

EN

Estimation of greenhouse gases emitted by the biodigester bale during the organic waste treatment

ES

Estimación de gases de efecto invernadero emitidos por la paca biodigestora durante el tratamiento de residuos orgánicos

Juana Patricia Peñalosa-Bernal*; Laura Catalina Ossa-Carrasquilla

Grupo de Investigación y Laboratorio de Monitoreo Ambiental (Grupo G-LIMA) de la Universidad de Antioquia, Antioquia, Colombia

*Corresponding author:

juana.penalosa@udea.edu.co

(ORCID 0000-0001-9575-0290)

Received: December 28, 2022 /

Accepted: March 5, 2023

DOI:

10.5154/r.rchsagt.2023.03.05

Abstract

Nowadays, there are diverse treatment systems of organic waste, the most widely known ones are the composting, vermicomposting, and anaerobic digestion, in which the emission of greenhouse gases (GHG) has been studied. One of the methods that has gained social and scientific recognition and acceptance in the recent decades is the biodigester bale, thanks to the ease of installation and operation and quality of the compost. Due to the studies developed about gas production in biodigester bales are emerging, this research seeks to estimate the GHG emission and reduction in the system through the guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) and the GHG calculator of the Institute for Global Environmental Strategies (IGES). 11 50 cm edge biodigester bales were built, distributed in four municipalities of Antioquia, Colombia, which treated 567 kg of organic waste, produced 170.1 kg of compost, emitted 108.6 kgCO_{2eq} and avoided the release of 6.73 kgCO_{2eq} to the atmosphere. It is concluded that the biodigester bale is a viable treatment alternative to mitigate the GHG emissions.

Key words: Climate change, greenhouse effect, GHG emissions, digester bale.

Resumen

Actualmente existen diversos sistemas de tratamiento de residuos orgánicos, entre los más conocidos están el compostaje, el vermicompostaje y la digestión anaeróbica, en los cuales se ha investigado la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Uno de los métodos que en las últimas dos décadas ha ganado aceptación y reconocimiento social y científico, es la paca biodigestora, gracias a la simplicidad en la instalación, su fácil operación y la calidad del abono. Debido a que las investigaciones realizadas sobre la producción de gases en las pacas biodigestoras son incipientes, la presente investigación busca estimar la emisión y reducción de GEI en el sistema a través de las directrices del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC) y la calculadora de GEI del Instituto Global de Estrategias Ambientales (IGES). Se construyeron 11 pacas biodigestoras de 50 cm de arista, distribuidas en cuatro municipios de Antioquia, Colombia, las cuales trataron 567 kg de residuos orgánicos, produjeron 170.1 kg de abono, emitieron 108.6 kgCO_{2eq} y evitaron que 6.73 kgCO_{2eq} se liberen a la atmósfera. Se concluye que la paca biodigestora es una alternativa de tratamiento viable para la mitigación de las emisiones de GEI.

Palabras clave: Cambio climático, efecto invernadero, emisión GEI, paca digestora.



Please cite this article as follows (APA 7): Peñalosa-Bernal, J. P., & Ossa-Carrasquilla, L. C. (2023). Estimation of greenhouse gases emitted by the biodigester bale during the organic waste treatment. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 3(1), 55-69. doi: <https://doi.org/10.5154/r.rchsagt.2023.03.05>

Introduction

The increased greenhouse gas (GHG)¹ emissions derived from human activities, it is the main cause of climate change currently demonstrated, putting human survival at risk, and causing a decrease in the resilience of the various ecosystems present in the world according to the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM by its acronym in Spanish, 2007²; Pascuas Rengifo et al., 2022). The commitment at global level as per the Paris Memorandum of Understanding is that for 2050, the temperature of the planet does not exceed more than two degrees Celsius (2 °C). In this international scenario, Colombia is in the fifth place of GHG emissions among the 32 countries of Latin America and the Caribbean, with a per capita emission of 4 tCO_{2eq}/inhabitant (IDEAM et al., 2016). As a result, the country became responsible for decreasing 51 % the GHG emission for 2030, according to the last actualization of the Colombia's Nationally Determined Contribution (NDC) by the Ministry of Environment and Sustainable Development (MADS by its acronym in Spanish, 2020).

The national inventories in Colombia monitor five emission sectors, one of them is the waste sector. Which, for 2014, produced 6 % of the total the GHG emissions at national level that is equivalent to the emission of 14.41 Gg³ of CO₂. Of this percentage, 45 % corresponded to the solid waste disposal activity (IDEAM et al., 2018). The most used form of disposition according to the Superintendency of Residential Public Services (SSPD by its acronym in Spanish, 2021) is the dumping of waste in landfills, where, about 11.21 Mt of solid waste were received in 2020, amount that is increasing each year, decreasing installed occupancy capacity at accelerated levels (Córdoba et al., 2010). Currently, through the separation of waste at source location, alternatives are being promoted, such as the plant for the use and treatment of organic and inorganic waste, which will reduce the percentage of material that enters the landfill, which prolongs its useful life, reduces the generation of leachate and GHG emissions.

According to the CONPES 3874 document of the National Planning Department (DNP by its acronym in Spanish, 2016), 61 % of the generated solid waste

Introducción

El aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)¹ derivadas de las actividades humanas, es la principal causa del cambio climático que hoy en día se evidencia, poniendo en riesgo la supervivencia humana y causando la disminución de la resiliencia de los diversos ecosistemas presentes en el mundo de acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2007²; Pascuas Rengifo et al., 2022). El compromiso a nivel global según el acuerdo de París es que para el año 2050, la temperatura del planeta no exceda más de dos grados centígrados (2 °C). Bajo este panorama internacional, Colombia se sitúa en el quinto lugar de emisiones de GEI entre los 32 países de Latinoamérica y el Caribe, con una emisión per cápita de 4 tCO_{2eq}/habitante (IDEAM et al., 2016). Por lo anterior, el país se responsabilizó en reducir un 51 % las emisiones de GEI para el año 2030, de acuerdo con la última actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC, por sus siglas en inglés) por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2020).

Los inventarios nacionales en Colombia monitorean cinco sectores de emisión, uno de ellos es el sector de residuos. El cual, para el año 2014, produjo el 6 % del total de emisiones de GEI a nivel nacional, lo que es equivalente a la emisión de 14.41 Gg³ de CO₂. De este porcentaje, el 45 % correspondió a la actividad de eliminación de desechos sólidos (IDEAM et al., 2018). La forma de disposición más empleada según la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD, 2021) es el vertimiento de los desechos en los rellenos sanitarios, en ellos se recibió alrededor de 11.21 Mt de residuos sólidos para el año 2020, siendo mayor esta cifra cada año, disminuyendo la capacidad de ocupación instalada en niveles acelerados (Córdoba et al., 2010). Actualmente a través de la separación de los desechos en el lugar de generación se están impulsando alternativas como la planta de aprovechamiento y tratamiento de desechos orgánicos e inorgánicos que permitan disminuir el porcentaje del material que ingresa al relleno, lo cual prolonga su vida útil, reduce la generación de lixiviados y la emisión de GEI.

¹Those are the gases in the atmosphere that absorb and emit the infrared radiation of the sun, with this, retain and increase the temperature of the planet (World Wildlife Fund [WWF], 2018).

²The Intergovernmental Panel on Climate Change is in charge of leading technically the elaboration of the GHG national inventories according to the established international parameters.

³A Gigagram (Gg) is equivalent to 1 000 tons and this unit is used for GHG emissions.

¹Son aquellos gases presentes en la atmósfera que absorben y emiten la radiación infrarroja del sol, con ello, retienen y aumentan la temperatura del planeta (World Wildlife Fund [WWF], 2018).

²La autoridad científica nacional del cambio climático es la encargada de liderar técnicamente la elaboración de los inventarios nacionales de GEI conforme los parámetros internacionales establecidos.

³Un Giga gramo (Gg) equivale a 1 000 toneladas y esta unidad es empleada para las emisiones de GEI.

corresponds to organic or biodegradable waste, as a consequence, this type of waste is the most disposed of in sanitary landfills and is responsible for the highest GHG emissions. Between the most known systems of organic waste in Colombia there is the composting, vermicomposting, and anaerobic digestion. However, composting⁴ has been established as the most widely implemented technique in the country due to the low investment and operating costs compared to other treatment techniques (Banco Mundial et al., 2021).

