

Modelo sostenible de un sistema SEBAC para el aprovechamiento de la FORSU en Envigado.

Moreno Toro, Valentina^a; Sánchez Restrepo, Vanessa^a;

Rivera Echavarría, Katherin^b

^a Estudiante de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín Colombia

^a Estudiante de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín Colombia

^b Profesor, Asesor del Proyecto de Grado, Grupo GIEM Instituto de Química, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Resumen

Los residuos sólidos orgánicos representan una problemática ambiental asociada a los lixiviados y los Gases de Efecto Invernadero (GEI) que generan tanto en el transporte como en su disposición en los rellenos sanitarios, contribuyendo a la contaminación de agua, el aire y suelo. Las zonas urbanas producen el 60% de los residuos del país y es en donde menos se aprovechan debido a la falta de separación e iniciativas de valorización. Por tal motivo, en este proyecto se implementó una estrategia de capacitación en separación en la fuente en el edificio Forte Zúñiga, ubicado en el municipio de Envigado-Antioquia, con el fin de obtener la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en buenas condiciones para ser aprovechada en un sistema de reactores SEBAC (Sequential Batch Anaerobic Composting) construido según la generación de residuos de dicho edificio. La estrategia implementada fue efectiva dado que se logró crear el hábito de separación en la fuente en los participantes. Después de la construcción y puesta en marcha del reactor SEBAC, se monitoreó el proceso de biodigestión durante tres meses, logrando controlar la relación AGV/alk por debajo de 0.8, obteniendo porcentajes de remoción de DQO mayores al 90% y un rendimiento de metano de 159.58L CH₄/kg DQO, estos resultados demuestran el buen funcionamiento del sistema bajo el diseño planteado. Al finalizar el proceso se realizó una evaluación del sistema en términos de sostenibilidad mediante la valoración de las externalidades, obteniendo un Retorno Social de la Inversión de 3.1, según la metodología recomendada por The SROI Network.

1. Introducción

En el país solo se aprovecha el 10% de los residuos sólidos [1], lo cual representa una situación crítica dado que, según el Banco Mundial, los residuos que se generan hoy en día se duplicarán para el año 2025 y la vida útil del 65% de los rellenos sanitarios en Colombia está estimada en menos de 10 años [2].

En Colombia, en las últimas décadas se han estado desarrollando planes para el aprovechamiento de residuos orgánicos, los cuales representan el 55% del total de residuos que se generan. Sin embargo, estos planes son poco eficientes porque no se cuenta con una adecuada separación en la fuente [1], incrementando así los costos operacionales [3].

Cabe resaltar que Antioquia es el segundo departamento que más residuos genera en el país, con 3146.62 ton/día y el municipio de Envigado genera cerca del 6% de estos residuos, los cuales no son separados adecuadamente [2]. Aunque en esta zona se han implementado algunos proyectos de valorización de residuos orgánicos, como compostaje, la mayoría de proyectos se realizan en zonas rurales [4] y en total solo aprovechan 0.86 ton/día.

Por otro lado, aunque el objetivo de los rellenos sanitarios es disponer de los residuos en el suelo sin causar perjuicio al medio ambiente y sin causar peligro para la salud pública [5], actualmente existen diversas problemáticas sociales y ambientales asociadas a ellos. Los principales impactos ambientales están dados por el metano, gas de efecto invernadero que se genera por la digestión de los residuos y los lixiviados, los cuales si no son tratados adecuadamente contaminan los cuerpos de aguas superficiales y subterráneas [5]. Adicionalmente, los costos asociados a la recolección, transporte y disposición final de los residuos en los rellenos sanitarios están alrededor de 90.000\$/ton, representando cerca de 19 millones de pesos diarios para el municipio de Envigado [2].

