.

Región Central

82

- Antioquia. El actual sistema de producción agropecuario del departamento ha ejercido una presión importante sobre los suelos antioqueños en cuanto a su fertilidad y productividad. Por esa razón, se hace necesario establecer estrategias de aprovechamiento de residuos orgánicos y agrícolas, con el fin no solo de obtener abonos y fertilizantes órgano- minerales de buena calidad, sino la producción de biogás como fuente de energía alternativa para las zonas rurales de Antioquia (Gobernación de Antioquia, 2016). En el Programa 7 de su PGIR proyectado al sector Gas domiciliario para el desarrollo rural del departamento, se busca brindar equitativamente el acceso a la población rural con alternativas energéticas de calidad y eficientes, incremento de la productividad y la competitividad rural y ejecución de proyectos con nuevas alternativas para la generación de gas en zonas rurales de difícil acceso. En Medellín uno de los grandes problemas ambientales correspondía a la poca capacidad de uso del relleno sanitario por encontrarse casi lleno, la ciudad genera alrededor de 70.000 toneladas de residuos sólidos por mes (Waste2energy-medellin,

2017); con el objetivo de autoabastecer el sector energético de los municipios del departamento producirán biogás minimizando los estragos en el medioambiente. Los beneficios que traerá este proyecto están considerados en la disminución de los costos y emisiones de residuos sólidos municipales; el aumento de la eficiencia en la planta de cogeneración y la generación de empleos directos e indirectos.

- Boyacá. La producción energética en Boyacá, se centra en termoeléctricas, que utilizan miles de toneladas de carbón al año, emitiendo en consecuencia miles de toneladas de CO₂ a la atmósfera, presentándose esta como una opción para buscar proyectos de cambio climático, no solo en la reconversión a proceso geotérmicos de las plantas de Paipa, sino especialmente a la selección e implementación de otros proyectos de energías alternativas (Eólica, solar, hidroeléctricas a filo de agua, biomasa, entre otros) (Gobernación de Boyacá, 2016). Por otra parte, en el plan de desarrollo se contempla la prevención y el control de la degradación ambiental de los municipios atendidos, generada por el inadecuado manejo de residuos sólidos, la contaminación atmosférica y la afectación del paisaje; busca implementar programas de clasificación, reciclaje, aprovechamiento y valorización de los residuos sólidos (Gobernación de Boyacá, 2016).
- Caldas. El departamento en su Plan de Acción 2016-2019 diagnostica la inadecuada disposición de residuos sólidos, baja cobertura en los centros poblados y suelo rural de los municipios, deficiente apropiación de tecnologías limpias para el aprovechamiento de los residuos, falta de la inclusión del aprovechamiento y recuperación y rutas selectivas en el sistema tarifario del servicio de aseo, contaminación de las fuentes hídricas por el inadecuado manejo de los lixiviados (CorpoCaldas, 2016). El plan de desarrollo de este departamento establece como meta la generación de

alternativas para el aprovechamiento de residuos en suelos degradados por las actividades productivas. Se ejecuta el proyecto de recuperación y combustión del biogás generado en el relleno sanitario La Esmeralda para conversión y aprovechamiento del en electricidad mediante quema controlada del biogás, generado en este sitio de disposición final de residuos sólidos (Aseo Urbano SAS, 2017).

- Cundinamarca. El plan de desarrollo establece en su programa de Gestión de Residuos Sólidos la generación de biogás en rellenos sanitarios, la generación de acciones de reciclaje en la fuente, y el uso y reúso. Actualmente se encuentra en ejecución el Proyecto Biogás Doña Juana S.A. E.S.P., que surgió como aprovechamiento para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mecanismo de participación en el protocolo de Kioto, mitigación de impacto ambiental y prevención del calentamiento global; con uno de los rellenos sanitarios más grandes a nivel continental que reduce anualmente alrededor de 700.000 toneladas de CO₂ eq (Proactiva Colombia - Veolia, 2017) para una generación de 600 kw/h destinada al autoconsumo de la planta; un porcentaje de la producción es asignada al desarrollo de programas sociales.
- Huila. El plan de gestión de residuos sólidos de este departamento reconoce la valoración económica obtenida de la electricidad producida por biorreactores; estipula la construcción de una planta Biorreactor para el aprovechamiento de los residuos orgánicos, por medio del cual, se convierten todas las basuras o residuos sólidos orgánicos biodegradables, municipales, agrícolas, industriales, etc., en abono biológico genérico y formulado, además de la producción de energía renovable a partir del biogás generado durante los procesos de degradación del Biorreactor; su meta es autoabastecer Biogás para mover los Equipos y maquinaria del relleno sanitario y planta transformadora.

- Quindío. Se establece la política departamental de manejo de residuos sólidos y el uso eficiente de energía; minimizando el impacto a nivel ambiental y de salud generado por los mismos desde el origen hasta la recolección por parte de los operadores; a quienes hacen responsables del agrupamiento por tipo de residuos. Esto demuestra una estrategia regional de cultura y aprovechamiento con el objetivo de disminuir la cantidad de residuos en rellenos sanitarios estimulando las Alianzas Público Privadas (APP) e impulsando el uso de energías limpias en las zonas rurales (Gobernación del Quindío, 2016).
- Risaralda. Se reconoce el impacto de los cultivos sobre los suelos del departamento, la disminución en la producción de biomasa, el incremento de la temperatura, y el impacto que esto ocasiona sobre el ecosistema local (Carder, 2016). No se establecen proyectos dedicados a la biodiversidad.
- Santander. El gobierno departamental a través del “Santander Nos Une” 2016-2019 le apuesta a la promoción de este tipo de alternativas energéticas con el apoyo de proyectos de generación de energía renovables (Gobernación de Santander, 2016); una de sus metas es el aumento (en un 2 %) del porcentaje de residuos sólidos aprovechado; Este programa pretende apoyar la clasificación en la fuente, transporte, manejo, tratamiento, aprovechamiento, valoración y disposición, de los residuos sólidos del departamento, promoviendo dos iniciativas de aprovechamiento y valoración de los residuos sólidos. Una de las políticas a implementar consiste en apoyar la producción limpia, haciendo énfasis en el adecuado manejo de los residuos sólidos y/o líquidos agropecuarios, aumentando en un 10 % el aprovechamiento de los residuos de cosecha y/o la disposición final adecuada de los residuos peligrosos agropecuarios desde el sector rural.

- Tolima. Implementa la estrategia denominada “Residuos Sólidos,” en la cual se propone desarrollar alternativas para el aprovechamiento de los residuos sólidos en actividades productivas y un sistema de separación, reutilización y valorización de residuos sólidos recolectados. Determinan que “en el Departamento se viene requiriendo la implementación de los sistemas de tratamiento de las aguas residuales de tipo doméstico e industrial, el control de las emisiones y el adecuado manejo de los residuos sólidos; actividad que se realiza a través de la evaluación, seguimiento y control, de las empresas o industrias que generan la contaminación ambiental. Se viene exigiendo el cumplimiento de la normatividad ambiental, promocionando la necesidad de controlar la emisión de contaminantes al agua, al aire y al suelo” (Cortolima, 2013), pero no establecen proyectos específicos en la generación de biomasa.

Región Caribe

- Atlántico. Se destaca en el diagnóstico inicial que los enfoques de los planes están orientados al componente de disposición final, quedando rezagado lo relacionado con los programas de aprovechamiento de residuos (Gobernación del Atlántico, 2016); se abre campo a la promoción de soluciones de autogeneración eléctrica a pequeña escala, a partir de Fuentes no convencionales de energía – FNCER: biomasa, energía solar, eólica, entre otras.
- Bolívar. En su plan de desarrollo 2016-2019 se describe la problemática del deficiente manejo de residuos sólidos, se requiere, entre otras cosas, la inclusión de proceso de separación de residuos para el reciclaje y aprovechamiento para fines como la producción de energía; tomando entre sus acciones resolutivas implementar estrategias de recolección y tratamiento integral de residuos sólidos, promoviendo el reciclaje, la

reducción y el reúso; para esto, proyectan implementar un Plan de manejo Integral de residuos sólidos que permita avanzar en el aprovechamiento de estos recursos (Gobernación de Bolívar, 2016). En el municipio de Arjona teniendo en cuenta la vocación agropecuaria del municipio, consideran que existe una buena producción de residuos sólidos orgánicos que se pueden constituir en compostaje para abono del sector agrícola, lo mismo que para la producción de Biogás, que puede ser utilizado por los sectores más desprotegidos del municipio que aún no cuentan con el servicio de Gas natural (Alcaldía de Arjona, 2005).

- Cesar. El plan de desarrollo en su diagnóstico establece que en la parte urbana se tiene un indicador del 92,21 % en la recolección, transporte y barrido de residuos sólidos domiciliarios, se establece prioridad a la producción de abono orgánico con el aprovechamiento de los residuos sólidos y detalla como parte de la implementación de la estrategia de producción más limpia el apoyo a la generación de tecnologías limpias dentro de las que se destaca el biogás; reconocen el uso que puede darse a los residuos sólidos en los rellenos sanitarios; no exponen proyectos específicos (CorpoCesar, 2017).
- Córdoba. En este departamento el programa busca atender temáticas relacionadas con el desarrollo y uso de fuentes de energías alternativas y limpias, tales como la energía eólica, solar y biogás, y biocombustibles (como por ejemplo: la palma de aceite, higuera y Jatropha). Se enfocan en los temas de producción de biocombustibles como un proyecto de investigación y desarrollo de nuevas especies para la producción de biodiesel. La Administración Departamental incursionará inicialmente con un estudio de cultivos energéticos a partir de los cuales se pueden obtener los biocombustibles (Asamblea Departamental de Córdoba, 2016).

- La Guajira. En algunos municipios del departamento, los residuos sólidos son depositados en botaderos a cielo abierto sin ningún sistema de captura ni mitigación de los gases generados por la descomposición de la materia orgánica: mientras que para otros municipios como Riohacha, Fonseca, Hato Nuevo, entre otros, los residuos se depositan en un relleno sanitario tecnificado, que se encuentra ubicado en el departamento del Cesar. Existe poca cultura de reducción, reúso y reciclaje de residuos sólidos, y es común encontrarlos en las calles, carreteras, pozos, entre otros (Gobernación de La Guajira, 2016). Por las características climáticas del departamento los proyectos de energía renovable que más se han investigado han sido eólicos y solares.
- Magdalena. Se evaluará la viabilidad que Aguas del Magdalena, empresa departamental de servicios públicos domiciliarios, para que no solo adelante el Plan Departamental de Aguas que viene gestionando desde el 2007, sino que adquiera capacidades institucionales para fortalecer la gestión de residuos sólidos en los municipios, apoyando la elaboración de un diagnóstico inicial que formule alternativas viables de solución (Gobernación del Magdalena, 2016).
- Norte de Santander. Proyectan el aseguramiento de la incorporación de la variable ambiental en la gestión integral de residuos sólidos y los residuos o desechos peligrosos, y en el ejercicio de la autoridad ambiental, a través de los instrumentos y mecanismos establecidos por las normas, con el propósito de orientar la buena gestión en el territorio del departamento, para reducir, controlar o eliminar el impacto ambiental adverso y propender por el establecimiento de alternativas óptimas que permitan la valoración del residuo o desecho, su desvío a la reutilización o el reciclaje, a través de la inclusión al ciclo económico y productivo, o hacia el aseguramiento

de disposición final; dándole prioridad al tratamiento de Residuos sólidos peligrosos (Corponor, 2017).

- San Andrés. Los residuos sólidos han aumentado de manera considerable en la isla, acortando la vida útil del sitio de disposición final y siendo una limitante la no existencia de un área nueva de expansión, se ve la necesidad de buscar nuevas alternativas eficientes para hacer frente a esta problemática. Dentro del programa de Desarrollo Sostenible el cual establece el estudio, diseño y ejecución de proyectos encausados a fomentar el uso de energías renovables y hacer un manejo adecuado de residuos sólidos, se ha construido en el relleno sanitario Magic Garden, una planta para generación de energía por medio de la incineración de 40 toneladas de basura diaria, pudiendo ser aumentada a 80 toneladas. Con esta cantidad de basura diaria se pueden producir en promedio 1.5 Mw/día (Twenergy, 2017).
- Sucre. Los PGIRS de los municipios del departamento tienen problemas en su parte operativa y aplicativa, trayendo consigo un mal manejo y disposición de los residuos sólidos (Gobernación de Sucre, 2016). Este departamento no establece la disposición final de residuos sólidos como una estrategia priorizada, por lo tanto, no incorpora a su plan de acción la implementación de biodigestores (CarSucre, 2017).

NIVEL INFERENCIAL DE LOS FACTORES DETERMINANTES DE LOS MODELOS DE EMISIÓN DE GASES EN EL AMBIENTE DE COLOMBIA

En este apartado se establece una relación entre variables analizadas, con el fin de obtener y establecer una relación de preponderancia de parámetros a tener en cuenta al momento de la implementación de biodigestores anaerobios con residuos sólidos.