In the last decade, the estimate of the GHG emission in composting has been studied through the application of different methodologies. One of the most known and accepted at global level is that of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). The guidelines state that the GHG that intervene in the decomposition process are, carbon dioxide (CO₂), nitrous oxide (N₂O) and methane (CH₄). Regarding the CO₂, there is a natural production due to biological processes, which is considered of biogenic origin (released by animals and plants, such as the breathing or decomposition), the N₂O emissions occur in lower concentration, this varies in proportions from less than 0.5 % to 5 % of the initial content of nitrogen in the material, finally, the estimated CH₄ released to the atmosphere varies between less than 1 % of the initial carbon content of the material (IPCC, 2006).

Authors such as Otoma and Diaz (2017) and Qdais et al. (2019) have used the IPCC methodology, they estimated for the life cycle process⁵ an emission of 0.39 tons of CO₂ equivalent per ton of waste (tCO_{2eq}/t_R) and 0.332 tCO_{2eq}/t_R , respectively. Likewise, Yeo et al. (2019) and Yedla and Sindhu (2016) calculated that, for the biological treatment process by composting, 0.116 tons of CO₂ were produced, equivalent per-ton of organic waste (tCO_{2eq}/t_{RO}) and 1.1 tCO_2/t_R , respectively.

On the other side, in order to decrease the GHG emission caused by the chemical fertilizer production, different research recommend the use of compost obtained from the composting process as fertilizer for the soil, and in this sense, Yeo et al. (2019) state that a ton of compost can substitute 37 kg of urea; McDougall et al. (2001) point out that the compost provides 7.1 kg of nitrogen (N), 4.1 kg of phosphorus (P₂O₅), 5.4 kg of potassium (K₂O) per ton of wet compost, although

Con base en el documento CONPES 3874 del Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2016), el 61 % de los residuos sólidos generados corresponden a orgánicos o biodegradables, como consecuencia, este tipo de desecho es el que más se dispone en los rellenos sanitarios y es el responsable de la mayor emisión de GEI. Dentro de los sistemas de tratamiento orgánico más conocidos en Colombia se tienen el compostaje, el vermicompostaje y la digestión anaeróbica. Sin embargo, el compostaje⁴ se ha instaurado como la técnica más implementada en el país debido a los bajos costos de inversión y operación en comparación con las otras técnicas de tratamiento (Banco Mundial et al., 2021).

En la última década, la estimación de la emisión de GEI en el compostaje ha sido estudiada aplicando diferentes metodologías; una de las más reconocidas y aceptadas a nivel mundial es la del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC). Las directrices refieren que los GEI que intervienen en el proceso de descomposición son, el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O) y el metano (CH₄). Con respecto al CO₂, existe una producción natural por los procesos biológicos, la cual se considera de origen biogénico (realizados por los animales y las plantas, como la respiración o descomposición), las emisiones de N₂O ocurren en menor concentración, esta varía en proporciones desde menos del 0.5 % hasta un 5 % del contenido inicial de nitrógeno del material, por último, el CH₄ estimado que se libera hacia la atmósfera varía entre menos del 1 % del contenido de carbono inicial del material (IPCC, 2006).

Autores como Otoma y Diaz (2017) y Qdais et al. (2019) han empleado la metodología del IPCC, ellos estimaron para el proceso de ciclo de vida⁵ una emisión de 0.39 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de residuo (tCO_{2eq}/t_R) y 0.332 tCO_{2eq}/t_R , respectivamente. Asimismo, Yeo et al. (2019) y Yedla y Sindhu (2016) calcularon que, para el proceso de tratamiento biológico por compostaje, se producen 0.116 toneladas de CO₂ equivalente por tonelada de residuo orgánico (tCO_{2eq}/t_{RO}) y 1.1 tCO_2/t_R , respectivamente.

Por otro lado, con el fin de disminuir la emisión de GEI ocasionada por la producción de fertilizantes químicos,

⁴Defined as an anaerobic decomposition process developed by microorganisms, in which, under proper temperature and humidity conditions, allows to transform the organic matter into a homogeneous material and assimilable by plants called compost (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 2013).

⁵Includes all or some processes such as collection and transportation, operation, and biological treatment.

⁴Definido como un proceso de descomposición aeróbica realizado por microorganismos, en el que, bajo condiciones de temperatura y humedad adecuadas, permite transformar la materia orgánica en un material homogéneo y asimilable por las plantas llamado compost (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2013).

⁵Incluye todos o algunos procesos como recolección y transporte, operación y tratamiento biológico.

these values depend on the raw material used, the environmental conditions and the maturation time of the compost (Brechelt, 2004), likewise, Thanh et al. (2015), using the methodology of the GHG calculator of the Institute for Global Environmental Strategies (IGES), concluded that composting could increase significantly the amount of organic fertilizers and decrease the GHG emissions compared to the landfill.

On the other side, alternatives that contribute with the integral treatment of organic waste are currently assessed and documented, as in the case of the biodigester bale system⁶. In its main characteristics we have that, in one cubic meter between 500 to 600 kg of organic waste can be processed, it does not require infrastructure, it operates outdoors, it has no bad odors, it eliminates the proliferation of pests and prevents the generation of toxic gases (Ossa Carrasquilla, 2016; Posada Marín, 2015; Velázquez Cigarroa, 2020).

Research about the GHG emissions in the biodigester bale are still incipient, studies of authors such as Rivera Espinosa and Ossa Carrasquilla (2017) and Silva Pérez (2018), consider that theoretically, this method should not produce polluting gases different from the CO₂, because its decomposition process is developed by alcoholic fermentation.

On their part, Arteaga and Castaño (2015), in their experimental analysis *in situ*, did not evidence the presence of methane with the measuring system used, in the same way Arenas Osorno (2017) and Posada Marín (2015) compared the biodigester bale system with that of the composting and they found proximities in its results, for example, during the decomposition process, the temperature evolution and the changes in the pH were similar, also that the physicochemical, microbiological and phytotoxic parameters obtained from the fertilizer samples did not differ significantly, in the same way, the mesophilic, thermophilic, cooling and maturation phases were present in both methods. The mentioned concordance between both systems allows us to assume in this research that the estimate of GHG emitted by the biodigester bale is calculated the same as for the composting system.

Although the mechanism of the biodigester bale has been applied for about two decades, mainly in Colombia and other countries such as Mexico, Uruguay and Argentina (Silva Pérez, 2018), it has gained social and investigative popularity (Ardila Delgado et al., 2015;

diferentes investigaciones recomiendan utilizar el abono obtenido en el proceso de compostaje como fertilizante para el suelo, en este sentido Yeo et al. (2019) afirman que una tonelada de composta puede sustituir 37 kg de urea; McDougall et al. (2001) aseguran que el abono aporta 7.1 kg de nitrógeno (N), 4.1 kg de fósforo (P₂O₅), 5.4 kg de potasio (K₂O) por tonelada de abono húmedo, aunque estos valores dependen de la materia prima empleada, las condiciones ambientales y el tiempo de maduración de la composta (Brechelt, 2004), asimismo, Thanh et al. (2015), utilizando la metodología de la calculadora de GEI del Instituto Global de Estrategias Ambientales (IGES), concluyeron que el compostaje podría aumentar significativamente la cantidad de producción de fertilizantes orgánicos y reducir las emisiones de GEI en comparación con el relleno sanitario.

Por otra parte, actualmente son evaluadas y documentadas alternativas que contribuyen con el tratamiento integral de los residuos orgánicos como es el caso del sistema de la paca biodigestora⁶. Dentro de sus principales características se encuentran que, en un metro cúbico se pueden procesar entre 500 a 600 kg de residuos orgánicos, no requiere infraestructura, opera a la intemperie, presenta ausencia de malos olores, elimina la proliferación de plagas e impide la generación de gases tóxicos (Ossa Carrasquilla, 2016; Posada Marín, 2015; Velázquez Cigarroa, 2020).