Es importante entonces adoptar medidas, que contribuyan a la mitigación de los impactos ambientales generados por la disposición de residuos, tales como el aprovechamiento de los residuos orgánicos. Una alternativa para su gestión es la implementación de biodigestores anaerobios, en los cuales se transforma la materia orgánica en una mezcla de 5% de biomasa y 95% de biogás, susceptibles de aprovechamiento y valorización económica [6], obedeciendo así a un modelo de economía circular. A pesar del potencial de generación de biogás que se tiene en el país, el proceso de biodigestión anaerobia solo ha sido desarrollado en algunas empresas y zonas rurales [7], aunque son las zonas urbanas en donde más residuos se generan debido a su alta densidad poblacional.

Según el Plan de Gestión Integral de Residuos sólidos (PGIRS), un buen programa de gestión y aprovechamiento de los residuos sólidos urbanos debe estar enfocado en el diagnóstico de la problemática a nivel social y ambiental, identificar alternativas factibles para la gestión de residuos como: la separación en la fuente, recolección, tratamiento y aprovechamiento de los residuos y a partir de estos construir objetivos, programas o actividades que permitan el desarrollo de un buen plan o en este caso, una estrategia para la gestión integral de residuos [4]. El éxito de un PGIRS está en la participación, capacitación y educación ambiental de las personas.

Se han implementado varias tecnologías SEBAC para el aprovechamiento de la FORSU [8], [9], donde se ha encontrado que, en este tipo de sistemas, hay mejor remoción de materia orgánica, buenos rendimientos de metano y biogás. Adicionalmente, los tiempos de retención son bajos en el inicio de la etapa metanogénica. Igualmente, en el estudio presentado por Adhikari [10], se determinan los parámetros y condiciones operacionales para la implementación del sistema SEBAC a diferentes escalas para obtener una alta producción de biogás y los beneficios que puede traer su implementación en países como Tailandia. Por último, la Gobernación y la Universidad de Antioquia se encuentran en el desarrollo de un proyecto con el propósito de generar energía renovable a partir de la construcción de un sistema anaerobio con diferentes tanques para cada etapa de la biodigestión, además de llevar a cabo el tratamiento de residuos sólidos orgánicos en zonas rurales del departamento, como Támesis, El Carmen de Viboral y El Peñol, que contribuya a la reducción de la construcción de rellenos sanitarios, además de generar valor comercial y promover la conciencia ambiental en la población [11].

A partir de la revisión bibliográfica se detectó la necesidad de implementar un modelo de aprovechamiento de residuos en una zona urbana que integrara el funcionamiento técnico con la participación ciudadana. Por tal motivo, el objetivo de este proyecto fue implementar un sistema SEBAC que permitiera aplicar la digestión anaerobia en áreas urbanas, acompañado de la concientización a la comunidad acerca del manejo de residuos sólidos orgánicos, y describir las ventajas que tiene su implementación en los ámbitos ambiental, social y económico, por medio de la valoración de externalidades como se define en la literatura [12] para un proceso de biodigestión.

2. Materiales y métodos

2.1. Estrategia de capacitación

La metodología utilizada para el diseño de la estrategia se basó en el PGIRS [4], reglamentado por el Decreto 1077 de 2015 [13], donde se describen las etapas y actividades para el manejo integral de los residuos sólidos. Adicionalmente, enfatiza que el éxito para la elaboración de una estrategia de aprovechamiento es, inicialmente, el diagnóstico de la comunidad respecto a la educación o conocimiento ambiental, los hábitos en el manejo de los residuos sólidos, la pedagogía utilizada y la interacción y participación de la comunidad en el proyecto.

Con todo lo anterior, el propósito de la estrategia fue la formación, concientización y orientación de las personas del edificio Forte Zúñiga en una alternativa para el aprovechamiento de la FORSU. Para esto, se comunicó el proyecto a los habitantes del conjunto residencial, para lo cual se solicitó un permiso a la administración. Posteriormente, se realizó una jornada de capacitación en los conceptos claves del proceso de biodigestión, y en la recolección y separación de la FORSU de los demás residuos sólidos generados en una vivienda. Además, la estrategia permitió obtener la producción per cápita de FORSU para el diseño del sistema SEBAC.