Factor de relación demográfica

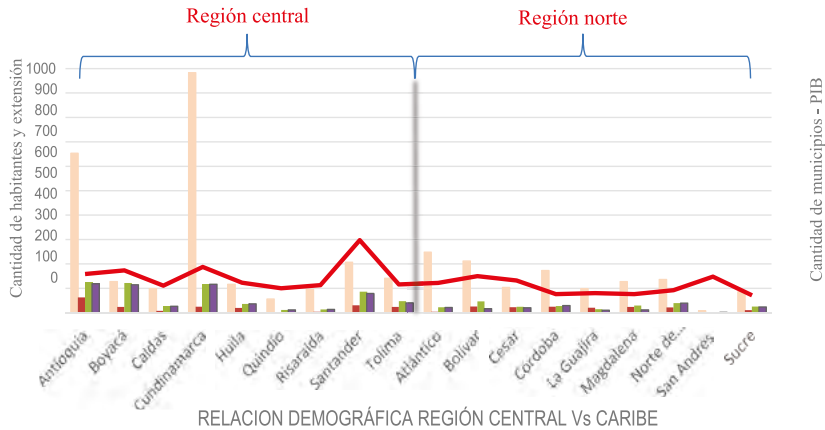


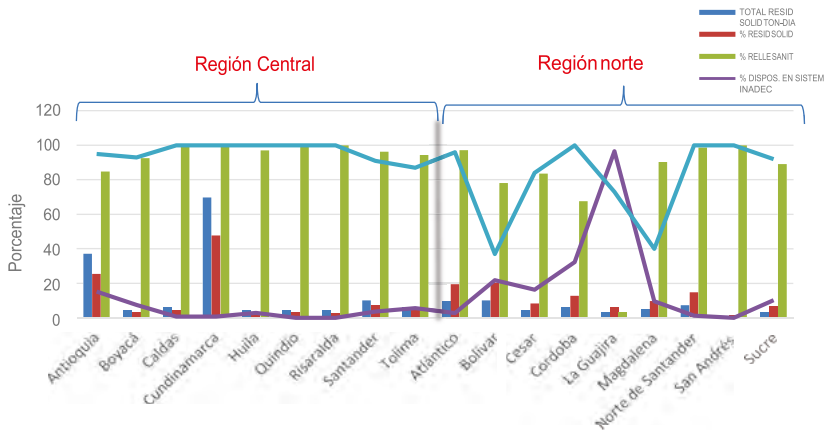
Figura 17. Relación demográfica región Central vs. región Norte

Fuente: Autores con base al DANE y Statgraphics

Cabe resaltar que existe una relación entre el número de municipios autorizados y el total de municipios de la región, como en la región Central, tal como se muestra en la Figura 17, la cual consolida un 95 % de municipios autorizados, mientras que la región Norte solo alcanza un 76 % de la autorización.

Factores de residuos generados

Se identifican altos porcentajes de disposición inadecuada en la región Norte, mientras que, en la región Central, solo se presenta este en un 4 %; se observa además, un 96 % de disposición autorizada en la región Central y para la región Norte un 80 %, situación descrita en la Tabla 21.



RESIDUOS GENERADOS REGIÓN CENTRAL vs. REGIÓN NORTE
Figura 18. Residuos generados región Norte vs. región Central.

Planteamiento del modelo 1 de los factores determinantes de la Emisión de CO₂

Para el planteamiento del modelo de regresión múltiple se utilizarán datos de todos los departamentos del país con las variables de entrada de la Tabla 21 (dependientes: CO₂ equivalente en Megatoneladas, independientes, X1: Cantidad de residuos, X2: % de residuos sólidos, X3: % de rellenos sanitarios, X4: % disposición en sistemas inadecuados, utilizando el software estadístico Statgraphics, donde se aplicó análisis multivariado, una prueba T de Student, empleando una matriz de correlación con un análisis de varianza y un análisis de conglomerado a los datos obtenidos del DANE.

Con el objeto de analizar el comportamiento estadístico, en este proceso se determinaron los datos atípicos con el fin de darle ajuste al modelo y obtener una buena predicción de este: inicialmente se planteó, entonces, el modelo con datos de 29 departamentos, se realizaron correlaciones de todas las variables, la de metano CH₄, mostró baja correlación y un bajo nivel de dependencia con las demás variables, debido a los problemas de ajuste, homocedasticidad y heterocedasticidad, la variable metano en su análisis inicial no arrojó dependencia, pero sí se determinó buen comportamiento de la variable de emisiones CO₂ con el resto de las variables.

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

Adicionalmente se excluyeron 3 datos atípicos correspondientes a los 3 departamentos más industrializados de Colombia, que distorsionan los modelos, puesto que emiten más porcentaje de CO₂ al medioambiente; para este caso se utilizó el software estadístico Statgraphics a las variables de estudio identificadas en cada departamento de la región Norte y Centro; para identificar el grado de significancia y establecer el nivel de confiabilidad de los datos obtenidos del Departamento Nacional de Estadísticas DANE.

Para estos efectos, los modelos permitieron determinar parámetros de reducción de gases de efecto invernadero generados en los rellenos sanitarios, es decir, si se disminuye el porcentaje de residuos generados en Colombia, a través de prácticas de segregación en la fuente en los planes de manejo integral de residuos municipales, por medio de prácticas en los sectores urbanos, como reducir, reciclar y reutilizar, se disminuiría la tasa de incidencia en la producción de CO₂, de igual manera, al incrementarse la construcción de áreas de disposición de rellenos sanitarios, incidiría positivamente en emisión de gas metano.

Tabla 21. Datos de entrada de la contaminación atmosférica y sus factores

	Departamento	Y = Mega ton CO ₂ eq	X1 = Cantidad Residuos Sólidos Ton/Día	X2 = % Residuos Sólidos	X3 = % Rellenos Sanitarios	X4 = % Disposición en Sistemas Inadecuados	% CH ₄
1	Boyacá	0,21	431,8	2,95	92,48	7,52	14,37
2	Caldas	0,22	572,8	3,92	99,23	0,77	18,5
3	Huila	0,16	423,3	2,89	97,13	2,87	15,95
4	Quindío	0,16	441	3,02	100	0	20,56
5	Risaralda	0,27	416	2,84	100	0	23,66
6	Santander	0,42	1.012,00	6,92	96,4	3,6	16,87
7	Tolima	0,35	628	4,29	94,4	5,6	20,25
8	Atlántico	0,49	966	19,6	97,3	2,7	11,4
9	Bolívar	0,41	1.011	20,5	78,2	21,8	16,59
10	Cesar	0,25	414,89	8,4	83,7	16,3	36,77
11	Córdoba	0,25	630,42	12,8	67,7	32,3	33,28
12	La Guajira	0,15	299,4	6,1	3,4	96,6	45,2
13	Magdalena	0,26	478,9	9,7	90,38	9,62	27,04
14	Norte de Santander	0,35	731,4	14,8	98,7	1,29	18,11
15	San Andrés	0,03	77,25	1,6	100	0	8,94
16	Sucre	0,15	318,9	6,5	89	10,24	35,46
17	Meta	0,24	4,559	63,69	99	1	12,06
18	Casanare	0,11	1,8271	25,52	99,63	0,37	32,61
19	Arauca	0,06	0,706	9,86	83,86	4,38	24,08
20	Vichada	0,01	0,066	0,92	100	0	7,64
21	Chocó	0,06	0,9532	2,4	10	70	4,34
22	Nariño	0,24	8,93	22,1	18,75	60,9	9,05
23	Cauca	0,18	3,3086	8,2	32,5	50,6	14,8
24	Amazonas	0,01	0,2706	6,5	4,8	95,2	0,46

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

25	Caquetá	0,08	1,645	39,5	75	25	6.61
26	Guainía	0,01	1,2833	30,8	0	100	1.04
27	Vaupés	0,01	0,017	0,4	63,3	36,7	0.14
28	Guaviare	0,01	0,2426	5,8	91,5	8,5	2.35
29	Putumayo	0,07	0,708	17	83,05	16,95	4.81

Fuente: Autores con base al DANE y Statgraphics

En la Tabla 21, se presenta la información de 29 departamentos de Colombia que poseen menor desarrollo industrial, es por esta razón que no se incluye a Cundinamarca, Valle del Cauca y Antioquía, que tienen datos atípicos o muy alejados del promedio nacional; por otra parte, afectan el grado de correlación o regresión del modelo debido a que no cumplen las pruebas de independencia, normalidad y heterocedasticidad.

Tabla 22. Resumen estadístico para cada variable

Departamento	Y = Mega tonCO2 eq	X1 = Cantidad Residuos Sólidos Ton/Día	X2 = % Residuos Sólidos	X3 = % Rellenos Sanitarios	X4 = % Disposición en Sistemas Inadecuados
Media	0,18	306,123324	12,3972414	74,1175862	23,4762069
Mediana	0,16	299,4	6,92	90,38	8,5
Moda	0,01	#N/A	6,5	100	0
N	29	29	29	29	29
Min	0,01	0,017	0,4	0	0
Q1	0,06	1,2833	3,02	67,7	1,29
Q2	0,16	299,4	6,92	90,38	8,5
Q3	0,25	459,95	15,9	98	28,65
Max	0,49	1012	63,69	100	100

Varianza	0,01870714	116025,835	190,496564	1176,24483	1001,17763
Desviación Estándar	0,13677406	340,625652	13,8020493	34,2964259	31,6413911

Fuente: Autores con base al DANE y Statgraphics

En la primera fila de la Tabla 22, se observa la media de Y o promedio del conjunto de datos en estudio (29 departamentos) de la variable identificada como dependiente, correspondiente a la emisión de gases CO₂, el cual fue de 0.18 Megatoneladas equivalentes, y se tiene una media nacional de producción de residuos sólidos de 306,12 toneladas por día (denominada como X1). El valor mínimo de emisión de CO₂ registrado y la moda es de 0,01, que fue el valor más frecuente presentado en 4 departamentos del país, como son: Amazonas, Guainía, Vaupés y Guaviare, correspondiente a los departamentos menos industrializados y con mayor reserva forestal del país. Por otra parte, para la variable cantidad de residuos sólidos “X1”, los valores máximos fueron 0.49 y 1012 toneladas/día generados por los departamentos de Atlántico y Santander, respectivamente.

En cuanto al tercer cuartil de los departamentos, concentra emisiones de 0,25 de ton CO₂ eq, mientras que el de la variable Cantidad Residuos Sólidos es de 459,95 Ton/día.

Tabla 23. Resumen estadístico para Y

	Percentiles		
Recuento	29	1,0 %	0,01
Promedio	0,18	5,0 %	0,01
Desviación Estándar	0,136774	10,0%	0,01
Coefficiente de Variación	75,9856 %	25,0 %	0,06

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS
 reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
 de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

Mínimo	0,01	50,0 %	0,16
Máximo	0,49	75,0 %	0,25
Rango	0,48	90,0 %	0,41
Sesgo Estandarizado	1,11794	95,0 %	0,42
Curtosis Estandarizada	-0,544363	99,0 %	0,49

Fuente: Autores con base al DANE y Statgraphics

Para la variable Y, se tienen 29 observaciones con un rango de 0,48, desde 0,01 a 0,49.

En la Tabla 23 se muestran los estadísticos de resumen para Y. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. De particular interés aquí son el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden utilizarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, lo que tendería a invalidar cualquier prueba estadística con referencia a la desviación estándar. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. Esto es consistente con el valor de curtosis estandarizado, que también se encuentra dentro del rango esperado para datos procedentes de una distribución normal.

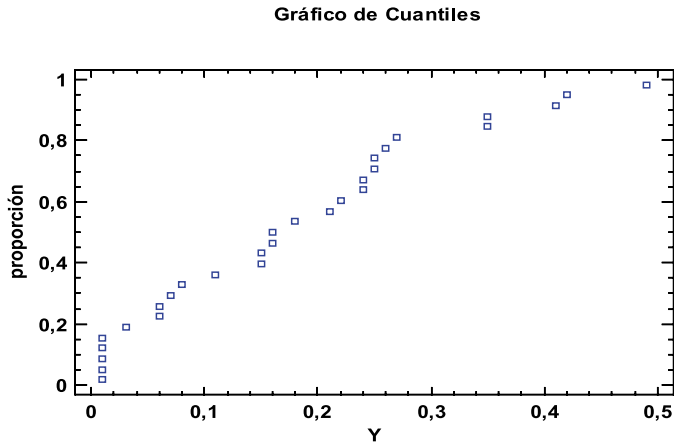


Figura 19. Gráfico de la variable Megatoneladas de CH₂ equivalente
Fuente: Autores con base al DANE y Statgraphics

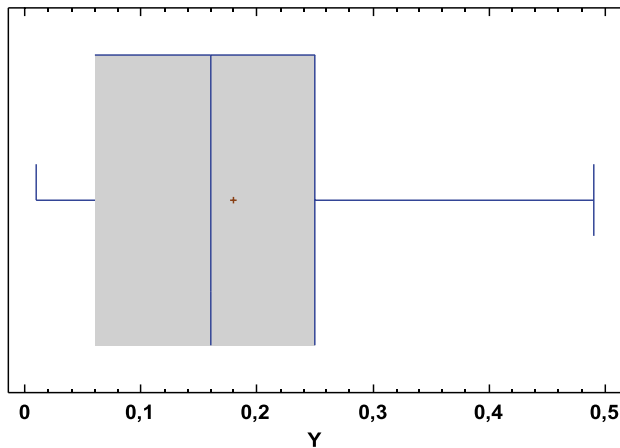


Figura 20. Gráfico de caja y bigotes de la variable Megatoneladas de CH₂ equivalente
Fuente: Autores con base al DANE y Statgraphics

En las Figuras 19 y 20, la variable Y, no muestra datos atípicos que se alejen de la media, todos los datos están cercanos a la media, al no incluir los departamentos más industriales como: Cundinamarca, Valle y Antioquía, ya que estos están por encima de la unidad (mayores que 1).