Las investigaciones sobre la emisión de GEI en la paca biodigestora aún son incipientes, estudios de autores como Rivera Espinosa y Ossa Carrasquilla (2017) y Silva Pérez (2018), consideran que este método, en teoría, no debería producir gases contaminantes diferentes al CO₂ debido a que su proceso de descomposición es llevado a cabo por fermentación alcohólica.

Por su parte, Arteaga y Castaño (2015), en su análisis experimental *in situ*, no evidenciaron la presencia de metano con el sistema de medición utilizado, del mismo modo Arenas Osorno (2017) y Posada Marín (2015) compararon el sistema de la paca biodigestora con el del compostaje y encontraron proximidades en sus resultados, como por ejemplo, durante el proceso de descomposición, la evolución de la temperatura y los cambios en el pH guardaban similitud; también que los parámetros físicoquímicos, microbiológicos y fitotóxicos obtenidos de las muestras de abono no diferían significativamente así como que las fases

⁶It is a treatment system that allows the decomposition of all types of organic waste under non-stringent anaerobic conditions, through the action of facultative anaerobic microorganisms, which conduct their biological activity through fermentation (Ossa Carrasquilla, 2016).

⁶Es un sistema de tratamiento, que permite descomponer todo tipo de residuos orgánicos bajo condiciones anaeróbicas no estrictas, mediante la acción de microorganismos anaerobios facultativos, los cuales llevan a cabo su actividad biológica a través de la fermentación (Ossa Carrasquilla, 2016).

Rivera Espinosa and Ossa Carrasquilla, 2017); where most of the main documented studies are focused on the variation of the physicochemical parameters, the quality of the fertilizer obtained, the effectiveness of the system to process the waste generated in urban and rural contexts (Ossa Carrasquilla, 2016; Posada Marín, 2015).

However, due to the scarce research, a mathematical and experimental method to analyze GHG emissions in the system is still unknown, therefore, the aim of this research was to estimate the GHG emission and reduction in the biodigester bale, through the IPCC methodology and the GHG calculator of the IGES in four municipalities of Antioquia, in order for this study to contribute to the analysis of the environmental impacts associated with the GHG emission of the biodigester bale and serve as a research advance on the subject.

Methodology

To conduct this research, the following procedure was developed. First, all the information about the biodigester bales and GHG emissions in treatment systems of organic waste was collected from the bibliographic databases. Subsequently, the availability in schools was analyzed and reviewed, as well as corporations for the assembly of the systems, based on an initial compilation of 185 available places distributed in 13 municipalities of Antioquia. As well as the generation of raw domestic (RD_{CR}) and cooked (RD_{COC}) organic waste, and waste from pruning and leaf litter in each place. Later, the areas for the installation were selected, so that they comply with the ideal characteristics for their assembly (Figure 1).

The assembly of the biodigester bales, as it can be seen in Figure 1, was conducted with the methodology applied by Ossa Carrasquilla (2016). Each system had an initial volume of 0.125 m^3 approximately, for their assembly, a plastic wood mold with 50 cm edge metal ties was used. After a period of four months of decomposition, the amount of compost obtained in each biodigester bale was quantified.

The assessment and quantification of the GHG emissions was conducted following the methodology given by the IPCC (2006) for the national inventories. The estimation of CH_4 and N_2O was initially calculated by defining the type of treatment system, the mass of organic waste to be treated and the emission factors for each gas.

mesófilas, termófilas, de enfriamiento y maduración estaban presentes en ambos métodos. La concordancia mencionada entre ambos sistemas permite asumir en esta investigación que la estimación de GEI emitidos por la paca biodigestora se calcula igual que para el sistema de compostaje.

Aunque el mecanismo de la paca biodigestora se ha aplicado desde hace aproximadamente dos décadas, principalmente en Colombia y en otros países como México, Uruguay y Argentina (Silva Pérez, 2018), ha ganado popularidad social e investigativa (Ardila Delgado et al., 2015; Rivera Espinosa y Ossa Carrasquilla, 2017); en donde los principales estudios documentados tratan en su mayoría sobre la variación de los parámetros físicoquímicos, la calidad del abono obtenido, la efectividad del sistema para procesar los residuos generados en contextos urbanos y rurales (Ossa Carrasquilla, 2016; Posada Marín, 2015).

No obstante, debido a las escasas investigaciones, aún se desconoce un método matemático y experimental que analice las emisiones de GEI en el sistema, por lo tanto, el propósito de esta investigación consistió en estimar la emisión y reducción de GEI en la paca biodigestora, a través de la metodología del IPCC y la calculadora de GEI del IGES en cuatro municipios de Antioquia, con el fin de que este estudio contribuya en el análisis de los impactos ambientales asociados a la emisión de GEI en la paca biodigestora y sirva como avance investigativo en la temática.

Metodología

Para la realización de la presente investigación, se siguió el siguiente procedimiento. Inicialmente, se recopilaban de las bases de datos bibliográficas toda la información acerca de las pacas biodigestoras y la emisión de GEI en sistemas de tratamiento de residuos orgánicos. Después se analizó y se revisó la disponibilidad en colegios, además de corporaciones para el montaje de los sistemas, partiendo de una compilación inicial de 185 lugares disponibles distribuidos en 13 municipios de Antioquia; además se identificó la generación de residuos orgánicos tanto domésticos crudos (RD_{CR}), cocidos (RD_{COC}), así como de poda y hojarasca en cada sitio. Posteriormente, se seleccionaron los espacios para la instalación, de manera que cumplieran con las características idóneas para su montaje (Figura 1).

El montaje de las pacas biodigestoras, como se observa en la Figura 1, se realizó siguiendo la