Para efectuar la estrategia, se seleccionó inicialmente el área de estudio, teniendo en cuenta los siguientes criterios: un edificio residencial de área pequeña, con una población máxima de 30 personas y que, posiblemente, tuvieran un conocimiento básico de separación de residuos. El edificio seleccionado fue Forte Zúñiga, en el barrio Zúñiga del municipio de Envigado, el cual cuenta con 18 apartamentos, con una población de 30 habitantes.

Una vez seleccionado el edificio, se procedió con el cumplimiento de todos los protocolos y la solicitud de los permisos pertinentes a la administración y junta directiva de Forte Zúñiga (ver Anexo 1). Posteriormente, se incentivó a las personas en la participación del proyecto por medio de una visita domiciliaria, cuyo objetivo fue la aplicación de una encuesta 1 (ver Anexo 2) que permitió a los habitantes decidir sobre su participación en el proyecto. Al tiempo, esta encuesta permitió conocer qué tanto sabían los habitantes sobre la separación de los residuos sólidos en la fuente y alternativas de aprovechamiento de la FORSU, es decir, esta encuesta permitió obtener un diagnóstico de los conceptos, intereses y disposición de las personas en los temas ambientales, e identificar la problemática conceptual.

La capacitación de las personas que accedieron a participar se compuso de breves charlas (Figura 1) explicando en qué consiste el proceso de separación de los residuos orgánicos, los días de su recolección y la biodigestión de la FORSU por medio de un Volante (ver Anexo 3). Para esto, se estableció un punto estratégico y señalado de recolección dentro del edificio para depositar la FORSU. Adicionalmente, se dotó a las personas con un recipiente plástico de aproximadamente 3.5L para depositar la FORSU en sus casas. Este recipiente estaba marcado con una guía para la recolección selectiva de la FORSU (Figura 2). Igualmente, se entregó un imán con información de la separación de la FORSU para colocar en la nevera (Figura 3).



Figura 1. Capacitación 1: Conceptos de la separación de residuos y Biodigestión



Figura 2. Recipiente y guía de recolección de la FORSU. Elaboración propia.



Figura 3. Guía para la separación de residuos. Elaboración propia.

Con la intención de no alterar la práctica de recolección de residuos y no cambiar el hábito en los participantes, se programó la recolección de la FORSU dos veces a la semana, en la noche anterior al paso del camión recolector de la entidad asignada para el conjunto. Finalizada la capacitación, se realizó una semana pedagógica, que consistió en llevar a cabo la recolección de la FORSU e identificar el porcentaje de la FORSU bien separada. De esta forma, se pudo determinar la efectividad de la capacitación y la producción per cápita de la FORSU. Luego de la semana pedagógica, se dio inicio a la recolección periódica de la FORSU.



Figura 4. Capacitación 2: Avances proyecto de Biodigestión

Posteriormente, se realizó una segunda capacitación con las personas participantes, que consistió en exponer los avances del proyecto y cómo se ve materializada la FORSU en el proceso de biodigestión, por medio de una visita domiciliaria (Figura 4) y la muestra de un video en donde se detallaba (ver Anexo 4), paso a paso, el proceso de biodigestión. Esto se realizó con la intención de afianzar los conceptos enseñados en la anterior capacitación.

Finalizado el proyecto y las capacitaciones, se procedió con la entrega de los productos obtenidos en la biodigestión, el compost sólido y el fertilizante líquido. Adicionalmente, se sembró una planta con el compost

sólido obtenido, dejando una reflexión sobre el concepto erróneo de ‘basura’ cuando se refieren a la FORSU por medio de una visita domiciliaria (Figura 5). Por último y para darle fin a la estrategia, se efectuó una retroalimentación por medio de una encuesta (ver Anexo 5), en la que se deja constancia del compromiso de los residentes con el medio ambiente y la efectividad de la estrategia en cuanto a la concientización y la creación del hábito en la separación de la FORSU.