Modelo 1. Factores determinantes de la emisión de gases CO₂

El modelo de regresión Múltiple mejor estimado como resultado del análisis estadístico de la variable, dependiente y CO₂ teniendo en cuenta las variables explicativas o predictoras es:

$$Y_i = \alpha + \beta_i X_i + u_i \quad (1)$$

$$Y_1 = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + u \quad (2)$$

- Y : Megatoneladas de CH₂ equivalente.
- X_1 : Cantidad de residuos sólidos generados en toneladas/día.
- X_2 : % residuos sólidos.
- X_3 : % relleno sanitario.
- X_4 : % disposición en sistemas inadecuados.
- α : Intercepto,
- β_i : Coeficientes de la pendiente con respecto a la contaminación con gases CO₂.
- u : Término de error.

Tabla 24. Matriz de correlación para las estimaciones de los coeficientes

	CONSTANTE	X1	X2	X3	X4
CONSTANTE	1,0000	0,1992	0,0502	-0,9931	-0,9891
X1	0,1992	1,0000	0,1835	-0,2776	-0,2144
X2	0,0502	0,1835	1,0000	-0,1121	-0,1078
X3	-0,9931	-0,2776	-0,1121	1,0000	0,9844
X4	-0,9891	-0,2144	-0,1078	0,9844	1,0000

Fuente: Autores con base al DANE y Statgraphics

En la Tabla 24 se muestran las correlaciones estimadas entre los coeficientes en el modelo ajustado. En esta Tabla solo existe la presencia de una correlación con valor absoluto mayor a 0,5 entre las variables X3 que corresponde a % de rellenos sanitarios y X4 a % disposición en sistemas inadecuados (sin incluir el término constante) entre las variables predictoras.

Para cumplir o validar todos los supuestos de normalidad, independencia y homocedasticidad del modelo, se escogió este modelo ($Y_1 = \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 + u$).

A continuación, se muestran los resultados de la Tabla 25 ANOVA y de los supuestos del modelo de regresión lineal aplicado.

Tabla 25. ANOVA

Parámetro	Estimación	Error	Estadístico	Valor-P
		Estándar	T	
CONSTANTE	0,662218	0,147816	4,48002	0,0002
X1	0,000397673	0,000027889	14,2591	0,0000
X2	0,00296704	0,000623782	4,75653	0,0001
X3	-0,00645122	0,00151908	-4,24679	0,0003
X4	-0,00692569	0,00162024	-4,27449	0,0003

Fuente: Autores con base al DANE y Statgraphics

Se puede inferir que en el análisis ANOVA, las variables X1, X2, X3 y X4 resultaron significativas para el modelo, debido a que su valor fue inferior al nivel de confiabilidad del 95 % ($\alpha < 0,05$).

Prueba t del modelo.

- $H_0: \beta_i = 0$, X_i no tiene relación con la variable Y
- $H_a: \beta_i \neq 0$, X_i tiene relación con la variable Y
- $t = \beta_i / ee(\beta_i)$
- $t = 0,000397673 / 0,000027889$
- $t = 14,2591$

100

Las variables X1, X2, X3 y X4, tienen una relación significativa como factores para explicar la variable Y, dado que el Valor-p es estadísticamente significativo, al ser menor que 0,05. Por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna de que existe una relación entre las variables explicativas o independientes y la variable dependiente.

La ecuación del modelo ajustado es:

$$Y = 0,662218 + 0,000397673 * X1 + 0,00296704 * X2 - 0,00645122 * X3 - 0,00692569 * X4 \quad (3)$$

Donde, la estimación de la constante es 0,66 y del coeficiente β_i es 0,0003. Este último indica que un aumento en la cantidad de residuos sólidos en toneladas por día, aumenta a su vez, la contaminación con más emisiones de gases CO_2 en megatoneladas a la atmosfera.

Para el caso de la variable CO₂ equivalente Megatoneladas para el modelo en la ecuación anterior dependerá de un coeficiente $\beta_2 = 0,002$ en relación con la variable dependiente % de residuos, al incrementar el porcentaje de residuos sólidos en Colombia incrementará el valor de las emisiones de CO₂ a un ritmo de 0,002 adicionalmente en el modelo.

En el Modelo anterior, las emisiones de CO₂ disminuirán a un ritmo del coeficiente $\beta_3=0,006$ con el porcentaje de rellenos sanitarios instalados en Colombia, es decir, a mayor incremento del porcentaje de estas infraestructuras disminuirá la contaminación de CO₂ a un coeficiente β_3 .

Tabla 26. Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	0,475963	4	0,118991	59,70	0,0000
Residuo	0,0478371	24	0,00199321		
Total (Corr.)	0,5238	28			

Fuente: Autores con base al DANE y Statgraphics

- $SCR = \text{Sumatoria del Cuadrado de la Regresión} = 0,475963$
- $SCE = \text{Sumatoria del Cuadrado de los Errores} = 0,0478371$
- $Gl = \text{Grado de Libertad} = n - 4 = 29 - 5 = 24$
- $S_{2R} = SCE / (n-4) = 0,0478371 / 24 = 0,00199321$
- $F = CMR/S_{2R} = 0,118991/0,00199321 = 59,70$

Prueba de Hipótesis Conjunta de F:

- $H_0: \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 0$, (Todas las variables X_i no tienen relación con la variable Y)
- $H_a: \beta_1 \neq \beta_2 \neq \beta_3 \neq \beta_4 \neq 0$, (Todas las variables X_i tienen relación con la variable Y)

Según la Tabla 26, las 4 variables independientes del modelo conjuntamente explican la variable dependiente Y , dado que el Valor-P del estadístico F , es altamente significativo a un nivel de confianza del 99 %, es decir, es menos del 1 %, por lo cual se rechaza la hipótesis nula y se acepta la alterna, de que tienen relación con la variable Y .

- $R^2 = 90,8673$ por ciento.
- R^2 (ajustado para g.l.) = 89,3452 por ciento Error estándar del Est. = 0,0446454
- Error absoluto medio = 0,0352732
- Estadístico Durbin-Watson = 2,30913 ($P=0,6959$) Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,158337

El estadístico R^2 , indica que el modelo así ajustado explica 90,8673 % de la variabilidad en Y . El estadístico R^2 ajustado, resulta más apropiado para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 89,3452 %. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 0,0446454.

Técnica Análisis de Conglomerados (Dendograma)

Dentro del análisis estadístico se pudo correlacionar todas las variables en estudio a través de análisis de conglomerados, técnica multivariante que permite agrupar

elementos tratando de lograr la máxima homogeneidad; se aplica con el fin de validar los datos asociando los departamentos con características similares.

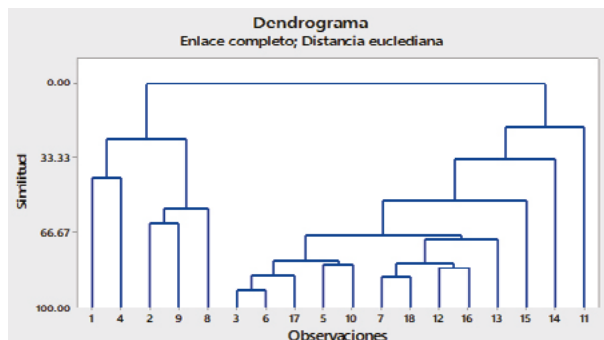


Figura 21. Correlación de similitudes entre departamentos de ambas regiones

Fuente: Autores con base al DANE

Las líneas representan afinidad de acuerdo al contexto analizado en el presente estudio. Teniendo en cuenta el orden en que se vienen tratando, en este estudio, los departamentos, así en la Tabla 27 el dendrograma de la Figura 21 utiliza la siguiente codificación para mostrar los resultados:

Tabla 27. Asignación numérica de departamentos en estudio

No.	Departamento	No.	Departamento
1	Antioquia	10	Atlántico
2	Boyacá	11	Bolívar
3	Caldas	12	Cesar
4	Cundinamarca	13	Córdoba
5	Ibuila	14	La Guajira
6	Quindío	15	Magdalena
7	Risaralda	16	Norte de Santander
8	Santander	17	San Andrés
9	Tolima	18	Sucre

Fuente: Autores con base al DANE

A continuación, se establece relación de similitud entre los departamentos de acuerdo a las variables que fueron analizadas y que pueden ser tomadas como referencias, dado que en la región central se cuentan con proyectos de generación de biogás:

- f. Antioquia y Cundinamarca:** cantidad de habitantes, cantidad de municipios, municipios autorizados, cantidad de residuos sólidos, PIB, % rellenos sanitarios, % disposición final autorizada, cantidad rellenos sanitarios, celda de contingencia, quema a cielo abierto, planta de aprovechamiento, línea priorizada en el PGIR.
- g. Boyacá, Tolima y Santander:** extensión, % residuos sólidos, % rellenos sanitarios, % disposición sitios inadecuados, % disposición final autorizada, celdas de contingencia, quema a cielo abierto, plantas de aprovechamiento, línea priorizada en el PGIR.
- h. Caldas, Quindío y San Andrés:** PIB, % residuos sólidos a la región, % rellenos sanitarios, % disposición final en sitios inadecuados, % disposición final autorizada, cantidad botaderos a cielo abierto, celdas transitorias, cuerpo de agua, celda de contingencia, quema a cielo abierto, plantas de aprovechamiento y línea priorizada en el PGIR.
- i. Huila y Atlántico:** PIB, % rellenos sanitarios, % disposición en sitios inadecuados, % disposición final autorizada, cantidad rellenos sanitarios, celdas transitorias, cuerpo de agua, celda de contingencia, quema a cielo abierto, línea priorizada en el PGIR.
- j. Risaralda y Sucre:** cantidad de habitantes, cantidad de residuos sólidos, % rellenos sanitarios, % disposición final autorizada, celdas transitorias, cuerpo de agua, celda de contingencia, quema a cielo abierto, plantas de aprovechamiento, líneas no priorizada en el PGIR.
- k. Cesar y Norte de Santander:** cantidad de habitantes, extensión, cantidad de residuos sólidos, % rellenos sanitarios, % disposición final autorizada, cantidad rellenos sanitarios, celdas transitorias, cuerpo de agua, celda de contingencia, quema a cielo abierto, plantas de aprovechamiento, líneas no priorizada en el PGIR.

I. Este grupo de departamentos asociados con Córdoba:

tendrían en común cantidad de habitantes, extensión, % disposición final autorizada, celdas transitorias, cuerpo de agua, celda de contingencia, quema a cielo abierto.

m. Magdalena, La Guajira y Bolívar:

indiscutiblemente coinciden en extensión, municipios autorizados, % disposición final autorizada, cantidad rellenos sanitarios, botaderos a cielo abierto, líneas no priorizadas en el PGIR.

Este análisis permite discriminar los factores relevantes en la priorización de proyectos tipo biodigestores para aprovechamiento de residuos sólidos.

Tabla 28. Priorización de variables según análisis conglomerado

Departamentos Conglomerados	A. Antioquia y Cesar	B. Boyacá, Tolima y Santander	C. Caldas, Quindío y San Andrés	D. Huila y Atlántico	E. Risaralda	F. Cauca y Norte de Santander	G. Guayaquil y Córdoba	H. Magdalena, Guajira y Bolívar	TOTAL
Cantidad de habitantes	X				X	X	X		4
Extensión		X				X	X	X	4
Cantidad de municipios	X								0
Municipios que entregan a rellenos	X							X	2
PIB per cápita (pequeña corrección)	X		X	X					3
Cantidad residuos sólidos tres días	X				X	X			3
% Residuos sólidos		X	X						2
% Rellenos sanitarios	X	X	X	X	X	X			6
% Disposición en Sistemas inadecuados		X	X	X					3
% Disposición final autorizada	X	X	X	X	X	X	X	X	8
Cantidad rellenos sanitarios	X			X		X		X	4
Cantidad botadero a cielo abierto			X					X	2
Celda transitoria			X	X	X	X	X		5
Cuerpo de agua			X	X	X	X	X		5
Celda de contingencia	X	X	X	X	X	X	X		7
Quema a cielo abierto	X	X	X	X	X	X	X		7
Planta de aprovechamiento	X	X	X	X	X	X			6
Línea priorizada en el plan de acción	X	X	X	X	X	X	X	X	8
TOTAL	10	9	12	11	10	12	8	6	

Fuente: Autores con base al DANE

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

Las variables que indiscutiblemente influyen en esta planeación son el porcentaje de disposición final autorizada en su conjunto con la categoría de tipo de disposición final y el porcentaje de rellenos sanitarios, tal como se observa en la Tabla 28. La cantidad de municipios atendidos no es una variable discriminatoria en la priorización de proyectos por parte de las entidades territoriales.

Estimación potencial de biogás para productos agrícolas de la región Norte

La UPME caracterizó la producción de los sectores: agrícola (Ver Tabla 29), avícola (Ver Tabla 30), bovino (Ver Tabla 31), porcino (Ver Tabla 32) y pecuario (Ver Tabla 33), generando según sus estimaciones un potencial energético para cada departamento de Colombia, de los cuales se seleccionaron solo los que aplican a este estudio.