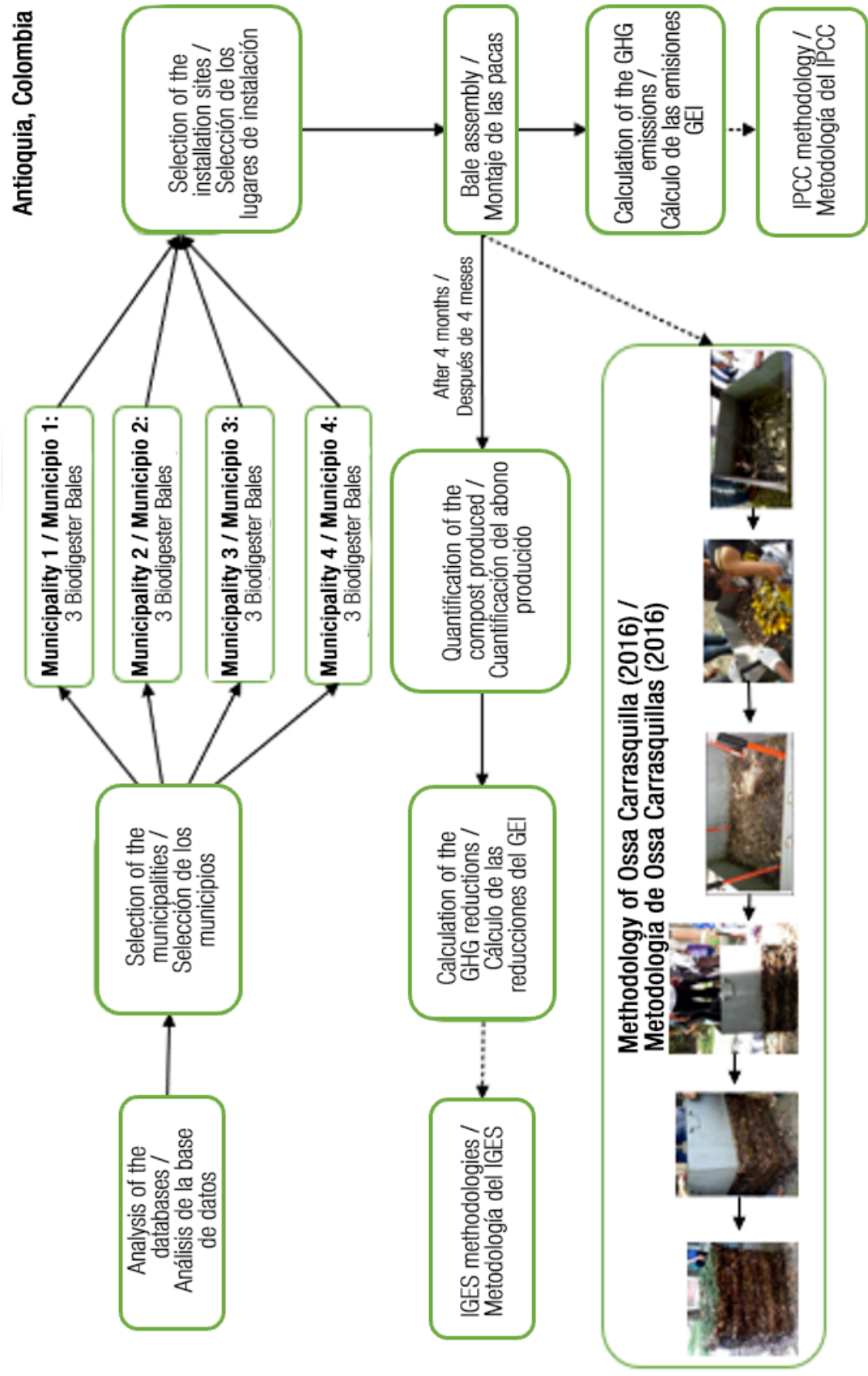


Figure 1. Methodology implemented to develop the research.
Figura 1. Metodología implementada para el desarrollo de la investigación

Source: Photographs taken from Ossa Carrasquilla (2016)./
Fuente: Fotografías tomadas de Ossa Carrasquilla (2016).

The calculation of the total mass of the waste used per municipality corresponded to the sum of the material treated in the biodigester bales built in each one, then, these data were introduced in the Equation 1 to estimate the total GHG emission in the studied municipalities.

In this study, it was assumed that the GHG emission and reduction in the biodigester bales system were generated the same as for the composting system, that is why it was calculated using Equation 1:

$$\text{Emission} = M_{\text{aprov}} \times FE_{\text{CH}_4} \times PCG_{\text{CH}_4} \times \frac{1}{1000} + M_{\text{aprov}} \times FE_{\text{N}_2\text{O}} \times PCG_{\text{N}_2\text{O}} \times \frac{1}{1000} \quad (1)$$

Where:

Emission: total GHG emission of the system, $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$

M_{aprov} : Mass of the waste to be used, kg.

FE_{CH_4} : Emission factor for the methane, $4 \text{ gCH}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$ of organic waste on wet basis.

PCG_{CH_4} : Global warming potential for the methane, 28.

$FE_{\text{N}_2\text{O}}$: Emission factor for the nitrous oxide, $0.3 \text{ g N}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$ of organic waste on wet basis.

$PCG_{\text{N}_2\text{O}}$: Global warming potential for the nitrous oxide, 265.

Given that there are no emission factors for Colombia, the default values of the guidelines by the IPCC (2006) were taken. These factors accept that the treated waste have between 25 to 50 % of degradable organic carbon (DOC), 2 % of nitrogen (dry matter) and an approximate moisture content of 60 % (IPCC, 2006). For the values of the global warming potential, those from the fifth evaluation report by the IPCC, were established as reference: climate change 2013 (AR5), being this the last report to the date.

To calculate the total GHG reduction caused by the use of the compost in agricultural and gardening activities replacing the chemical fertilizers, the methodology taken from the GHG calculator by the IGES 2013, was used. Which is calculated by considering the compost production, the percentage used with agricultural or gardening objectives and the mass of waste to be composted, as it can be seen in Equation 2:

metodología aplicada por Ossa Carrasquilla (2016). Cada sistema tuvo un volumen inicial de 0.125 m^3 aproximadamente, para su ensamble se utilizó un molde de madera plástica con amarres metálicos de 50 cm de arista. Después de un periodo de cuatro meses de descomposición se cuantificó la cantidad de abono obtenido en cada paca biodigestora.

La evaluación y cuantificación de las emisiones de GEI se efectuó siguiendo la metodología dada por el IPCC (2006) para los inventarios nacionales. La estimación de CH_4 y N_2O se calculó definiendo inicialmente el tipo de sistema de tratamiento, la masa de residuo orgánico a tratar y los factores de emisión para cada gas.

El cálculo de la masa total de residuos aprovechados por municipio correspondió a la sumatoria del material tratado en las pacas biodigestoras construidas en cada uno, luego, estos datos se introdujeron en la Ecuación 1 para estimar la emisión total de GEI en los municipios de estudio.

En este estudio, se asumió que la emisión y reducción de GEI en los sistemas de las pacas biodigestoras se generaba igual que para el sistema de compostaje, razón por la cual se calculó utilizando la Ecuación 1:

$$\text{Emisión} = M_{\text{aprov}} \times FE_{\text{CH}_4} \times PCG_{\text{CH}_4} \times \frac{1}{1000} + M_{\text{aprov}} \times FE_{\text{N}_2\text{O}} \times PCG_{\text{N}_2\text{O}} \times \frac{1}{1000} \quad (1)$$

En donde:

Emisión: Emisión total de GEI del sistema, $\text{kgCO}_{2\text{eq}}$

M_{aprov} : Masa de residuo que se va a aprovechar, kg.

FE_{CH_4} : Factor de emisión para el metano, $4 \text{ gCH}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$ de residuo orgánico en base húmeda.

PCG_{CH_4} : Potencial de calentamiento global para el metano, 28.

$FE_{\text{N}_2\text{O}}$: Factor de emisión para el óxido nitroso, $0.3 \text{ g N}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$ de residuo orgánico en base húmeda.

$PCG_{\text{N}_2\text{O}}$: Potencial de calentamiento global para el óxido nitroso, 265.

Dado que no se cuentan con factores de emisión propios para Colombia, se tomaron los valores por defecto de las directrices del IPCC (2006). Estos factores asumen

$$\text{Reduction} = \left(\text{Prod abono} \times \frac{\text{Abono}_{FA}}{100} \right) \times (E_{CO_2} + (E_{CH_4} \times PCG_{CH_4}) + (E_{N_2O} \times PCG_{N_2O})) \quad (2)$$

Where,

Reduction: GHG reduction due to the use of chemical fertilizers avoided, kgCO_{2eq}

Prod abono: Total amount of compost production, kg.

Abono_{FA}: Compost used for agricultural or gardening purposes, %.

E_{CO₂}: CO₂ avoided, $0.0213 \text{ kgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ of compost.

E_{CH₄}: CH₄ avoided, $0.00000338 \text{ kgCH}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$ of compost.

E_{N₂O}: N₂O avoided, $0.0000685 \text{ kgN}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$ of compost.

Because in Colombia there are no established values of E_{CO₂}, E_{CH₄}, E_{N₂O} emissions, international standard data of countries from North America and Europe, were used. These values assume that the mass of the organic waste entering the system has a moisture of 50 %, and it is clear that the emission values correspond to the production emissions and the emissions in the energy consumption during the manufacturing process (McDougall et al., 2001).

Results and discussion

After an analysis of availability and accessibility on the part of colleges and corporations to conduct the assembly of the systems, four municipalities of the Antioquia department were selected as it can be seen in Table 1.

Santa Fe de Antioquia: three biodigester bales were installed in the Institución Educativa Arturo Velásquez with the help of the students, as it can be seen in Table 1. The RD_{CR} were collected from the nearby greengrocers and leaf litter was obtained from the green areas of the institution. The ratio of the waste was of 2:1, this is, for every 2 kg of RD_{CR}, 1 kg of leaf litter was used. A total of 135 kg of organic waste were incorporated into the system and 40.5 kg of compost were obtained.

Medellín: three biodigester bales were installed in the Universidad de Antioquia, the organic wastes were RD_{CR} and RD_{COC}, which were collected from restaurants of the university and from a nearby mall, and the leaf litter was obtained from the green areas of the university.

que los residuos tratados tienen entre un 25 a 50 % de carbono orgánico degradable (COD), un 2 % de nitrógeno (materia seca) y un contenido de humedad de aproximadamente el 60 % (IPPC, 2006). Para los valores del potencial de calentamiento global se establecieron como referencia los del quinto informe de evaluación del IPCC: cambio climático 2013 (AR5), siendo este el último informe vigente a la fecha.