En la *Figura 6* se muestra la síntesis de la metodología de la estrategia.



Figura 5. A) Entrega de planta. B) Retroalimentación del proyecto



Figura 6. Metodología para la estrategia de separación de la FORSU

2.2. Evaluación del desempeño del sistema SEBAC.

Para realizar el aprovechamiento de la FORSU generada el edificio Forte Zúñiga se construyó un sistema SEBAC, el cual fue operado por etapas. La puesta en marcha del reactor consistió en dos etapas, en la primera se hizo la adaptación del inóculo y en la segunda la adaptación de la FORSU, estas etapas duraron 20 y 33 días respectivamente. Durante la tercera y cuarta etapa se monitoreó el proceso según los parámetros explicados en la Tabla 1, tuvieron una duración de 30 días cada una.

2.2.1. Construcción del reactor

Se construyó un sistema SEBAC (Sequential Batch Anaerobic Composting), según el diseño planteado por el GIEM[14]. El volumen del reactor se determinó de acuerdo a la generación per cápita de residuos en el edificio obtenido durante la primera semana de recolección: 69 kg/mes; teniendo en cuenta la densidad medida, usando el método recomendado en la NTC 5167 [15], esta masa equivalía a 83.2 L/mes, de tal manera que permitiera manejar un Tiempo de Retención de Sólidos (TRS) de 30 días ocupando menos del 80% del volumen

del reactor, según lo recomendado por Gerardi[16]. El sistema consistía de un Reactor de Hidrólisis (RH) de 210L, construido a partir de una caneca reciclada con un fondo falso para la retención de sólidos. Otra caneca de 210L que fue usada como Reactor de Metanogénesis (RM) completamente hermética para garantizar las condiciones anaerobias del sistema. Además, dos tanques de 60L, el Tanque Pulmón (TP) conectado al RH para recibir el percolado y el Tanque de Efluente (TE) conectado al RM para recibir el efluente. Todas las unidades fueron adaptadas con válvulas, tuberías y mangueras plásticas para conectarse entre sí y para facilitar la toma de muestras; el RM fue conectado a una Mochila de Biogás marca Shemi para recolectar el biogás generado. El esquema del equipo se muestra en la Figura 7.

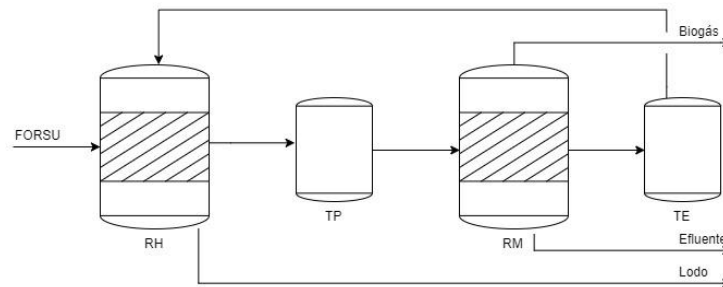


Figura 7. Esquema Sistema SEBAC [14]. Fuente: Elaboración propia

2.2.2. Puesta en marcha

La biodigestión anaerobia de la FORSU fue llevada a cabo bajo condiciones mesofílicas (22°C-30°C) usando un inóculo obtenido de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Fernando de EPM, para acelerar la etapa de arranque del sistema. Un volumen de 170L de inóculo fue depositado en el RM (inicio etapa 1), con una concentración de sólidos de 1.6% y se empezó a medir la relación de Ácidos Grasos Volátiles y alcalinidad (AGV/alk) por medio del método Kapp[17] citado por Lohri[18] para monitorear la estabilización del sistema.

Al cabo de 3 semanas, se inició la puesta en marcha del RH (etapa 2), se alimentaron 15.7kg de FORSU que fue molida con un Triturador de Residuos Orgánicos TRAPP TR-200, para minimizar el tamaño de partícula con el fin de aumentar el área superficial para el contacto de los microorganismos con los nutrientes y así facilitar la degradación de la materia orgánica [19]; además, se adicionaron 2L de agua para iniciar la generación de percolado. A partir de la semana siguiente se siguió alimentando FORSU y se añadió efluente desde el TE al RH y al TP con el fin de enriquecer el reactor en biomasa y mantener el pH del percolado en 5.5 como mínimo, para evitar la inhibición de proceso.