Tabla 29. Potencial energético biomasa residual del sector agrícola

Zona	Departamento	área sembrada	producción	cantidad de residuo	potencial energético	
REGION CENTRAL	Antioquia	325738	13184130	26673	2064	
	Boyacá	45363	1340143	9736	121	
	Caldas	121189	2404498	11507	643	
	Cundinamarca	124894	2582374	16753	262	
	Huila	193236	3000148	18170	409	
	Quindío	77388	2505708	4710	1162	
	Risaralda	80286	2191034	8117	684	
	Santander	124290	2153833	15399	206	
	Tolima	272111	5245271	23519	965	
Promedio	151611	3845238	14954	724		
REGION NORTE	Atlántico	11726	38761	308	6	
	Bolívar	125453	819524	4608	114	
	Cesar	141734	1097522	7388	73	
	Córdoba	132212	2261839	5328	970	
	La Guajira	22090	195808	671	49	
	Magdalena	93548	3235501	4951	53	
	Norte de Santander	88398	1273347	5706	259	
	San Andrés					
	Sucre	62676	587155	2830	27	
	Promedio	84730	1188682	3974	194	

Fuente: Autores con base al DANE

Tabla 30. Potencial energético biomasa residual del sector avícola

Zona	Departamento	población	cantidad estiércol	potencial energético
REGION CENTRAL	Antioquia	8533850	261210	18877
	Boyacá	2282662	66239	521
	Caldas	1011950	36724	122
	Cundinamarca	32312272	945412	7245
	Huila	1600077	51441	280
	Quindío	3577380	100191	950
	Risaralda	2779970	76498	762
	Santander	27606680	817654	7027
	Tolima	3553365	120023	522
Promedio	9250912	275044	4034	
REGION NORTE	Atlántico	4137270	119535	650
	Bolívar	1352800	36678	16
	Cesar	144870	3985	1176
	Córdoba	1390150	38009	500
	La Guajira	18700	483	81
	Magdalena	223000	8546	29
	Norte de Santander	2467880	83413	438
	San Andrés			
	Sucre	246700	7256	2466
	Promedio	1247671	37238	669

Fuente: Autores con base al DANE

Tabla 31. Potencial energético biomasa residual del sector bovino

Zona	Departamento	población	cantidad estiércol	potencial energético
REGION CENTRAL	Antioquia	2655856	11906012	8836
	Boyacá	766628	3180966	2361
	Caldas	390345	1710981	1270
	Cundinamarca	1109119	4824628	3581
	Huila	4/8965	2130289	1581
	Quindío	88934	389074	289
	Risaralda	110004	472020	350
	Santander	1509193	6723159	4990
	Tolima	694013	3086989	2291
	Promedio	867006	3824902	2839
REGION NORTE	Atlántico	254169	1118254	1024
	Bolívar	892013	3939728	3609
	Cesar	1593664	7054798	6462
	Córdoba	2215079	9118032	8352
	La Guajira	293667	1289815	1181
	Magdalena	1419319	6271265	3744
	Norte de Santander	391935	1757031	1304
	San Andrés
	Sucre	890813	3489049	3196
	Promedio	993832	4254747	3859

Fuente: Autores con base al DANE

Tabla 32. Potencial energético biomasa residual del sector porcino

Zona	Departamento	población	cantidad estiércol	potencial energético
REGION CENTRAL	Antioquia	1072601	715695	1281.93
	Boyacá	124200	93277	167.08
	Caldas	71593	54438	77.54
	Cundinamarca	553566	424769	760.83
	Huila	26782	20675	29.45
	Quindío	44763	31779	45.26
	Risaralda	95178	73174	104.22
	Santander	90258	71475	83.32
REGION NORTE	Tolima	94827	69893	125.19
	Promedio	241530	172797	297
	Atlántico	44232	25515	29.74
	Bolívar	36021	19185	22.36
	Cesar	41148	32256	37.6
	Córdoba	303007	279800	326.15
	La Guajira	108716	98102	114.35
	Magdalena	30543	25491	29.71
	Norte de Santander	46225	36527	42.58
	San Andrés
Sucre	87030	73438	85.6	
Promedio	87115	73789	86	

Fuente: Autores con base al DANE

Tabla 33. Potencial energético biomasa residual del sector pecuario

Zona	Departamento	población	cantidad estiércol	potencial energético
REGION CENTRAL	Antioquia	12262307	12882917	11993
	Boyacá	3173490	3340483	3049
	Caldas	1473888	1802143	1469
	Cundinamarca	33974957	6194808	11587
	Huila	2105824	2202404	1890
	Quindío	3711077	521044	1284
	Risaralda	2985152	621695	1217
	Santander	29206131	7612288	12100
	Tolima	4342205	3276905	2939
	Promedio	10359448	4272743	5281
REGION NORTE	Atlántico	4435671	1263304	1704
	Bolívar	2280834	3995590	3447
	Cesar	1779682	7091039	7675
	Córdoba	3908236	9435841	9178
	La Guajira	421083	1388401	1376
	Magdalena	1672862	6305302	5803
	Norte de Santander	2906040	1876972	1785
	San Andrés
	Sucre	1224543	3569743	5748
	Promedio	2328619	4365774	4589

Fuente: Autores con base al DANE

Destacando los productos cultivados en cada departamento y así como se presenta en la Tabla 34, según la última Encuesta Nacional Agropecuaria (2016), para cada uno de ellos se obtuvo la cantidad de residuos disponibles para biogás.

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS
reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

Tabla 34. Caracterización biomasa agrícola departamentos región Norte

DPTO	Datos de cultivos actuales en la región (1)					Datos obtenidos con la calculadora BEFS (FAO) (2)						
	cultivo	M5	M2	M3	M4	Datos/cultivo		M5-paja	M2 - follaje	M3-cascarilla	M4-tallos	
Atlántico	rendimiento	2	2.6	2	11	Área prod. total	Ha	506	45	2468	1.762	
	No. De cultivos/año	2.00	1.00	2	2	Rendimiento de residuos	t/ha	2.16	5.41	0.71	2.35	
	Área de prod. Total	1011	118	9872	38768	biogás 100%	Total t/ha	1091	246	1751	4,149	
	Cultivo	M1	M2	M3	M4	Datos/cultivo		M1 - cascarilla	M2 - follaje	M3-cascarilla	M4-tallos	
Bolívar	rendimiento	0.3	23.2	4.1	11.0	Área prod. total	Ha	693	11153	10676	6,194	
	No. De cultivos/año	1	1	2	2	Rendimiento de residuos	t/ha	0.32	48.31	1.45	2.35	
	Área de prod. Total	208	258760	87543	136263	biogás 100%	Total t/ha	220	538773	15524	14,585	
	cultivo	M1	M2	M3	M4	Datos/cultivo		M1-cascarilla	M2 - follaje	M3-cascarilla	M4-tallos	
Cesar	rendimiento	0.8	20	4.2	5	Área prod. total	Ha	4,306	37,077	7,804	1,596	
	No. De cultivos/año	1.00	1.00	2	2	Rendimiento de residuos	t/ha	0.84	41.02	1.49	1.07	
	Área de prod. Total	3445	730,419	65552	15958	biogás 100%	Total t/ha	3636	1520830	11625	1,708	
	cultivo	M7	M2	M3	M4	Datos/cultivo		M7 - cáscara	M2 - follaje	M3-casca- rilla	M4 - tallos	
Córdoba	rendimiento	5	10	3.8	12	Área prod. total	Ha	11453	2517	14328	4228	
	No. De cultivos/año	2	1.00	2	2	Rendimiento de residuos	t/ha	1.04	20.82	1.35	2.57	
	Área de prod. Total	57265	25,168	108449	101472	biogás 100%	total t/ha	11911	52403	19310	10,861	

	cultivo	M6	M2	M3	M4	Datos/cultivo		M6 - paja	M2 - follaje	M3 - casca- rilla	M4 - tallos
						Área prod. total	Ha				
La Guajira	rendimiento	6.30	18.70	2.10	15.00	Área prod. total		1570	824	10219	1326
	No. De cultivos/año	2	1	2	2	Rendimiento de residuos		13.30	38.94	0.74	3.21
	Área de prod. Total	19,788	15,409	42,920	39,782	biogás 100%		20883	32084	7611	4258
						Total t/ha					
Magdalena	cultivo	M1	M2	M3	M4	Datos/cultivo		M1 - casca- rilla	M2 - follaje	M3 - casca- rilla	M4 - tallos
	rendimiento	1.40	22.90	1.60	6.00	Área prod. total		11174	25723	5140	2758
	No. De cultivos/año	1	1	2	2	Rendimiento de residuos		1.48	47.68	0.57	1.28
	Área de prod. Total	15,643	589,065	16,449	33,094	biogás 100%		16508	1226512	2917	3542
Norte de Santander	cultivo	M1	M2	M3	M4	Datos/cultivo		M1 - cascarilla	M2 - follaje	M3 - cascarilla	M4 - tallos
	rendimiento	0.60	16.20	1.80	6.00	Área prod. total		15588	33112	2896	951
	No. De cultivos/año	1	1	2	2	Rendimiento de residuos		0.63	33.73	0.64	1.28
	Área de prod. Total	9353	536407	10427	11409	biogás 100%		9870	1116871	1849	1221
Sucre	cultivo	M1	M2	M3	M4	Datos/cultivo		M1 - cascarilla	M2 - follaje	M3 - cascarilla	M4 - tallos
	rendimiento	3.6	12.2	1.2	6	Área prod. total		3	3.039	3.035	3.682
	No. De cultivos/año	1	1	2	2	Rendimiento de residuos		3.80	25.40	0.43	1.28
	Área de prod. Total	10	37074	7285	44182	biogás 100%		11	77193	1292	4729

Fuente: Elaboración propia. Nota: (1) Datos obtenidos de la Encuesta Nacional Agropecuaria 2016, DANE. (2) datos obtenidos con la Calculadora BEFS (FAO).

Donde se identifican los diferentes sustratos así: M1: café; M2: palma aceitera, M3: maíz, M4: yuca, M5: cebada, M6: arroz y M7: algodón; se utilizó entonces la calculadora, obteniendo que el cultivo con mayor rendimiento para la región Norte es la palma aceitera; para el caso de San Andrés no se tienen datos registrados por el Departamento Nacional de Planeación; por lo tanto, se sugiere la implementación de biodigestores en relleno sanitario. El potencial de biogás arrojado por la calculadora de la FAO en el departamento del Atlántico indica que el cultivo de yuca constituye el mayor generador de biogás con un estimado de 4.000 toneladas anuales; mientras que en el resto de la región la palma aceitera es el cultivo con mejores características generadoras de biogás. Para el sector bolivarense, el cultivo con mayor rendimiento de biogás es la palma de aceite proyectando 538.773 ton/ha; por otro lado, el departamento del Cesar cuenta con más de 730.000 hectáreas que producirían potencialmente 1,5 millones de ton/has.

En los territorios de Córdoba, el maíz tiene una mayor cantidad de hectáreas sembradas, pero se proyecta un mejor rendimiento de biogás con la palma de aceite; en La Guajira sucede igual. En los municipios del Magdalena, el cultivo con mayor superficie sembrada y con mayor producción potencial de biogás es la palma de aceite; lo mismo sucede en el Norte de Santander; mientras que en Sucre a pesar de que la yuca es el cultivo con mayor cantidad de hectáreas sembradas sigue siendo la palma aceitera el de mayor potencial de producción de biogás.

Modelo 2. Factores determinantes de la Emisión de Gas Metano (CH_4) con Logaritmo natural

Para el planteamiento del modelo de regresión múltiple se utilizaron datos de todos los departamentos del país, aplicándoles logaritmo natural a las variables de entrada de la Tabla 35 (como dependiente: $Y = \ln$ de gas metano ($\ln CH_4$)) y como variables independientes, $X1$: \ln de Cantidad de residuos sólidos orgánicos ($\ln QRS_o$), y $X2$: \ln % de rellenos sanitarios ($\ln PRS_a$); utilizando el software estadístico Statgraphics,

donde se aplicó análisis multivariado y una prueba T de Student, empleando una matriz de correlación con un análisis de varianza.

Según estudios del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), realizados por: Guido, et al. (1997), y estudios de la Universidad de Antioquia, realizados por: Jaramillo y Zapata (2008), la fracción de los Residuos Sólidos orgánicos (RSo) en Colombia es de 52,3 % de los residuos sólidos totales, así mismo se estima para el año 2016 del estudio.

El modelo se especifica de la siguiente forma:

$$\ln Y_i = \ln \beta_i X_i + u_i \tag{4}$$

$$\ln CH_4 = \beta_1 \ln PRS_o + \beta_2 \ln PRS_a + u \tag{5}$$

Con el objeto de analizar el comportamiento estadístico, en este proceso se determinaron los datos atípicos, con el fin de darle ajuste al modelo y obtener una buena predicción de este; inicialmente se planteó, entonces, el modelo con datos de 29 departamentos, adicionalmente se excluyeron 3 datos atípicos correspondientes a los 3 departamentos más industrializados de Colombia, que distorsionan el modelo, puesto que emiten más porcentaje de CH₄ al medioambiente; para este caso se utilizó el software estadístico Statgraphics a las variables de estudio identificadas en cada departamento de la región Norte y Centro de Colombia; para identificar el grado de significancia y establecer el nivel de confiabilidad de los datos obtenidos de la base del Departamento Nacional de Estadísticas DANE.