Para calcular la reducción total de GEI debido al uso del abono en actividades agrícolas o de jardinería reemplazando la aplicación de los fertilizantes químicos, se empleó la metodología tomada de la calculadora de GEI del IGES del año 2013. La cual se calcula teniendo en cuenta la producción de abono, el porcentaje que se utiliza con objetivos agrícolas o de jardinería y la masa de residuos que se van a compostar, tal como se muestra en la Ecuación 2:

$$\text{Reducción} = \left(\text{Prod abono} \times \frac{\text{Abono}_{FA}}{100} \right) \times (E_{CO_2} + (E_{CH_4} \times PCG_{CH_4}) + (E_{N_2O} \times PCG_{N_2O})) \quad (2)$$

En donde,

Reducción: Reducción de GEI debido al uso de fertilizantes químicos evitados, kgCO_{2eq}

Prod abono: Cantidad total de producción de abono, kg.

Abono_{FA}: Abono utilizado para fines agrícolas o de jardinería, %.

E_{CO₂}: CO₂ evitado, $0.0213 \text{ kgCO}_2 \cdot \text{kg}^{-1}$ de abono.

E_{CH₄}: CH₄ evitado, $0.00000338 \text{ kgCH}_4 \cdot \text{kg}^{-1}$ de abono.





E_{N₂O}: N₂O evitado, $0.0000685 \text{ kgN}_2\text{O} \cdot \text{kg}^{-1}$ de abono.

Como en Colombia no se tienen valores establecidos de emisión E_{CO₂}, E_{CH₄}, E_{N₂O} se utilizaron los datos estándares internacionales de países de Norte América y Europa. Estos valores asumen que la masa de los residuos orgánicos de entrada al sistema tiene una humedad del 50 % y se aclara que estos valores de emisiones corresponden tanto a las emisiones en la producción como las emisiones en el consumo de energía durante el proceso de fabricación (McDougall et al., 2001).

Resultados y discusión

Después de un análisis de la disponibilidad y accesibilidad de los colegios y corporaciones para

Table 1. Organic waste treatment in each municipality.
Cuadro 1. Tratamiento de residuos orgánicos en cada municipio.

Municipality / Municipio	Educational institution or corporation / Institución educativa o corporación	No. Of bales / Núm. de pacas	Amount and type of waste / Cantidad y tipo de residuos	Relationship between the types of waste / Relación entre los tipos de residuos
Santa Fe de Antioquia				
	Institución Educativa Arturo Velásquez	3	90 kg RD _{CR} and 45 kg leaf litter / 90 kg RD _{CR} y 45 kg hojarasca	2:1
Medellín				
	Universidad de Antioquia	3	105 kg RD _{CR} and RD _{COC} and 39 kg leaf litter / 105 kg RD _{CR} y RD _{COC} y 39 kg hojarasca	3:1
Caldas				
	CORPODIL Corporation	3	90 kg RD _{CR} and 78 kg pruning / 90 kg RD _{CR} y 78 kg poda	1.15:1
Sabaneta				
	Reserva La Romera	2	60 kg RD _{CR} and 60 kg leaf litter / 60 kg RD _{CR} y 60 kg hojarasca	1:1

Note. RD_{CR}: Raw domestic organic waste. RD_{COC}: Cooked domestic organic waste. /

Nota. RD_{CR}: Residuos orgánicos domésticos crudos. RDCOC: Residuos orgánicos domésticos cocidos.

The ratio of the waste was of 3:1 approximately, this is, for every 3 kg of RD_{CR} and RD_{COC} , 1 kg of leaf litter was used. The raw material that enters the system was a total of 144 kg of waste and 43.2 kg of compost was obtained, as it can be seen in Table 1.

Caldas: three biodigester bales were built in the CORPODIL Corporation, with the help of women who are heads of households. The organic waste that people brought to the corporation was of RD_{COC} type, and most of the waste was taken from the municipality market, on the other side, pruning was obtained as cleaning product for green areas of the facilities. The ratio of the waste was of 1.15:1 approximately, this is, for every 1.15 kg of RD_{CR} , 1 kg of pruning was used. A total of 168 kg of waste was disposed of, and 50.4 kg of fertilizer was quantified.

Sabaneta: two biodigester bales were installed in the Reserva La Romera as it can be seen in Table 1, with the collaboration of the rangers of the place. The RD_{COC} were obtained from a nearby restaurant and the leaf litter was collected in the same reserve. The ration of the waste was of 1:1 respectively. A total of 120 kg of waste were treated and 36 kg of fertilizer were obtained.

A total of 567 kg of organic waste were treated in the systems, from which 345 kg corresponded to raw and cooked domestic organic waste and 222 kg of leaf litter and pruning. As noted earlier in the different municipalities, although the maximum volume was the same for each bale, the total amount of waste disposed of varied in each one of them. This is due, according to what was observed, to the size and humidity of the waste. This is, when the RD_{CR} and RD_{COC} were greater, more leaf litter was required, and the bale reached its maximum capacity faster, whereas if the residues were small and the leaf litter was wet, the system was able to treat more waste. On the other side, the perspectives involved in the process showed great participation and interest and helped the process to finish satisfactorily. Likewise, benefits of the system highlighted, such as the simplicity in assembly; the space occupation (few square meters) for its construction and ease of operation. It was also adivinated that the obtained compost was 170.1 kg, which corresponded to 30 % of the total of organic waste that entered the treatment systems, thus, the greater the waste treated, the greater the compost.

The GHG emission corresponded to 108.6 $kgCO_{2eq}$, where the greater amount was emitted in the municipality of Caldas (32.17 $kgCO_{2eq}$), followed by Medellín (25.85 $kgCO_{2eq}$), Santa Fe de Antioquia (25.85 $kgCO_{2eq}$) and Sabaneta (22.98 $kgCO_{2eq}$) as it

realizar el montaje de los sistemas, se seleccionaron cuatro municipios del departamento de Antioquia como se muestra en el Cuadro 1.

Santa Fe de Antioquia: se instalaron tres pacas biodigestoras en la Institución Educativa Arturo Velásquez con la colaboración de los estudiantes, como lo muestra el Cuadro 1. Los RD_{CR} se recogieron de las verdulerías cercanas y la hojarasca se obtuvo de las zonas verdes de la institución. La relación de los residuos fue de 2:1, es decir por cada 2 kg de RD_{CR} se utilizó 1 kg de hojarasca. Se incorporaron en el sistema un total 135 kg de residuos orgánicos y se obtuvo 40.5 kg de abono.

Medellín: se armaron tres pacas biodigestoras en la Universidad de Antioquia, los residuos orgánicos eran RD_{CR} y RD_{COC} , los cuales se recogieron de los restaurantes de la universidad y de un centro comercial cercano y la hojarasca se obtuvo de las zonas verdes de la universidad. La relación de los residuos fue de 3:1 aproximadamente, esto es que por cada 3 kg de RD_{CR} y RD_{COC} se usó 1 kg de hojarasca. La materia prima que ingresó al sistema fue en total 144 kg de residuos y se logró obtener 43.2 kg de abono, como se muestra en el Cuadro 1.

Caldas: se construyeron tres pacas biodigestoras en la Corporación CORPODIL, con la ayuda de mujeres cabeza de familia. Los residuos orgánicos que llevaron las personas a la corporación eran de tipo RD_{COC} y la mayor parte de los residuos se tomaron del mercado del municipio, por otro lado, la poda se obtuvo como producto de la limpieza de zonas verdes de las instalaciones. La relación de los residuos fue de 1.15:1 aproximadamente, lo que significa que por cada 1.15 kg de RD_{CR} se usó 1 kg de poda. Se dispusieron en total 168 kg de residuos y se cuantificó 50.4 kg de abono.

Sabaneta: se realizó el montaje de dos pacas biodigestoras en la reserva La Romera como se visualiza en la Cuadro 1, con la colaboración de los guardabosques del lugar. Los RD_{COC} se adquirieron de un restaurante cercano y la hojarasca se recogió de la misma reserva. La relación de los residuos fue de 1:1 respectivamente. Se trataron en total 120 kg de residuos y se obtuvieron 36 kg de abono.