Cuando se alcanzaron las condiciones adecuadas de pH en el alimento y estabilidad en términos de relación AGV/alk, se inició con la alimentación del percolado al RM, por medio de una Bomba Dosificadora Iwaki EZC35D-PE, programada para bombear 8 veces al día durante 5 minutos, equivalente a un caudal de 0.94L/d, con el fin de alimentar una carga orgánica adecuada al reactor para evitar saturación. Después de esta alimentación, la relación AGV/alk se mantuvo por debajo de 0.17, así que se determinó que el sistema tuvo un arranque exitoso, según lo recomendado en la literatura [20], [10].

2.2.3. Operación y monitoreo del proceso

Después de la puesta en marcha del sistema, se continuó con la operación (etapas 3 y 4) alimentando FORSU triturada al RH dos veces por semana, para un flujo de entrada al sistema de 16 kg/sem en promedio. Posterior a la alimentación de FORSU, se mezclaba con la materia orgánica presente en el RH y se adicionaba efluente en una relación 1:1.5 efluente-FORSU para propiciar la percolación en el reactor y obtener la mayor cantidad de materia orgánica en la fase líquida. Al cabo de cada etapa de operación se retiraba y se pesaba el lodo resultante del RH, dejando un remanente para permitir que los residuos nuevos fueran digeridos mejor teniendo una biomasa adaptada. El lodo obtenido se agregaba a un Compostador Earthgreen SAC 1500, adicionando aserrín en una relación 1:7 aserrín-lodo. El lodo se mantenía en el compostador por un mes y después se retiraba

para hacer su maduración en canastas. Al final de la maduración, se realizaba un cernido del material utilizando una malla de 6 mm de abertura.

Se determinaron las variables más importantes para el objeto de estudio y se midieron con el fin monitorear el rendimiento del proceso y mantenerlo bajo control. Ver Tabla 1.

Tabla 1. Metodología para el monitoreo del proceso

Variable	Punto de medición	Procedimiento de medición
pH	Entrada y salida del RM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se agitaba la muestra en una plancha con agitador magnético. 2. Se medía el pH con un pH-metro Metrohm 827 pH lab, debidamente calibrado.
DQO	Entrada y salida del RM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se homogenizaba de la muestra por agitación manual. 2. Se disolvía la muestra según su concentración estimada y el rango de medición del equipo. 3. Se determinaba la DQO por el Método Estándar 508C [21], usando reactivos que proporcionaban un rango de medición de 0-15000mg/L.
AGV/alk	Salida del RM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se centrifugaba la muestra una Centrífuga Hettich Universal 16 a 4000rpm durante 15 minutos. 2. Se aplicaba el método Kapp [17] citado por Lohri [18]
%CH ₄	Salida del RM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se agitaba mecánicamente del reactor 2. Se medía el porcentaje de metano directamente en la válvula para salida de gas del RM con un Monitor Multigases Portátil con Bomba GX-2012 o se realizaba prueba de llama. La prueba de llama consistía en proporcionar una chispa por medio del encendedor en la salida del RM. Cuando la llama era azul y se sostenía indicaba un contenido de biogás mayor al 60%.
Volumen de biogás	Salida del RM	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se cerraban las válvulas de salida del biogás. 2. Se desconectaba la bolsa de biogás del RM. 3. Se conectaba la bolsa de biogás a un Medidor de Gas Multipropósito Metrex G1.6. 4. Se presionaba la bolsa para permitir el paso del biogás a través del medidor. Y en la salida del medidor se quemaba el biogás. 5. Se registraba la cantidad medida.