Tabla 35. Datos con logaritmos de entrada de la contaminación atmosférica y sus factores

No.	Departamentos	CH4	PRSA	QRSO	LCH4	LQRSO	LPRSA
1	Boyacá	14,37	92,48	225,83	2,67	5,42	4,53
2	Caldas	18,5	99,23	299,57	2,92	5,70	4,60

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

3	Huila	15,95	97,13	221,39	2,77	5,40	4,58
4	Quindío	20,56	100	230,64	3,02	5,44	4,61
5	Risaralda	23,66	100	217,57	3,16	5,38	4,61
6	Santander	16,87	96,4	529,28	2,83	6,27	4,57
7	Tolima	20,25	94,4	328,44	3,01	5,79	4,55
8	Atlántico	11,4	97,3	505,22	2,43	6,22	4,58
9	Bolívar	16,59	78,2	528,75	2,81	6,27	4,36
10	Cesar	36,77	83,7	216,99	3,60	5,38	4,43
11	Córdoba	33,28	67,7	329,71	3,50	5,80	4,22
12	La Guajira	45,2	3,4	156,59	3,81	5,05	1,22
13	Magdalena	27,04	90,38	250,46	3,30	5,52	4,50
14	Norte de Santander	18,11	98,7	382,52	2,90	5,95	4,59
15	San Andrés	8,94	100	40,40	2,19	3,70	4,61
16	Sucre	35,46	89	166,78	3,57	5,12	4,49
17	Meta	12,06	99	2,38	2,49	0,87	4,60
18	Casanare	32,61	99,63	0,96	3,48	-0,05	4,60
19	Arauca	24,08	83,86	0,37	3,18	-1,00	4,43
20	Vichada	7,64	100	0,03	2,03	-3,37	4,61
21	Chocó	4,34	10	0,50	1,47	-0,70	2,30
22	Nariño	9,05	18,75	4,67	2,20	1,54	2,93
23	Cauca	14,8	32,5	1,73	2,69	0,55	3,48
24	Amazonas	0,46	4,8	0,14	-0,78	-1,96	1,57
25	Caquetá	6,61	75	0,86	1,89	-0,15	4,32
26	Guainía	1,04	0	0,67	0,04	-0,40	0
27	Vaupés	0,14	63,3	0,01	-1,97	-4,72	4,15
28	Guaviare	2,35	91,5	0,13	0,85	-2,06	4,52
29	Putumayo	4,81	83,05	0,37	1,57	-0,99	4,42

Fuente: Cálculo con base a estadísticas del DANE

Para estos efectos, el modelo permitirá determinar parámetros de reducción de gases de efecto invernadero generados en los rellenos sanitarios, es decir, si se disminuye el porcentaje de residuos generados en Colombia, a través de prácticas de

segregación en la fuente en los planes de manejo integral de residuos municipales, por medio de prácticas en los sectores urbanos, como reducir, reciclar y reutilizar, se disminuiría la tasa de incidencia en la producción de CH₄; de igual manera, al incrementarse la construcción de áreas de disposición de rellenos sanitarios, incidiría positivamente en la emisión de gases invernadero.

Tabla 36. Tabla ANOVA del modelo de los factores determinantes de la emisión de metano

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
LPRSA	0,538342	0,0926292	5,8118	0,0000
LQRSO	0,55854	0,088556	6,30719	0,0000

Fuente: Cálculo con base al DANE y el programa Statgraphics

En la Tabla 36, se muestran los resultados esperados, dado que existe una relación positiva entre las variables, es decir: un aumento de un Porcentaje de Relleno Sanitario (PRSA) genera un aumento de 53.83 % en la emisión de gases de metano, CH₄, así mismo, hay una relación directa con la variación de las cantidades de residuos sólidos orgánicos (QRSO), debido a que su valor fue inferior a 0,05. El resultado del modelo de regresión es la siguiente ecuación:

$$\text{LnCH}_4 = 0,538342 * \text{LnPRSA} + 0,55854 * \text{LnQRSO} \quad (6)$$

En este modelo se muestran los resultados esperados, dado que existe una relación positiva entre las variables, es decir: un aumento de un porcentaje de relleno sanitario genera un aumento de 0.5383 en la emisión de gases de metano, CH₄, así mismo, hay una relación directa con la variación de las cantidades de residuos sólidos orgánicos.

Tabla 37. Análisis de Varianza del modelo de metano

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	513,82	2	256,91	103,56	0,0000
Residuo	64,4974	26	2,48067		
Total	578,317	28			

- R-cuadrada = 88,8474 por ciento
- R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 88,4185 por ciento

Fuente: Cálculo con base al DANE y el programa Statgraphics

Por su parte, la prueba F de identificación conjunta, también resultó significativa al 99 %, el R^2 muestra un resultado robusto, donde las variables independientes explicaron en un 88,84 % el modelo de emisión de gases de metano CH₄. Por otro lado, no existe problema de normalidad, autocorrelación, heterocedasticidad, multicolinealidad y de estabilidad del modelo, mediante las pruebas de Jarque Bera, Kolmorov, Durbin Watson, Breusch Godfrey, White, matriz de correlación, inflador de varianza y pruebas Cusum de estabilidad del modelo de los errores, realizados con los programas actuales statgraphics y e-views.

Tabla 38. Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes

	LPRSA	LQRSO
LPRSA	1,0000	-0,6453
LQRSO	-0,6453	1,0000

Fuente: Cálculo con base al DANE y el programa Statgraphics

En la Tabla 38, se cumple la prueba de multicolinealidad, dado que las variables no se explican independientemente más del 80 %, sino que menos de este, lo cual muestra una baja dependencia y de correlación entre las variables de estudio; y en la Tablas

39 y 40, no se rechaza el supuesto de normalidad, obteniéndose un valor-P mayor de 5 % para la prueba de Shaphiro-Wilk y de 46,61 %, muy por encima del 5 %, en la prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Tabla 39. Pruebas de Normalidad de Shaphiro-Wilk para el modelo 2 de metano

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,92755	0,0539871

Fuente: Cálculo con base al DANE y el programa Statgraphics

Tabla 40. Prueba de Kolmogorov-Smirnov

	Normal
DMAS	0,158801
DMENOS	0,155405
DN	0,158801
Valor-P	0,466128

Fuente: Cálculo con base al DANE y el programa Statgraphics

Modelo 3. Factores determinantes de la Emisión de Gas Metano (CH₄) sin Logaritmo natural

Se mejoró el modelo 2 del metano, sin logaritmo natural, utilizando las variables de entrada de la Tabla 35, donde se tiene como variable dependiente: Y = Gas Metano (lnCH₄) y como variables independientes, X1: Cantidad de residuos sólidos orgánicos (QRSo), y X2: % de rellenos sanitarios (PRSa); utilizando el software estadístico Statgraphics, donde se aplicó el análisis multivariado y una prueba T de Student, empleando una matriz de correlación con un análisis de varianza.

Según estudios del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), realizados por: Guido, et al. (1997), así como otros estudios, tales como: los del DNP (2004) y estudios de la Universidad de Antioquia, realizados por: Jaramillo y Zapata (2008), la fracción de los residuos sólidos

orgánicos (RSo) en Colombia es de 52, 3% de los residuos sólidos totales, así mismo se estima para el año 2016 del estudio.

El modelo se especifica de la siguiente forma:

$$Y_i = \beta_i X_i + u_i \quad (7)$$

$$CH_4 = \beta_1 QRS_o + \beta_2 PRS_a + u \quad (8)$$

Tabla 41. Tabla ANOVA del modelo de los factores determinantes de la emisión de metano

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
PRSA	0,1474	0,0415401	3,54837	0,0014
QRSO	0,0232732	0,0142573	1,63237	0,1142

Fuente: Cálculo con base al DANE y el programa Statgraphics

En la Tabla 41, se muestran los resultados esperados del modelo, dado que existe una relación positiva entre las variables, es decir: un aumento de un Porcentaje de Relleno Sanitario (PRSa) genera un aumento de 0.1474 en la emisión de gases de metano, CH₄, así mismo, hay una relación directa con la variación de las cantidades de residuos sólidos orgánicos (QRSo), siendo la variables PRSa, la más significativa, debido a que su valor fue inferior a 0,05, mientras que la otra variable QRSo, fue significativa al 90 %. El resultado del modelo de regresión es la siguiente ecuación:

$$CH_4 = 0,1474 * PRS_a + 0,0232732 * QRS_o \quad (9)$$

En este modelo se muestran los resultados esperados, dado que existe una relación positiva entre las variables, es decir: un aumento de un porcentaje de relleno sanitario genera un aumento de 0.1474 en la emisión de gases de metano, CH₄, así mismo, hay una relación directa con la variación de las cantidades de residuos sólidos orgánicos, dada su fracción de residuo orgánico del 52,3 %, estimado para Colombia.

Tabla 42. Análisis de Varianza del modelo de metano

Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	7876,37	2	3938,19	25,63	0,0000
Residuo	4148,75	27	153,657		
Total	12025,1	29			

- R-cuadrada = 65,4993 por ciento
- R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 64,2215 por ciento

Fuente: Cálculo con base al DANE y el programa Statgraphics

Por su parte, la prueba F de identificación conjunta, también resultó significativa al 99 %, el R^2 muestra un resultado robusto, donde las variables independientes explicaron en un 65,49 % el modelo de emisión de gases de metano CH₄. Por su parte, no existe problema de normalidad, autocorrelación, heterocedasticidad, multicolinealidad y de estabilidad del modelo, mediante las pruebas de Jarque Bera, Kolmorov, Durbin Watson, Breusch Godfrey, White, matriz de correlación, inflador de varianza y pruebas Cusum de estabilidad del modelo de los errores, realizados con los programas actuales statgraphics y e-views.

Tabla 43. Matriz de Correlación para las estimaciones de los coeficientes

	QRSO	PRSA
QRSO	1,0000	-0,7327
PRSA	-0,7327	1,0000

Fuente: Cálculo con base al DANE y el programa Statgraphics

En la Tabla 43, se cumple la prueba de multicolinealidad, dado que las variables no se explican independientemente más del 80 %, sino que menos de este, lo cual muestra una baja dependencia y de correlación entre las variables de estudio; y en la Tabla 44 y 45, no se rechaza el supuesto de normalidad, obteniéndose un valor-P de

21,13 %, muy por encima del 5 % en la prueba de Shaphiro y de bondad de ajuste fue de 95,30 % en la prueba de Kolmogorov.

Tabla 44. Pruebas de Normalidad de Shaphiro-Wilk

Prueba	Estadístico	Valor-P
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,950178	0,211321

Fuente: Cálculo con base al DANE y el programa Statgraphics

Tabla 45. Prueba de Bondad de Ajuste y Normalidad de Kolmogorov-Smirnov para CH₄

	Normal
DMAS	0,0957488
DMENOS	0,083089
DN	0,0957488
Valor-P	0,953064

Fuente: Cálculo con base al DANE y el programa Statgraphics

PROPUESTA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAEROBIOS EN LA REGIÓN NORTE DE COLOMBIA

Con base en lo explicado anteriormente, se proponen los siguientes pasos distribuidos en el factor cultural, técnico y ambiental, económico, legal y político, para la implementación en la zona Norte; los aspectos que se recomiendan para la implementación masiva de proyectos de biogás se identifican a continuación y corresponden a la priorización de acciones, sectorizando la población objetivo en zonas rurales y rellenos sanitarios; siendo determinantes las personas involucradas en los procesos, la legislación colombiana y documentación técnica necesaria para su realización así como los recursos que requieren cada uno de ellos; se infiere, además, la meta o salida de cada acción ejecutada:

Factor Cultural

- Plan de educación para generadores de residuos desde la fuente (doméstico, rural e industrial), teniendo en cuenta la norma técnica colombiana “Segregación en la fuente según la Guía Técnica Colombiana (GTC-24)”; el Proyecto de Acuerdo 071 de 2010 y atendiendo las sanciones ambientales y participación activa de las corporaciones, el ANLA y el Ministerio de Ambiente.



Figura 22. Plan de educación

Fuente: Elaboración propia

- Establecer el proceso de recolección y transporte; teniendo en cuenta las condiciones socio-culturales de la región Norte de Colombia, se incorpora el concepto del reciclador estructurando un modelo de participación dentro del proceso antes y después de la recolección.



Figura 23. Mesas de trabajo

Fuente: Elaboración propia

- Implementación de campañas de promoción de biodigestores de acuerdo a la caracterización de residuos sólidos elaborada por las empresas prestadoras de servicio y entidades gubernamentales; a través de la secretaría de medioambiente de cada departamento; involucrando a proveedores de servicios de biodigestores.



Figura 24. Organización promoción de proyecto

Fuente: Elaboración propia

- Caracterización de la población de cada departamento a nivel urbano y rural para las variables: ingresos, cultivos, servicio de gas domiciliario, disposición final de residuos sólidos; para priorizar necesidades y proyectos relacionados.



Figura 25. Caracterización de población

Fuente: Elaboración propia

- Elaboración de cartillas y herramientas digitales para instalación, mantenimiento y operación de biodigestores tipo chino tubular (para sector rural y rellenos sanitarios).



Figura 26. Cartillas

Fuente: Elaboración propia

- Integración con entidades como RedBioCol, SENA y Universidades para demostración de implementación de proyectos; promoción y mercadeo de los biodigestores.



Figura 27. Jornadas de promoción y divulgación

Fuente: Elaboración propia

- Selección inicial de proyectos pilotos en cada departamento de la región Norte de acuerdo a las condiciones de favorabilidad de obtención de biogás, aplicando modelo colombiano para rellenos sanitarios y el modelo

propuesto en este trabajo de grado; capacitación a usuarios finales (familias en el sector rural y empresas del sector productivo para rellenos sanitarios); control y seguimiento del proyecto.