En los sistemas se trataron en total 567 kg de residuos orgánicos de los cuales 345 kg correspondieron a residuos orgánicos domésticos crudos y cocidos y 222 kg de hojarasca y poda. Como se observó en los diferentes municipios, a pesar de que el volumen máximo fue el mismo para cada paca, la cantidad total de residuos dispuestos varió en cada una de ellas. Esto se debió según lo observado al tamaño

can be seen in Figure 2. From the analysis of the mathematical formula used, it is possible to infer that the emission has a direct relationship with the amount of waste used, this is, the greater the waste treated, the more gases were emitted.

The installed systems treated around half a ton of organic waste, these results were scaled to the emission that one ton would generate, and taking as reference data in the literature of GHG generation in the composting system, it was obtained that the biodigester bales emitted $0.195 \text{ tCO}_{2\text{eq}}/\text{t}_{\text{RO}}$, corresponding to 65 % more than the results obtained in the research of Yeo et al. (2020) where an emission of $0.116 \text{ tCO}_{2\text{eq}}/\text{t}_{\text{RO}}$ was reported, and 82 % less than the estimation in the studies of Yedla and Sindhu (2016) where a production of $1.1 \text{ tCO}_{2\text{eq}}/\text{t}_{\text{R}}$ was calculated. In the same way, from the life cycle perspective, the system emitted less than in the results of Otoma and Diaz (2017) and Qdais et al. (2019), in 50 % ($0.39 \text{ tCO}_{2\text{eq}}/\text{t}_{\text{R}}$) and 60 % ($0.332 \text{ tCO}_{2\text{eq}}/\text{t}_{\text{R}}$), respectively. These emission decreases are related to the installation of the biodigester bales in the same place of waste generation, for this, during the collection and transportation process there were no emissions produced, nor was it generated in the system operation, since no machinery or electrical energy was required.

In Figure 3 it can be seen that in all municipalities, the greater emission was of methane, which can be explained because its emission factor is approximately 13 times greater than the nitrous oxide. This means that,

y a la humedad de los residuos. Es decir, cuando los RD_{CR} y RD_{COC} eran de mayor tamaño, se requería más hojarasca, y la paca alcanzaba su capacidad máxima más rápido, mientras que, si los residuos eran pequeños y la hojarasca estaba húmeda, el sistema era capaz de tratar mayor cantidad de residuos. Por otro lado, las personas involucradas en el proceso mostraron gran participación e interés y ayudaron a que el proceso culminará de manera satisfactoria. Asimismo, resaltaron bondades del sistema como la simplicidad en el montaje; la ocupación del espacio (pocos metros cuadrados) para su construcción y la facilidad en su operación. También se evidenció que el abono obtenido fue de 170.1 kg, el cual correspondió al 30 % del total de residuos orgánicos que entraron a los sistemas de tratamiento, por lo tanto, a mayores residuos tratados, mayor abono.

La emisión de GEI correspondió a $108.6 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$, en donde la mayor cantidad se emitió en el municipio de Caldas ($32.17 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$), seguido de Medellín ($25.85 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$), Santa Fe de Antioquia ($25.85 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$) y Sabaneta ($22.98 \text{ kgCO}_{2\text{eq}}$) como se observa en la Figura 2. A partir del análisis de la fórmula matemática empleada es posible inferir que la emisión tiene una relación directa con la cantidad de residuos aprovechados, es decir a mayores residuos tratados fueron más los gases emitidos.

Los sistemas instalados trataron cerca de media tonelada de residuos orgánicos, estos resultados se

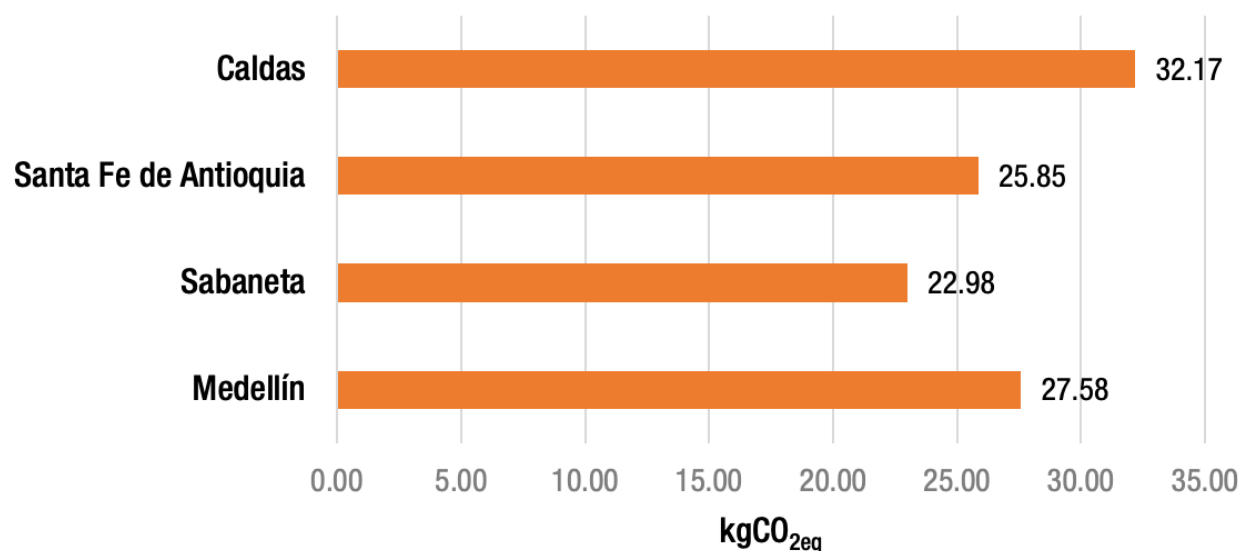


Figure 2. Total emission of greenhouse gases per municipality in Colombia.

Figura 2. Emisión total de gases de efecto invernadero por municipio, en Colombia

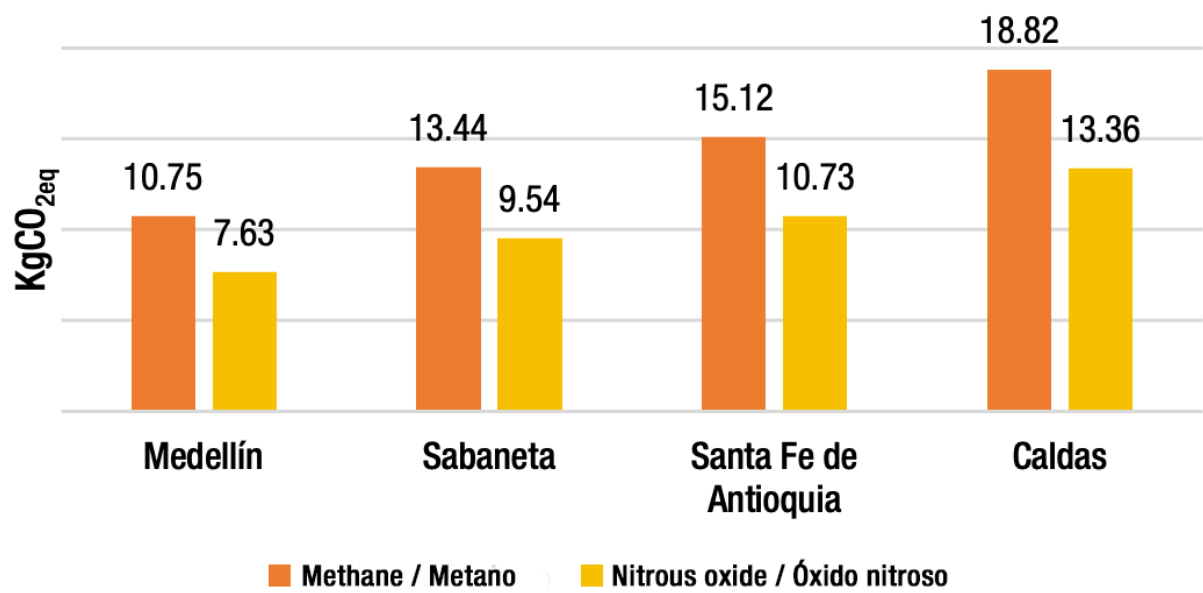


Figure 3. Methane and nitrous oxide emission assessed in four municipalities of Colombia.
Figura 3. Emisión de metano y óxido nitroso evaluado en cuatro municipios de Colombia.

following the IPCC methodology, the most generated gas in the biodigester bale is methane. This result may be probable if the amount and size of the incorporated material and the compaction carried out generate the absence of oxygen in some spaces inside the biodigester bale, creating strictly anaerobic conditions that favor the development of methanogenic organisms and, therefore, produce methane (IPPC, 2006).