2.2.4. Caracterización

Se caracterizó la entrada al RH, es decir, la FORSU triturada en términos de densidad, Sólidos Totales (ST), Sólidos Fijos (SF) y Sólidos Volátiles (SV), siguiendo el Método Estándar 209F [22]. Los mismos parámetros fueron medidos para el lodo de la PTAR alimentado al RM, el efluente y el compost obtenido, este último también fue caracterizado en términos de pH y cenizas, siguiendo los métodos propuestos en la NTC 5167 [23, 24].

2.3. Evaluación sostenible del sistema

Para evaluar los beneficios ambientales y sociales de la implementación del sistema SEBAC en el edificio Forte Zúñiga, se hizo una valoración de las externalidades y se encontró el Retorno Social de la Inversión (RSI) para el proyecto.

En primer lugar, se identificaron las externalidades sociales y ambientales y se seleccionaron las más representativas, según las analizadas por varios autores para procesos de biodigestión [25], [12]; las externalidades seleccionadas se reportan en la Tabla 2. Éstas se valoraron económicamente mediante el método de preferencias reveladas para mercados existentes, con el cual se relaciona el valor del mejoramiento ambiental con un bien con el que guarda relación y que tiene un valor monetario [26]. En la Tabla 2 se presenta los modelos de cálculo para la valoración de cada externalidad, donde se tienen datos de fuentes primarias y datos de fuentes secundarias.

Para hallar el RSI se calculó el Valor Presente Neto (VPN) para un horizonte de 10 años, usando una tasa de descuento ambiental de 8.43% según lo recomendado por Correa [27] para el caso colombiano. Los ingresos para este cálculo fueron el valor económico de las externalidades y a cada uno se le aplicó una tasa de fluctuación en los años según el tipo de externalidad, como se muestra en la Tabla 3. Los egresos de la operación fueron: la mano de obra, el mantenimiento, el agua y la energía eléctrica consumidas, los cuales, al igual que los ingresos, se variaron de acuerdo a una tasa según su tipo (Ver Tabla 3).

Por último, el RSI se calculó dividiendo el VPN entre la inversión inicial [28], la cual está compuesta por el costo de los equipos y la mano de obra para la construcción, como se ve reflejado en la Tabla 8. En el Anexo 7 se presentan todos los cálculos realizados.

Tabla 2. Modelos de cálculo para la valoración de externalidades.

Externalidad	Descripción	Modelo de cálculo
Ambientales		
Disminución de emisión de GEI en los rellenos	Consiste en comparar las emisiones de CH ₄ y CO ₂ que puede generar la FORSU por fugas en rellenos sanitarios vs un proceso de biodigestión. El ahorro en CO ₂ equivalente se cuantifica económicamente mediante bonos de carbono.	$Q_{CH_4} = \left(\frac{kg\ CH_4}{ton\ FORSU} \right)^1 * \left(\frac{kg\ FORSU}{dia} \right)_{Forte\ Zúñiga}$ $Q_{CO_2} = Q_{CH_4} * \left(\frac{1}{\%CH_4} - 1 \right)$ $Q_{CO_2eq} = FCG * Q_{CH_4}$ $Q_{CO_2eq.\ total} = Q_{CO_2} + Q_{CO_2eq}$
		<p>Las ecuaciones anteriores se usan para calcular el $Q_{CO_2\ total}$ en un relleno sanitario y en un proceso de biodigestión. Después se comparan ambas tecnologías.</p> $Ahorro\ Emisiones\ CO_2eq = (Q_{CO_2\ total})_{relleno} - (Q_{CO_2\ total})_{biodigestion}$ $\frac{Valor\ económico}{año} = \left(\frac{\$Bono}{kgCO_2} \right)^2 * Ahorro\ Emisiones\ CO_2eq$

¹ [29] B. H. Aristizábal Z., E. Vanegas C., J. P. Mariscal M., and M. A. Camargo V. (2015) Digestión Anaerobia de Residuos de Poda como Alternativa para Disminuir Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Rellenos Sanitarios. *Energética*. 29-36.