Figura 28. Implementación de proyectos
 Fuente: Elaboración propia

Factor Técnico y Ambiental

- Mesas de trabajo regionales con entidades públicas y privadas del sector, que incluya la participación de los proveedores de tecnologías de biodigestores, en donde se establezca caracterización de la región Norte con identificación de biodigestores recomendados para la zona y de acuerdo a la capacidad de generación de residuos.

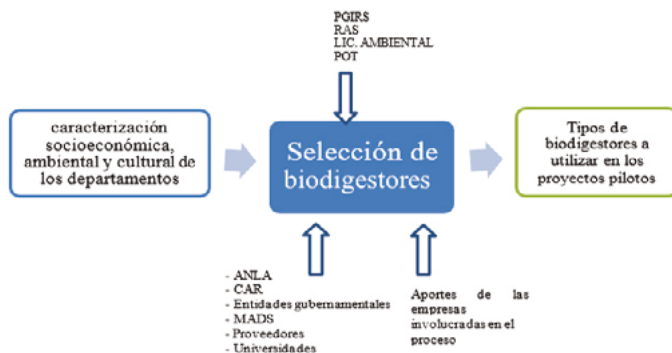


Figura 29. Selección de biodigestores
 Fuente: Elaboración propia

- Análisis técnico y ubicación geográfica para rellenos sanitarios de acuerdo al POT y Ley 388/1997; Diseño de infraestructura según el decreto 1713 de 2002. Mientras que para el sector rural evaluación de las condiciones del terreno por la comisión delegada de las mesas de trabajo del sector productivo.

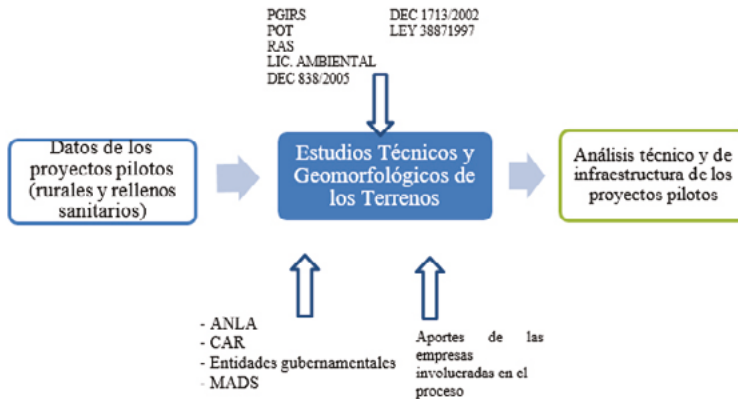


Figura 30. Estudios técnicos

Fuente: Elaboración propia

Estudios de evaluación de impacto socioambiental elaborado por las corporaciones autónomas de cada departamento



Figura 31. Análisis de factores

Fuente: Elaboración propia

- Aplicación para cada proyecto del modelo de estimación de gases de efecto invernadero desarrollado en este trabajo para casos de proyectos en rellenos sanitarios.

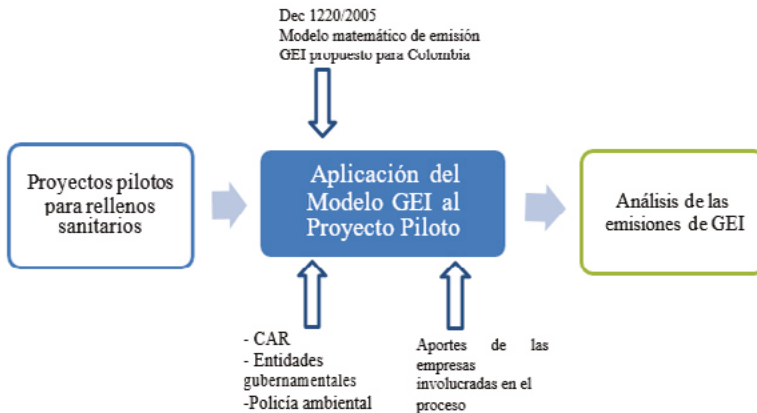


Figura 32. Aplicación modelo GEI

Fuente: Elaboración propia

- Elaboración de cursos intensivos de construcción, implementación y control de biodigestores a usuarios finales.



Figura 33. Cursos especializados

Fuente: Elaboración propia

- Selección del tipo de biodigestor de acuerdo a la cantidad y composición de los residuos sólidos generados. Proceso de captación del metano y producción del biogás.



Figura 34. Selección de biodigestores

Fuente: Elaboración propia

- Visitas de control y seguimiento a los proyectos para verificar y brindar realimentación.



Figura 35. Auditoría y control

Fuente: Elaboración propia

Factor Económico

- Análisis del mercado sectorial demanda y oferta, para toma de decisiones de aplicaciones del biogás y tratamiento de purificación del mismo; identificando los productos y servicios finales (biocombustible, biol).

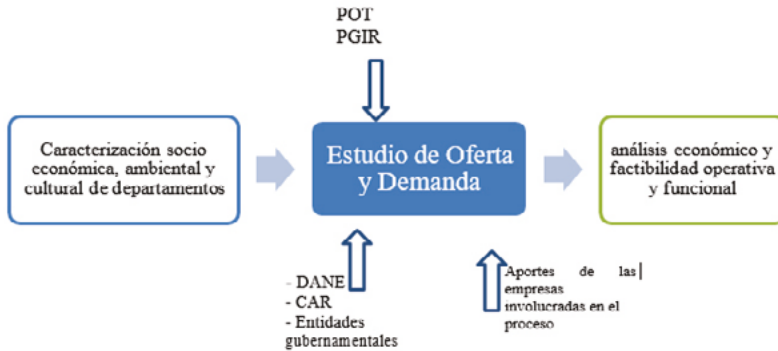


Figura 36. Estudio de oferta y demanda

Fuente: Elaboración propia

- Consolidación de proyectos de financiación a través de créditos para implementación de biodigestores en el sector rural y cofinanciación para rellenos sanitarios.

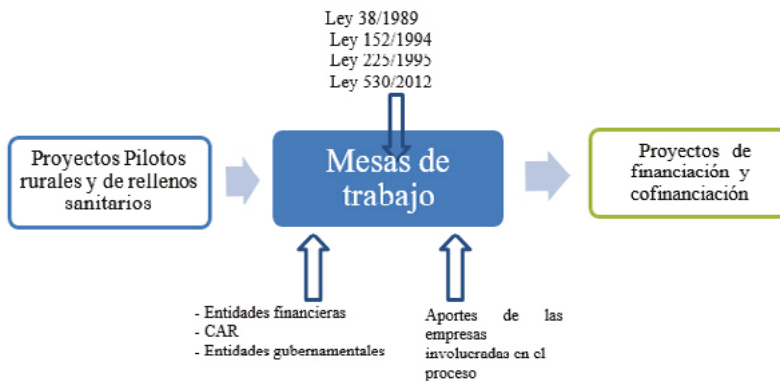


Figura 37. Mesas de trabajo

Fuente: Elaboración propia

- Elaboración de estudios de cada proyecto piloto en cuanto a estimación del potencial de biogás esperado para tomar decisiones sobre la inversión y uso del producto final.

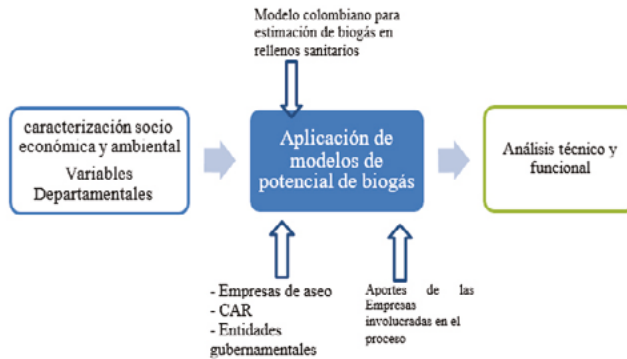


Figura 38. Aplicación modelos de biogás

Fuente: Elaboración propia

- Conformación de equipos de trabajo liderados por las secretarías de medioambiente de cada departamento asignando para cada proyecto piloto roles como: director del proyecto, asesor, ejecutores, supervisores técnicos, entre otros.



Figura 39. Equipos de trabajo

Fuente: Elaboración propia

Factor legal y político

- Diseño y elaboración de un programa nacional de implementación de biodigestores liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible y la Unidad de Planeación Minero-Energética.



Figura 40. Diseño

Fuente: Elaboración propia

130

- Determinar una herramienta que permita agilizar y fortalecer el proceso de trámites y licencias ante las entidades responsables: ANLA, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Corporaciones Autónomas Regionales, entre otras; consolidando así una hoja de ruta clara y sencilla en especial para el sector rural.

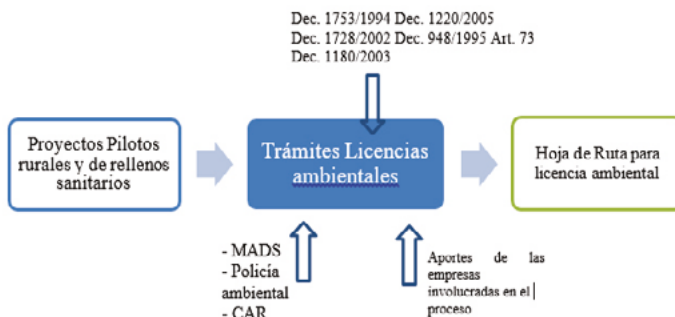


Figura 41. Trámites licencias

Fuente: Elaboración propia

- Consolidar un censo de familias rurales que puedan ser beneficiadas con la implementación de los proyectos de biodigestores.

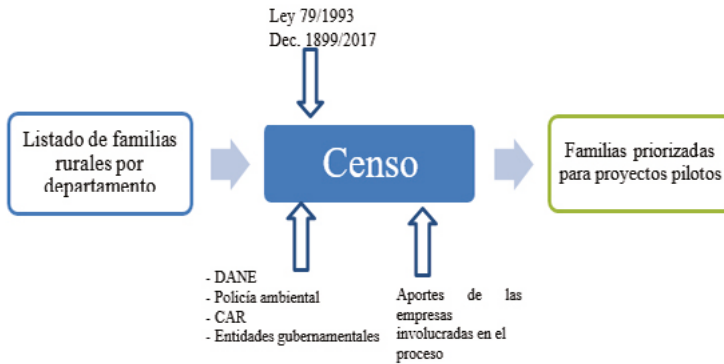


Figura 42. Censo

Fuente: Elaboración propia

- Hacer uso de las organizaciones campesinas existentes en las zonas con el fin de aprovechar los canales de comunicación y estructuras jerárquicas ya establecidas.



Figura 43. Mesas de trabajo campesinos

Fuente: Elaboración propia

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS
 reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
 de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

- Generar reconocimiento en esquema de pagos por servicios ambientales a quienes implementen estos proyectos.

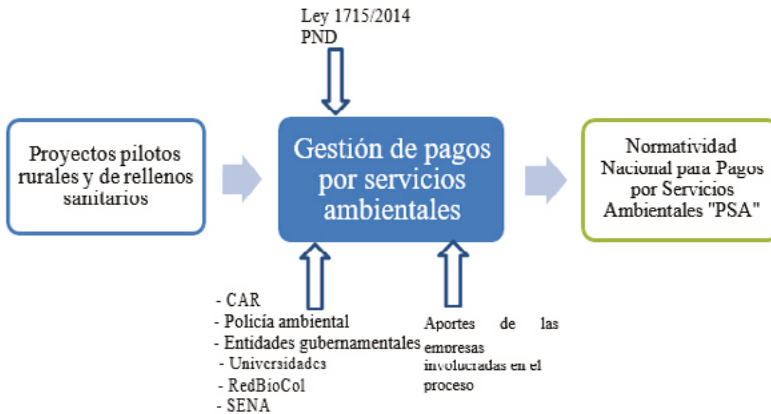


Figura 44. Gestión de pagos

Fuente: Elaboración propia

- Creación de empresas de economía solidaria para agremiar y favorecer a los habitantes controles como recicladores.



Figura 45. Creación de empresas

Fuente: Elaboración propia

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Dentro del análisis realizado a los tipos de biodigestores, el que más se adapta para la región Norte es el tubular, por sus características, bajo costo de las materias primas e insumos, fácil instalación y ubicación estratégica dentro del predio rural; también representa una alternativa para reducir los impactos ambientales de la población campesina, como la contaminación, reducción de la tala y deforestación, dado que pueden ser utilizados como fuente de energía para la cocina, evitando la afectación de la salud de las familias rurales, convirtiéndose en una alternativa para reducir el cáncer de pulmón de esta población. Mientras que para el sector urbano se recomienda el biodigestor hindú de cúpula flotante, por el sistema de carga continua y mejor aprovechamiento de los residuos.
2. Los parámetros técnicos de la región Norte ideales para el establecimiento de este tipo de proyectos y de negocios verdes, como son; La temperatura, la humedad, la disponibilidad de sustratos o desechos agrícolas, diversidad de actividades económicas en los diversos municipios donde se pueden utilizar los residuos de las cadenas productivas agrícolas y pecuarios. Se puede establecer una proyección de biogás de aproximadamente 2.154

lts/día para estiércol de cerdo y pulpa de yuca y por otro lado 6.169 lts/día con estiércol de vaca y residuos de comida.