However, the high internal temperatures of the biodigester bales can also cause that sub-products from fermentation such as the acetic acid and alcohol evaporate, the methanogenesis is not completed and the CH₄ is not produced, thus, it is plausible to consider that the methane production in this type of system, is not a normal behavior, but a particular case (Padilla and Rivero, 2016).

The calculation of the fertilizer produced in each municipality was obtained from the sum of the heavy material of each biodigester bale and this value was introduced in Equation 2, the percentage used for agricultural and gardening purposes was 100%. The total GHG reduction was of 6.72 kgCO_{2eq}, the municipalities of Caldas (1.99 kgCO_{2eq}) and Medellín (1.71 kgCO_{2eq}) had the greater reductions as it is illustrated in Figure 4. As it was pointed out before, the greater the amount of treated waste, the more compost production was obtained, so when it is used for agricultural or gardening purposes it promotes the use of less chemical fertilizers and this helps to reduce the GHG generation (McDougall et al., 2001).

escalaron a la emisión que generaría una tonelada y tomando de referencia datos en la literatura de la generación de GEI en el sistema de compostaje, se obtuvo que las pacas biodigestoras emitieron 0.195 tCO_{2eq}/t_{RO}, correspondiente a un 65 % más que los resultados obtenidos en la investigación de Yeo et al. (2020) donde se reportó una emisión de 0.116 tCO_{2eq}/t_{RO}, y 82 % menos que lo estimado en los estudios de Yedla y Sindhu (2016) donde se calculó una producción de 1.1 tCO_{2eq}/t_R. Asimismo, desde la perspectiva de ciclo de vida, el sistema emitió menos que los resultados de Otoma y Diaz (2017) y Qdais et al. (2019), en un 50 % (0.39 tCO_{2eq}/t_R) y 60 % (0.332 tCO_{2eq}/t_R), respectivamente. Esta disminución en las emisiones está asociada a la instalación de las pacas biodigestoras en los mismos lugares de generación de residuos, por lo cual, no se produjeron emisiones en el proceso de recolección y transporte, y tampoco se generó en la operación del sistema, puesto que no se requirió de maquinaria, ni de energía eléctrica.

En la Figura 3 se muestra que en todos los municipios la mayor emisión fue de metano, lo cual se puede explicar debido a que su factor de emisión es aproximadamente 13 veces más grande que el del óxido nitroso. Esto quiere decir que, siguiendo la metodología del IPCC el gas que más se genera en la paca biodigestora es el metano. Este resultado puede ser probable si la cantidad y tamaño del material incorporado y la compactación realizada generan la ausencia de oxígeno en algunos

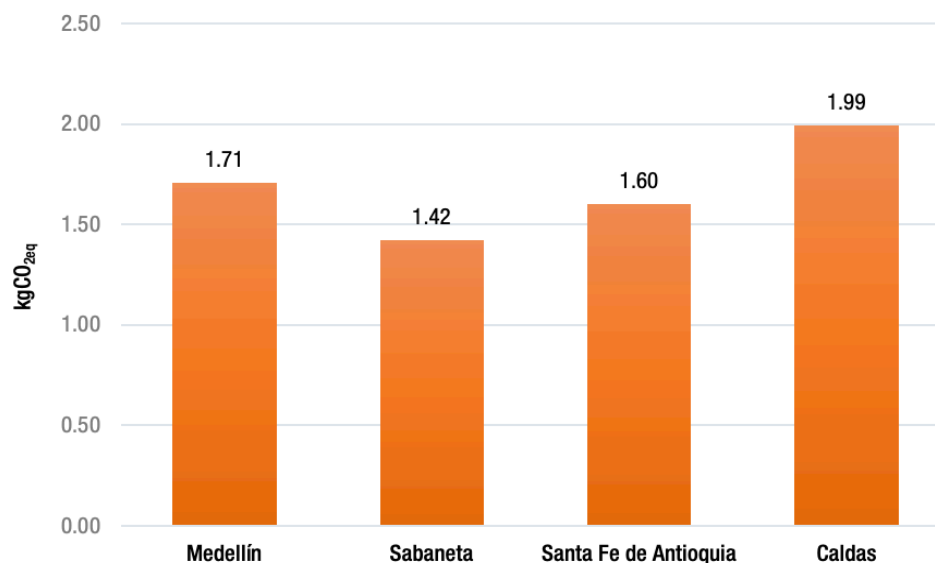


Figure 4. Total reduction of greenhouse gas in four municipalities of Colombia.

Figura 4. Reducción total de gases de efecto invernadero en cuatro municipios de Colombia.

Conclusions

It was concluded that the biodigester bale represents an alternative for the organic waste treatment for the four municipalities where the systems were built. The amount of treated waste showed variations due to the size and moisture content. Compost was obtained in all municipalities, as product of the decomposition process, which was used with agricultural or gardening purposes within the places where the assemblies were conducted.

The developed research gave a first approach to the process of quantifying the GHG emission of the biodigester bales, using the IPCC methodology for composting systems, this allowed to conclude that the gas with a greater emission index, without taking carbon dioxide into account, is the methane, although it is clear that this result would occur in particular situations of the system. On the other side, when developing the emission analysis from a life cycle perspective, a meaningful decreased was demonstrated because there was no GHG release related to the use of fossil fuels and consumption of electricity.

Furthermore, according to the GHG calculator methodology by the IGES, it was demonstrated that it is possible to generate a reduction in the GHG emission when replacing the use of chemical fertilizers for the use of the compost obtained as a soil amendment. In this sense, it is possible to affirm that the biodigester bale is an alternative for the viable treatment to

espacios en el interior de la paca biodigestora, creando condiciones estrictamente anaeróbicas que favorezcan el desarrollo de organismos metanogénicos y, por ende, se produzca el metano (IPPC, 2006).

Sin embargo, las altas temperaturas internas de la paca biodigestora también pueden ocasionar que los subproductos de la fermentación como el ácido acético y el alcohol se evaporen, la ruta de la metanogénesis no se complete y el CH₄ no se produzca, por lo tanto, es plausible considerar que la producción de metano en este tipo de sistema no es un comportamiento normal, sino un caso particular (Padilla y Rivero, 2016).

El cálculo del abono producido en cada municipio se obtuvo de la sumatoria del material pesado de cada paca biodigestora y este valor se introdujo en la Ecuación 2, el porcentaje utilizado con fines agrícolas y de jardinería fue del 100 %. La reducción total de GEI fue de 6.72 kgCO_{2eq}, los municipios de Caldas (1.99 kgCO_{2eq}) y Medellín (1.71 kgCO_{2eq}) tuvieron las mayores reducciones como se ilustra en la Figura 4. Como ya se había indicado antes, a mayor cantidad de residuos tratados se obtuvo más producción de abono, por lo que al ser utilizado con fines agrícolas o de jardinería promueve que se utilicen menos fertilizantes químicos y esto ayuda a reducir la generación de GEI (McDougall et al., 2001).

Conclusiones

Se concluyó, que la paca biodigestora representa una alternativa de tratamiento de los residuos orgánicos para los cuatro municipios en donde se construye-

mitigate the GHG emissions related to the climate change and its impacts.

Finally, it is recommended to conduct GHG emission and reduction measurements in biodigester bale systems *in situ*, that through the real data, allow to compare the theoretical results obtained from the IPCC methodology and the GHG calculator by the IGES, and develop a comparative assessment of the GHG emissions between the biodigester bale and the composting system. In the same way, it is suggested to increase the research about the emission factors specifically for Colombia and for the diverse treatment systems within this country.