² [30] (2017, Octubre). *Precios CO2*. Available: <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>

Disminución de emisión de CO ₂ en el transporte	Se calcularon las emisiones de CO ₂ debidas a los kg de FORSU que son recogidos en Forte Zúñiga durante un año. El valor económico está asociado con los bonos de CO ₂ .	$\frac{kg\ CO_2}{año} = \left(\frac{km\ recorridos}{viaje} \right) * \left(\frac{kg\ CO_2}{L\ combustible} \right)^3 * \left(\frac{L\ combustible}{año} \right)^4 * \left(\frac{viajes}{año} \right)$ $\left(\frac{kg\ CO_2}{año} \right)_{Forte\ Zúñiga} = \frac{km}{año} * \frac{kg\ FORSU\ de\ Forte\ Zúñiga}{Capacidad\ camión\ (kg)}$ $\frac{Valor\ económico}{año} = \frac{\$Bono}{kgCO_2} * \left(\frac{kg\ CO_2}{año} \right)_{Forte\ Zúñiga}$
Disminución de los lixiviados	A partir del dato de generación de lixiviados por kg de FORSU se calculó el costo del tratamiento de los lixiviados generados por la FORSU de Forte Zúñiga en un relleno sanitario.	$\frac{Valor\ económico}{año} = \frac{L\ lixiviado}{kg\ FORSU} * \frac{kg\ FORSU\ Forte\ Zúñiga}{año} * \left(\frac{\$Tratamiento}{L\ lixiviado} \right)^5$
Aumento de la vida útil del relleno sanitario	Se calculó según el porcentaje ocupado por la FORSU de Forte Zúñiga en un relleno sanitario y el costo de apertura de un vaso.	$\frac{Valor\ económico}{año} = \frac{m^3\ FORSU\ Forte\ Zúñiga}{año} * \frac{Costo\ apertura\ vaso^7}{Capacidad\ Vaso\ (m^3)^6}$
Sociales		
Ahorro en la tasa de aseo	Se calculó a partir de la tarifa cobrada por Enviaseo por disposición de residuos y la cantidad de residuos que están siendo aprovechados, es decir, no se disponen en el relleno sanitario	$\frac{Valor\ económico}{año} = \left(\frac{Costo\ disposición}{kg} \right)^8 * \left(\frac{kg\ FORSU\ aprovechada}{año} \right)$
Ahorro en el gas natural	Se calculó el ahorro económico en gas natural al reemplazarlo por biogás, teniendo en cuenta	$\frac{Valor\ económico}{año} = \left(\frac{m^3\ biogás\ producido}{año} \right) * \left(\frac{m^3\ gas\ natural}{m^3\ biogás} \right)^9 * \left(\frac{Precio\ gas\ natural}{m^3} \right)^{10}$

³ [31] O. C. d. C. Climàtic, "Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)," ed: Generlitat de Catalunya Comision Interdepartamental del Cambio Climático, 2011, p. 67.

⁴ [32] S. d. C. y. Transportes. (2004, Octubre). *Bases para la Administración del Parque de Maquinaria a Cargo de CAPUFE*. Available:

http://www.capufe.gob.mx/site/normateca/normas/77_Bases_para_la_Administracion_del_Parque_de_Maquinaria_a_cargo_de_CAPUFE_dic_05/Anexo05.pdf

⁵ [33] E. Giraldo. Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. *Revista de Ingeniería*.

⁶ [34] EPM. (2014, Octubre). *El Vaso Altaír, los próximos 15 años del Relleno Sanitario La Pradera*. Available:

<http://www.epm.com.co/site/Home/Saladeprensa/BoletinesEstamosAhi/ElvasoAltairlospr%C3%B3ximos15a%C3%B1osdelRellenosanitariolaPradera.aspx>

⁷ [35] C. Trujillo Villa, "Con Altaír II se extiende la vida útil del relleno La Pradera," in *El Colombiano*, ed. Medellín, 2014.