3. De acuerdo a la disposición de residuos en la zona Norte se puede apropiar la tecnología de biodigestores anaerobios tipo cúpula flotante en las áreas de rellenos sanitarios para la generación de gas metano, con el tratamiento y aprovechamiento de estos residuos.
4. Dentro de la metodología propuesta se considera que es necesario tomar acciones referente al tema de priorización de estos proyectos dentro de los Planes de gestión integral de residuos sólidos, planes de ordenamiento territorial, planes de acción trienal; puesto que analizados los documentos legales existente de cada corporación autónoma responsable en los municipios de la región norte no evidencian líneas priorizadas para la implementación de fuentes no convencionales de tratamiento y aprovechamiento de energía como los biodigestores.
5. No existen programas y políticas de educación ambiental para todos los departamentos de la región Norte, lo cual limita la accesibilidad de los generadores de residuos sólidos a hacer prácticas de segregación en la fuente, tratamiento y aprovechamiento de residuos; así como tampoco hay estrategias, como las bolsas de reciclaje por colores.
6. El tratamiento estadístico multivariante de los datos obtenidos del Departamento Nacional de Estadísticas arrojó dos variables dependientes, la primera relacionada con las megatoneladas de CH_2 y la segunda con la cantidad de residuos sólidos, quedando expresado los modelos de las siguientes maneras: Modelo 1 Factores determinantes de la Emisión de CO_2 :

$$Y = 0,662218 + 0,000397673 * X1 + 0,00296704 * X2 - 0,00645122 * X3 - 0,00692569 * X4$$

Se planteó el modelo 2, el cual es la plantilla de partida de la emisión de gas metano CH_4 .

$$\ln CH_4 = 0,538342 * \ln PRSa + 0,55854 * \ln QRSO.$$

Este modelo se expresa con el logaritmo natural de los datos porcentuales, muestra el aprovechamiento de los factores determinantes para la reducción de gases de metano en la atmósfera de los departamentos de Colombia donde todas las variables incluyendo la de CO_2 explican positivamente la variación de la emisión del gas metano; mientras que el primer modelo la cantidad de botaderos a cielo abierto y las celdas transitorias, así como los sitios de disposición inadecuados se expresan de manera positiva en las emisiones de CO_2 y en el segundo modelo en la medida que se instalan infraestructuras de disposición de rellenos sanitarios se propicia la mejor producción de metano para cualquiera de los usos de disposición final. Ambos modelos se expresan significativamente con las variables predictoras.

Se asume que la fracción orgánica de residuos sólidos en Colombia, de acuerdo con el BID y la OPS corresponde a un 52,3 % de los residuos municipales, para lo cual se plantea un tercer modelo que arroja incidencia directa de la cantidad de residuos sólidos orgánicos con relación a la cantidad de metano, existe una relación positiva entre las variables, es decir: un aumento de un porcentaje de relleno sanitario (PRSa) genera un aumento de 0.1474 en la emisión de gases de metano, CH_4 , así mismo, hay una relación directa con la variación de las cantidades de residuos sólidos orgánicos (QRSO). El resultado del modelo de regresión sin logaritmo es la siguiente ecuación:

$$CH_4 = 0,1474 * PRSa + 0,0232732 * QRSO$$

En este tercer modelo, se plantea el modelo 2 sin logaritmo, el cual mejora los supuestos o pruebas estadísticas y muestran los resultados esperados, por lo tanto, sustenta la aplicabilidad de los biodigestores tipo cúpula flotante para el sector urbano de la región Norte de Colombia.

El liderazgo institucional territorial hacia la innovación, vista desde todas las entidades involucradas (CAR, Alcaldías, Gobernaciones) es escaso, por no decir inexistente, para lo cual se sugiere el proceso de articulación en la metodología propuesta.

Con respecto a la proyección de producción potencial de biogás con la calculadora de la FAO, fundamenta el uso de los biodigestores para el sector agrícola o clúster productivos de la región rural, el cultivo con mayor potencial de biogás para aprovechamiento del follaje en la región Norte es la palma de aceite. Se encontró que el factor cultural es el más determinante en la no implementación de proyectos de biodigestión en esta región, dado que no se priorizan en los PGR municipales, ni existen en los Planes de ordenamiento territorial acciones que permitan planear, ejecutar, desarrollar, inspeccionar, controlar y supervisar la generación de biogás con residuos sólidos. Por otra parte, se puede apreciar en las Figuras 26 y 32, que ninguna Institución de Educación Superior (Universidades, Corporaciones, SENA, entre otras) se ha articulado a las entidades territoriales para la ejecución de este tipo de proyectos. No existen programas y políticas de educación ambiental para todos los departamentos de la región Caribe, y si los hay no se les hace control, seguimiento y retroalimentación.

Respecto a la población de la región Caribe, no han recibido la educación para el aprovechamiento de los residuos sólidos generados en las viviendas, fundamentación que debe recibirse desde la educación básica primaria hasta la universitaria, como se especifica en la Figura 12.

La disponibilidad e inversión económica hacia los negocios verdes en muchos de los departamentos caribeños no ha sido priorizada, situación que involucra la falta de implementación de proyectos con biodigestores. El liderazgo institucional territorial hacia la innovación, vista desde todas las entidades involucradas (CAR, Alcaldías, Gobernaciones) es escaso, por no decir inexistente, para lo cual se sugiere el proceso de articulación en la metodología propuesta.

En relación a las ventajas que lleva la región Central se ven relacionadas con el apoyo que tienen de las entidades que en esta investigación se mencionaron, como: RedBioCol, Alcaldías, Fundaciones Agrícolas, Universidades de la región; las cuales en común pretenden propiciar el mejoramiento económico y ambiental; situación que permite reafirmar la necesidad de que las empresas líderes de la Región Norte visionen la oportunidad de generar mecanismos sostenibles de desarrollo energético renovable.

Otro aspecto a considerar en la implementación de los biodigestores en la región Norte, está relacionado con las condiciones culturales, sociales, económicas y productivas de la región, debido a que para llegar a la etapa de aprovechamiento en cualquier proyecto deben surtirse una serie de etapas dentro de las cuales se encuentra la falencia en el proceso de recolección de residuos sólidos, que en la región Caribe más del 50 % de los departamentos que lo integran no cumplen totalmente con ello.

A pesar que la región caribe presenta condiciones óptimas de temperatura, el grado de implementación y conocimiento de estas tecnologías es poco o nulo, por lo tanto, se recomienda afianzar las estrategias y priorizar acciones en los planes de gestión integral municipales de los departamentos de la zona caribe colombiana para integrarse a la red latino americana de aprovechamiento de residuos a través de biodigestores.

El uso y empleabilidad de la tecnología de biodigestores representa una solución a la mitigación de emisiones de gases efecto invernadero a nivel municipal y rural en las dos regiones, en cuanto a lo social contribuiría en reducir las enfermedades respiratorias agudas por la sustitución del carbón de leña y la madera como fuente de energía. Dentro de los beneficios del uso de biodigestores, se encuentra la minimización de aspectos e impactos ambientales como la tala, deforestación y consecuente pérdida del recurso hídrico por actividades antrópicas.

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

La falta de alianzas estratégicas entre entes territoriales, empresa privada y población rural de la región Caribe pone de manifiesto la individualización de beneficios y la poca posibilidad de la población a la incorporación de estas tecnologías a su vida cotidiana. Por otra parte, no existen incentivos locales a nivel económico o tributario que fomenten desde el generador hasta el gran productor la implementación de estos proyectos. Tanto así que la población no tiene fácil acceso a las bolsas de reciclaje por colores, lo que beneficiaría la separación de residuos desde el origen y el aprovechamiento de los mismos.

La ausencia de políticas estatales para regular el mercado del uso de biogás es una de las barreras a las que se enfrenta este sector; para lo cual las entidades responsables deberán generar políticas de estado tales como: incentivos, tributos o impuestos con destinación específica sancionando a aquellos que contribuyan a causar problemas ambientales relacionados con la disposición inadecuada de residuos sólidos.

138

No existen datos estadísticos actualizados sobre la generación de residuos sólidos a nivel departamental, por lo cual se recomienda la formación de alianzas estratégicas entre los sectores productivos, las corporaciones autónomas y universidades para la investigación al respecto.

El bajo compromiso de las instituciones para difundir estas tecnologías; y la poca capacitación y educación de los habitantes de la región norte para el autoaprendizaje es muy notorio. Por lo cual debe sensibilizarse en este tipo de modelo de aceptación tecnológica estas alternativas de aprovechamiento energético.

REFERENCIAS

- Alcaldía de Arjona (2005). *Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. PGIRS.
- Arjona Alcaldía de Neiva (mayo de 2013). *Reformulación Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos*. Neiva, Huila.
- Asamblea Departamental de Córdoba (2016). *Plan de Desarrollo Departamental 2016-2019*. Córdoba: “Unidos por Córdoba”.
- Aseo Urbano SAS (2017). *Aseo Urbano*. [en línea] Disponible en: <http://www.aseourbano.com.co/>
- Banco de la República (2013). *Ensayos sobre Economía Regional*. [en línea] Disponible en: http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/eser_53_caribe_2013.pdf [Consultado el 8 de mayo de 2017].
- Barradas Rebolledo, A. (2009). *Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales*. [en línea] Veracruz. Disponible en: http://oa.upm.es/1922/1/Barradas_MONO_2009_01.pdf [Consultado el 25 de mayo de 2017].
- Bautista Buhigas, A. (2010). Sistema biodigestor para el tratamiento de desechos orgánicos. *Repositorio Institucional de la Universidad Carlos III de Madrid*, 62.

Bhattacharya, S., Junfeng, L., Runqing, H., Yanqin, S., Jingli, S. & Abdul Salam, P. (2005). *Assessment of sustainable energy potential of non-plantation biomass resources in China*. Issue 3, Volume 29.

BID. (2017). *Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico*. [en línea] Disponible en: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8202/Generacion-de-electricidad-a-partir-de-biogas-capturado-de-residuos-solidos-urbanos-Un-analisis-teorico-practico.PDF?sequence=1>

Bogota Torres, J., Díaz Ricardo, S. Y. & Ramos Ocampo, P. (2008). *Montaje y puesta en marcha de dos biodigestores anaerobios con residuos orgánicos generados en la central de mercado “Plaza Kennedy” en Bogotá*. [en línea] Disponible en: http://oab2.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a-889ca266ee6533c26f970cb14a/Montaje_Biodigestores_Plaza_Mercado_Kennedy.pdf

Bridgewater, A. & Bridgewater, G. (2008). *Energías alternativas*. Handbook.

Cabildo Miranda, M., Claramunt Vallespi, R., Cornago Ramirez, M., Escolástico León, C. Parainfo.

Esteban Santos, S., Farrán Morales, M., . . . Pérez Esteban, J. (2008). *Reciclado y Tratamiento de Residuos*. Uned.

Cabrera Orellana, K. M. (Diciembre de 2010). *Estudio cinético de la Digestión Anaerobia de Mezclas de Desechos de Fruta*. [en línea] Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/746/1/98062.pdf>

Campos, B. (junio de 2011). *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. [en línea] Disponible en: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542011000200007

Carder. (2016). *Plan de Acción "Risaralda Biodiversa Sostenible y en Paz"* 2016-2019. Risaralda

Carsucre. (2017). *Plan de acción 2016-2019*. Sucre

Cendales Ladino, E. D. (2011). *Producción de biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino para su utilización como fuente de energía renovable*. [en línea] Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4100/1/edwindariocendalesladino.2011.parte1.pdf>

Chacón Leite, H. A. & Tulcán Melo, S. S. (2012). *Caracterización y cuantificación de residuos en la Fundación Zoológico de Cali y generación de procesos de cambio en torno al Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS)*. [en línea] Disponible en: https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/68070/5/caracterizacion_cuantificacion_residuos.pdf

Chingono, T. & Mbohwa, C. (2016). Social and environmental impact for sustainable biogas production by the city of Johannesburg. Proceedings of the 2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (pp.1047-1050). Detroit, Michigan, USA. [en línea] Disponible en: <http://ieomsociety.org/ieomdetroit/pdfs/299.pdf>

Colmenares Mayanga, W. & Santos Bonilla, K. (2007). *Generación y manejo de gases en sitios de disposición final*.

Condorchem Envitech. (2017). [en línea] Disponible en: <http://blog.condorchem.com/tratamiento-del-biogas/>

Congreso de Colombia. (22 de diciembre de 1993). *Ley 99 de 1993*. Bogotá.

Congreso de Colombia. (2014). *Ley 1715 Integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional*. Bogotá, Colombia.