End of English version

References / Referencias

- Ardila Delgado, J. L., Cano Córdoba, J., Silva Pérez, G., y López Arango, Y. (2015). *Descomposición de residuos orgánicos en pacas: aspectos fisicoquímicos, biológicos, ambientales y sanitarios*. Producción + Limpia, 10(2), 38. <https://doi.org/10.22507/pml.v10n2a4>
- Arenas Osorno, C. Y. (2017). *Implementación De Un Sistema Integral De Compostaje Para El Tratamiento De Los Residuos Orgánicos* [Tesis de maestría, Universidad Pontificia Bolivariana]. Repositorio Institucional UPB. <https://bit.ly/3eOeZxd>
- Arteaga, C., y Castaño, S. (2015). *Tratamiento sano de hojarasca y residuos orgánicos, para restaurar las zonas verdes en la ciudadela central, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia*. [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional UdeA.
- Banco Mundial, Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, y MAG Consultoría S.A.S. (2021). *Tratamiento de residuos sólidos en el marco del servicio público de aseo*.
- Brechelt, A. (Ed. Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas para América Latina [RAP-AL]). (2004). *Manejo Ecológico del Suelo*, (1ª ed.). <https://bit.ly/414CDJs>.
- Córdoba, C., Mera, J., Rodríguez, J., y Martínez, D. (2010). Empleo de residuos plásticos reciclados para la fabricación de productos sostenibles ambientalmente. *Revista Investigium IRE Ciencias Sociales Y Humanas*, 1(1), 60-69. <https://investigiumire.unicesmag.edu.co/index.php/ire/article/view/6>
- Departamento Nacional de Planeación. (2016, 21 de noviembre). *Política nacional para la gestión integral de residuos sólidos* (Documento CONPES 3874). Bogotá D.C., Colombia: DNP
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLERÍA. (2016). *Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero - Colombia*. Bogotá, Colombia: IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM.

ron los sistemas. La cantidad de residuos tratados, presentaron variaciones debido al tamaño y humedad que contenían. En todos los municipios se obtuvo el abono, producto del proceso de descomposición, el cual se utilizó con fines agrícolas o jardinería dentro de las mismas instalaciones donde se realizaron los montajes.

La investigación desarrollada dio un primer acercamiento al proceso de cuantificación de la emisión de GEI de las pacas biodigestoras, haciendo uso de la metodología del IPCC empleada para sistemas de compostaje, esto permitió concluir que el gas con mayor índice de emisión, sin tener en cuenta el dióxido de carbono, es el metano, aunque se aclara que este resultado ocurriría en situaciones particulares del sistema. Por otro lado, al realizar el análisis de emisión desde una perspectiva de ciclo de vida, se evidenció una disminución significativa debido a que no se produjo una liberación de GEI relacionada al uso de combustibles fósiles y consumo de energía eléctrica.

Asimismo, se demostró según la metodología de la calculadora de GEI del IGES que es posible generar una reducción en la emisión GEI al reemplazar el uso de fertilizantes químicos utilizando el abono obtenido como enmienda para los suelos. En ese sentido, es posible afirmar que la paca biodigestora es una alternativa de tratamiento viable para la mitigación de las emisiones de GEI asociadas al cambio climático y sus impactos.

Finalmente, se recomienda realizar mediciones de la emisión y reducción de GEI en sistemas de paca biodigestora *in situ*, que permitan a través de los datos reales comparar los resultados teóricos obtenidos a través de la metodología del IPCC y la Calculadora GEI del IGES y realizar una evaluación comparativa de la emisión de GEI entre la paca biodigestora y el sistema de compostaje. De igual manera, se sugiere aumentar las investigaciones sobre los factores de emisión propios para Colombia y para los diversos sistemas de tratamiento existentes en el país.

Fin de la versión en español

- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, y CANCELLERÍA. (2018). *Segundo Informe Bienal de Actualización de Colombia a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC)*. Bogotá, Colombia: IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM]. (2007). *Información técnica sobre gases de*

- efecto invernadero y el cambio climático. In: Ideam-Meteo (8,32). <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC)*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- McDougall, F. R., White, P. R., Franke, M., y Hindle, P. (2001). *Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory (Second Ed)*. Blackwell science.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2013). *Manual de Compostaje del Agricultor Experiencias en América Latina*. www.fao.org/publications
- Ossa Carrasquilla, L. C. (2016). *Aplicación de la tecnología de las Pacas Biodigestoras para el tratamiento ecológico de los residuos orgánicos de la Universidad de Antioquia* [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional UdeA. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/13416>
- Otoma, S., y Díaz, R. (2017). Life-cycle greenhouse gas emissions and economic analysis of alternative treatments of solid waste from city markets in Vietnam. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(1), 70–87. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0380-0>
- Padilla, A., y Rivero, J. (2016). Producción de Biogás y compost a partir de Residuos Orgánicos recolectados del Complejo Arqueológico Huaca de la Luna. *Revista ciencia y tecnología*, 12(1), 29–43.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC]. (2006). *Capítulo 4: Tratamiento biológico de los desechos sólidos. Directrices Del IPCC de 2006 Para Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero*, 5(4), 1–9.
- Pascuas Rengifo, E., Basto Monsalve, M. B., y Fontalvo-Buelvas, J. C. (2022). Propuesta metodológica para gestionar la resiliencia ecosistémica de áreas naturales protegidas en Colombia. *Revista Chapingo Serie Agricultura Tropical*, 2(1), 77–91. <https://doi.org/10.5154/r.rchsat.2022.03.06>
- Posada Marín, A. M. (2015). *Evaluación de dos sistemas de degradación biológica en zona rural del corregimiento de San Antonio de Prado* [Tesis de pregrado, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional UdeA. <https://opac.udea.edu.co/cgi-olub/?infile=details.glu&luid=1428422&rs=132533362&hitno=4>
- Qdais, H. A., Wuensch, C., Dornack, C., y Nassour, A. (2019). The role of solid waste composting in mitigating climate change in Jordan. *Waste Management y Research*, 37(8), 833–842. <https://doi.org/10.1177/0734242X19855424>
- Rivera Espinosa, R., y Ossa Carrasquilla, L. C. (2017). Experiencia didáctica con las pacas biodigestoras en entornos educativos del estado de México [Universidad Autónoma Chapingo]. In *Textual* (Issue 69). <https://doi.org/10.5154/r.textual.2017.69.005>
- Silva Pérez, G. (2018). ¿Qué es la paca digestora Silva? Un reciclaje orgánico limpio y saludable. *Tecsisotecatl*, 10(23), 1–6. <https://www.eumed.net/rev/tecsistecat/n23/paca-digestora-silva.html>
- Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [SSPD]. (2021). *Informe Nacional de Disposición Final de Residuos Sólidos 2020*. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2022/Ene/informe_df_2020.pdf
- Thanh, H. T., Yabar, H., y Higano, Y. (2015). Analysis of the Environmental Benefits of Introducing Municipal Organic Waste Recovery in Hanoi City, Vietnam. *Procedia Environmental Sciences*, 28, 185–194. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.025>
- Velázquez Cigarroa, E. (2020). Pacas biodigestoras. Técnica agroecológica orientada hacia el desarrollo de ambientes sustentables. Velázquez Cigarroa, E., Castro Martínez, O. R. y Tello García, E.(Eds.). *Educación Ambiental y Cambio Climático repercusiones, perspectivas y experiencias locales* (pp. 228–249). Universidad Autónoma Chapingo. <https://omp.siea.org.mx/omp/index.php/ompsieao/catalog/view/2/93/192>
- World Wildlife Fund. (3 de abril 2018). *Glosario ambiental: ¿Qué son los Gases de Efecto Invernadero (GEI)?* <https://www.wwf.org.co/?325754/Que-son-los-Gases-de-Efecto-Invernadero-GEI>.
- Yedla, S., y Sindhu, N. (2016). Assessment of alternative disposal methods to reduce greenhouse gas emissions from municipal solid waste in India. *Waste Management y Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 34(6), 553–563. <https://doi.org/10.1177/0734242X16643176>
- Yeo, J., Chopra, S. S., Zhang, L., y An, A. K. (2019). Life cycle assessment (LCA) of food waste treatment in Hong Kong: On-site fermentation methodology. *Journal of Environmental Management*, 240, 343–351. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.119>