- Conpes. (2016). *Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos*.
- Contraloría General de la República. (agosto de 2016). *Informe sobre el estado de los recursos naturales y del ambiente*.
- Corpocaldas. (2016). *Plan de Acción Institucional 2016-2019*.
- Caldas CorpoCesar. (2017). *Corporación autónoma regional del Cesar*. Cesar.
- CORPOCESAR, & CNPMLTA . (2013). Diagnóstico de Producción y Consumo Sostenible (PYCS) en la Jurisdicción de CORPOCESAR. Cesar.
- Corponor. (2017). *Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental*. Norte de Santander: "Corponor".
- Cortolima. (2013). *Plan de Gestión Ambiental Regional del Tolima*.
- Dane (2016). *Encuesta de Calidad de Vida*. Bogotá.
- Del Real Olvera, J. (agosto de 2007). *Evaluación y modelado de la cinética de depuración anaerobia de vinazas de la industria alcohólica*. [en línea] Disponible en: <http://repositoriodigital.academica.mx/jspui/bitstream/987654321/74416/1/Evaluacion%20y%20modelado%20de%20la%20cinetica.pdf>
- Demirel, B. & Scherer, P. (2008). The roles of acetrotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. *Environ Sci Biotechnol*, 173-190.
- Departamento Nacional de Planeación (agosto de 2016). *Fichas de Caracterización Territorial*. Bogotá
- Departamento Nacional de Planeación (2016). *Conpes 3874 política nacional para la gestión integral de residuos sólidos*. Bogotá.
- Departamento Nacional de Planeación (2017). *Portal Web DNP*. Bogotá

- ECDBC-MinAgricultura. (2017). *Plan de acción sectorial (PAS) de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI) agropecuario*.
- Einarsson, R. & Persson, U. (2017). Analyzing key constraints to biogas production from crop residues and manure in the EUDA spatially explicit model. *Plos One*, 1-23.
- Fachagentur Nachhaltige Rohstoffe e. V. (2010). *Guía sobre el Biogás. Desde la producción hasta el uso*. [en línea] Disponible en: <https://mediathek.fnr.de/media/downloadable/files/samples/1/e/leitfadenbiogas-es-2013.pdf>
- Fachverband Biogas. (2017). *Fachverband Biogas e.V.* [en línea] Disponible en: <https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE-Biogas-Waerme>
- FAO. (2014). *Bioenergía y Seguridad Alimentaria*. [en línea] Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-bp843s.pdf>
- FAO. (2014). *Manual de Usuario Residuos Agrícolas y Residuos Ganaderos*.
- Gabriel, D. & Sierra, H. (2017). *Purificación y usos del biogás*. Barcelona.
- Gamarra Vergara, J. (2005). *La Economía del Cesar después del algodón*. [en línea] Disponible en: <http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-59.pdf>
- Global Methane Initiative. (2014). *A Global Perspective of Anaerobic Digestion Policies and Incentives*. [en línea] Disponible en: <https://www.globalmethane.org/documents/tools/A-Global-Perspective-of-AD-Policies-Incentives.pdf>
- Gobernación de Antioquia. (marzo de 2016). *Plan de Desarrollo "Antioquia Piensa en Grande" 2016-2019*.
- Gobernación de Bolívar. (2016). *Proyecto de Ordenanza Plan de Desarrollo para el Departamento de Bolívar 2016-2019*.
- Gobernación de Boyacá. (2016). *Plan de Desarrollo 2016-2019*.

Gobernación de Boyacá. (31 de mayo de 2016). *Plan de Gestión Ambiental Regional PGAR 2009-2019*.

Gobernación de Cundinamarca. (2016). *Plan de Desarrollo Cundinamarca Unidos Podemos Más 2016-2020*.

Gobernación de La Guajira. (2016). *Plan de Desarrollo de la Guajira 2016-2019*.

Gobernación de Santander. (19 de marzo de 2016). *Plan de Desarrollo Departamental Santander Nos Une*.

Gobernación de Sucre. (2016). *Plan de Desarrollo 2016-2019*.

Gobernación del Atlántico. (2016). *Plan de Desarrollo 2016- 2019 Atlántico Líder*.

Gobernación del Cesar. (2017). *Departamento del Cesar*.

Gobernación del Cesar, Universidad Nacional de Colombia. (2012). *Plan estratégico regional de ciencia. Tecnología e innovación PERCTI*.

Gobernación del Huila. (2016). *Plan de Desarrollo “El Camino es la Educación”*.

Gobernación del Magdalena. (2016). *Plan de Desarrollo 2016-2019*.

Gobernación del Quindío. (2016). *Plan Departamental de Desarrollo 2016-2019*.

Gómez Peñaloza, S. & Parra Gómez, E. (2011). *Influencia de la carga de sustrato y la temperatura sobre los parámetros cinéticos de la etapa hidrolítica del proceso de digestión anaerobia del bagazo de fique*. [en línea] Disponible en: <http://repositorio.uis.edu.co/jspui/bitstream/123456789/6731/2/139053.pdf>

Graña Magariños, J. (2014). La Producción de Biogás en Vertedero. *Modelización y Determinación Analítica de los Parámetros Operativos de Funcionamiento mediante diferentes tipologías de Algoritmos, 30*.

- Guerrero, C., Pérez, B. & Cometta, S. (2015). *Biogas, Alternativa ambiental en el manejo de residuos orgánicos para su uso como energético sustentable*. Académica Española.
- Guevara Vera, A. (1996). *Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales*. [en línea] Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/scan2/031042/031042.pdf>
- Gunnerson, C. & Stuckey, D. (1986). *Anaerobic digestion. Principles and practices for*. [en línea] Disponible en: <http://documents.worldbank.org/curated/en/980401468740176249/pdf/multi-page.pdf>
- Guo Guo, L. (2010). *Potential of biogas production from livestock manure in China*. [en línea] Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/316829901_A_sustainable_biogas_model_in_China_The_case_study_of_Beijing_Deqingyuan_biogas_project
- Ideam - Pnud. (2016). *Inventario Nacional y Departamental de Gases Efecto Invernadero*. Colombia, Bogotá.
- IPCC. (1996). Revised IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. *Workbook, 6*, 1-22. Disponible en: <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch6ref1.pdf>
- Kdm Energía S.A. (2011). *Gestión y tratamiento integral de residuos*. [en línea] Disponible en: https://www.globalmethane.org/documents/events_land_20110701_hirsch.pdf
- Lerma, H. (2009). *Metodología de la investigación: propuesta, anteproyecto y proyecto*. Bogotá: Ecoe Ediciones.
- López Vega, M. & Santos Herrero, R. (abril - junio de 2012). Estudio preliminar del comportamiento de rellenos sanitarios como biodigestores a escala de laboratorio. *Afinidad LXIX*, 113-119.

Lugo, E. (2017). *Determinantes de la competitividad de las exportaciones mundiales de aceite de palma, 2007-2015*. Tesis de grado de Maestría en Economía. Universidad del Norte, Barranquilla Colombia.

Lugo, J. y Lugo, E. (2018). Beneficios socio ambientales por potabilización del agua en los pueblos palafíticos de la Ciénaga Grande de Santa Marta-Colombia. *Revista U.D.C.A, Actualidad y Divulgación Científica* 21(1), 259-264, Bogotá-Colombia.

Lugo, E., Landazury, L, Ferrer, F, Roncallo, A, Lugo, J., Jaafar, H. y Ovallos, D. (2018). *Productividad, Competitividad y Creación de Valor del Sector Agroexportador: Un enfoque de los Costos, la Responsabilidad Social y la Gestión Ambiental en la Región Caribe. Libro Ciencias Económicas, Administrativas y Contables*. Universidad Simón Bolívar, ISBN: 978-958-5533-09-7.

Martí Herrero, J. (2008). *Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación*. Bolivia: GTZ-Energía. [en línea] Disponible en: <http://www.bivica.org/upload/biodigestores-familiares.pdf>

Martí Ortega, N. (2006). *Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process*. [en línea] Disponible en: <http://www.bookpump.com/dps/pdf-b/1123329b.pdf>

Marty. (1984). *The Microbiology of Anaerobic Digesters*. [en línea] Disponible en: <https://thunderbooks.files.wordpress.com/2009/05/the-microbiology-of-anaerobic-digesters-michael-h-gerardi.pdf>

Minambiente. (2015). *Desarrollo de Planes de acción sectorial de mitigación (PASm) para aguas residuales y residuos sólidos*.

Minambiente. (2017). *Calculadora 2050*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Programa Regional de Negocios Verdes Región Central*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2016). *Decreto 298*. Bogotá.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Programa Regional de Negocios Verdes Región Caribe*.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2006). *Marco Normativo del Pgir*.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2007). *Guía para la formulación y el seguimiento de los Planes de Acción de las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible 2007-2011*.
- Minvivienda. (Septiembre de 2015). *Guía para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS)*.
- Morero, B., Gropelli, E., & Campanella, E. (2010). Biogás obtenido de la digestión anaeróbica de diferentes residuos orgánicos. *Ciencia y Tecnología* 10, 187-201.
- Observatorio del Caribe Colombiano. (2014). *Perfiles de la región Caribe colombiana por dimensiones de desarrollo*.
- Ocde. (2014). *Evaluaciones del desempeño ambiental*.
- Ortega Viera, L., Rodríguez Muñoz, S., Fernández Santana, E., & Bárcenas Pérez, L. (2015). Principales métodos para la desulfuración del biogás. *SciELO*, 45-56.
- Pavithran, D., Kannan, D., Raja Jayasingh, T., & Ganesh Karthikeyan, M. (Abril de 2015). A Study on the Influencing Parameters on Biogas Production from Jack Fruit Waste Feedstock. *International Journal of Engineering and Management Research*, 5, 10-13. [en línea] Disponible en: [http://www.ijemr.net/DOC/AStudyOnTheInfluencingParametersOnBiogasProductionFromJackFruitWasteFeedstock\(10-13\).pdf](http://www.ijemr.net/DOC/AStudyOnTheInfluencingParametersOnBiogasProductionFromJackFruitWasteFeedstock(10-13).pdf)

Perez Medel, J. A. (2010). *Estudio y Diseño de un Biodigestor para Aplicación en pequeños ganaderos y lecheros*. [en línea] Disponible en: <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/746/1/98062.pdf>

Perez Medel, J. A. (marzo de 2010). *Estudio y Diseño de un Biodigestor para Aplicación en Pequeños Ganaderos y Lecheros*. [en línea] Disponible en: http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2010/cf-perez_jm/pdfAmont/cf-perez_jm.pdf

Presidencia de la República. (6 de agosto de 2002). *Decreto 1713 DE 2002*. Bogotá, Colombia.

Presidencia de la República de Colombia. (20 de diciembre de 2013). *Decreto 2981 de 2013*.

Proactiva Colombia - Veolia. (2017). *Proactiva Colombia - Veolia*. Obtenido de <http://www.proactiva.com.co/colombia/biogas-dona-juana/>

RedBioCol. (2016). *Red Colombiana de Energía de la Biomasa*. [en línea] Disponible en: <http://www.redbiocol.org/bibliomasa/>

Rodrigo Clavero, M. E. (Septiembre de 2016). *BIOLEACH: un modelo matemático para la evaluación conjunta de la producción de lixiviados y biogás en vertederos de RSU*. [en línea] Disponible en: <https://riunet.upv.es/handle/10251/74687>

Rodríguez Gómez, M. (2013). *Perfil Ambiental de la Región Caribe*. ReseachGate.

Rodríguez Perdigón, L. (2014). *Viabilidad Técnica para la producción de biogás a partir de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos*. Forsu.

Rodríguez V, J. A. (s.f.). *Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales*. [en línea] Disponible en: <http://www.ingenieroambiental.com/4014/tratamiento545.pdf>

Rodriguez, J. M. (1982). *Biodigestor: una aproximación al diseño*. [en línea] Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo;jsessionid=1FB107242DFBE8CC A0590952453A2401.dialnet02?codigo=4902415>

- Rynk. (1992). *Taller de abonos orgánicos*. [en línea] Disponible en: <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoria%20Taller%20Abonos%20Org%C3%A1nicos.pdf>
- Sebastian Nogues, F., García Galindo, D., & Rezeau, A. (2010). *Energía de la Biomasa Volumen II*. Prensas de la Universidad de Zaragoza.
- Serrano Camacho, C. (junio de 2006). *Alternativas de Utilización de Biogás de Rellenos*. [en línea] Disponible en: <https://www.rds.org.co/es/recursos/alternativas-de-utilización-de-biogás-de-rellenos-sanitarios-en-Colombia>
- Sorathia, H., Rathod, P., & Sorathiya, A. (2012). *Bio-Ga Generation and Factors Affecting the Bio-Gas Generation – a Review Study. International Journal of Advanced Engineering Technology, 72-78*. [En línea] Disponible en: <http://www.technicaljournalsonline.com/ijeat/VOL%20III/IJAET%20VOL%20III%20ISSUE%20III%20JULY%20SEPTEMBER%202012/Article%2016%20Vol%20III%20issue%20III%202012.pdf>
- Soria Fregoso, M. D., Ferrera-Cerrato, R., Etchevers Barra, J., Alcántar González, G., Trinidad Santos, J., Borges Gómez, L., & Pereyda Pérez, G. (2001). *Producción de biofertilizantes mediante biodigestión de excreta líquida de Cerdo*. Redalyc. [en línea] Disponible en: <http://www.redalyc.org/html/573/57319408/>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (Diciembre de 2015). Disposición Final de Residuos Sólidos.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., & Ignacio Tejero Monzón, J. (1994). *Gestión Integral de Residuos Sólidos*. McGraw-Hill.
- Twenergy. (2017). *Twenergy Una iniciativa de Endesa por la eficiencia y la sostenibilidad*. [en línea] Disponible en: <https://twenergy.com/co/a/colombia-apuesta-por-los-rellenos-sanitarios-para-producir-electricidad-960>

GESTIÓN AMBIENTAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE BIODIGESTORES ANAERÓBICOS

reductores de residuos contaminantes en el medioambiente
de los departamentos de la Región Norte y Central de Colombia

UPME. (2007). *Alternativas de utilización de biogás de rellenos sanitarios en Colombia*.

UPME. (2015). Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia.

UPME. (2017). Sgi&C-Fncer.

UPME; Ideam; Colciencias. (2010). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*.

Varnero Moreno, M. T. (2011). *Manual de biogás*. [en línea] Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/019/as400s/as400s.pdf>

Varnero, M., Carú, M., Galleguillos, K., & Achondo, P. (2012). Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Sciela*, 31-40.

Waste2energy-medellin. (2017). *Waste2energy-medellin*. [en línea] Disponible en: <http://waste2energy-medellin.com/the-problem/>