⁸ [36] E. E.S.P. (2017, octubre). *Costos del servicio público de aseo*. Available: <http://enviaseo.gov.co/wp-content/uploads/2014/11/Tarifas-mes-de-septiembre-2017.pdf>

⁹ [25] I. A. S.A., "Estudio para la Evaluación Socioeconómica y Ambiental de Tres Prototipos de Biodigestores en Predios de Pequeños Productores Lecheros," Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Santiago de Chile 2009.

¹⁰ [37] EPM. (2017, Octubre). *Tarifas Gas Natural 2017 en el Valle de Aburrá*. Available:

http://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/Clientesusuarios/Hogaresypersonas/Gasnatural.aspx

la equivalencia entre estos gases.		
Ganancia por compost	Se calculó multiplicando la cantidad de compost generado por su valor comercial.	$\frac{\text{Valor económico}}{\text{año}} = \frac{\text{kg compost producido}}{\text{año}} * \left(\frac{\text{Precio}}{\text{kg compost}} \right)^{11}$
Ganancia por fertilizante	Se calculó multiplicando la cantidad de fertilizante generado por su valor comercial.	$\frac{\text{Valor económico}}{\text{año}} = \frac{\text{L fertilizante producido}}{\text{año}} * \left(\frac{\text{Precio}}{\text{L fertilizante}} \right)^{12}$

Tabla 3. Tasas de cambio para ingresos y egresos.

	Ítem	Tasa de variación	Valor Tasa Anual
	Ahorro en la tasa de aseo	Valor calculado según el histórico de tarifas de aseo reportadas por la entidad Enviaseo [36].	0,50%
	Ahorro en el Gas Natural	Valor calculado según las proyecciones para el precio del Gas Natural [38].	Variable
	Ingresos por compost	Varía según la inflación [39].	4,00%
	Ingresos por fertilizante	Varía según la inflación [39].	4,00%
Ingresos	Disminución en GEI en los rellenos	Valor calculado según las proyecciones para el precio de los bonos de carbono [40].	Variable
	Disminución de CO2 en el transporte	Valor calculado según las proyecciones para el precio de los bonos de carbono [40].	Variable
	Disminución de lixiviados	Valor calculado según el histórico de tarifas de aseo reportadas por la entidad Enviaseo [36].	0,50%
	Aumento de la vida útil de los rellenos	Varía según la inflación [39].	4,00%
	Mano de obra operativa	Valor calculado según la estimación de incremento de salario mínimo en los próximos 10 años en Colombia [41].	5,20%
	Mano de obra profesional	Varía según la inflación [39].	4,00%
Egresos	Mantenimiento	Varía según la inflación [39].	4,00%
	Consumo energía	Valor calculado según el precio histórico del kWh en Colombia [42].	5,80%
	Consumo agua	Calculada según el histórico de tarifas de agua y alcantarillado reportadas por la entidad EPM [43].	16,00%

¹¹ [11] G. Jaramillo Henao and L. M. Zapata Márquez, "Aprovechamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia," Especialización en Gestión Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, 2008.

¹² [11] Ibid.

3. Resultados y análisis

3.1. Implementación de la estrategia de separación de la FORSU

Inicialmente, la estrategia se basó en el diagnóstico, identificación de la problemática e intereses en cuanto a cultura ambiental en Forte Zúñiga, esto con el objetivo de direccionar el diseño e implementación de la misma. La aplicación de la encuesta 1 permitió identificar que más de la mitad de las personas no conocían el término “separación en la fuente”, como se muestra en la Figura 9, Sin embargo, sabiendo que Forte Zúñiga tiene antecedentes en la separación de residuos, de los 10 apartamentos encuestados, luego de explicarles la definición del término, identificaron el proceso de separación, pero no lo conocían por dicho término. Esto nos indicó que la población tiene bajo conocimiento en conceptos básicos del manejo de residuos sólidos y que era necesaria la implementación de una capacitación en conceptos básicos ambientales para el desarrollo del proyecto.

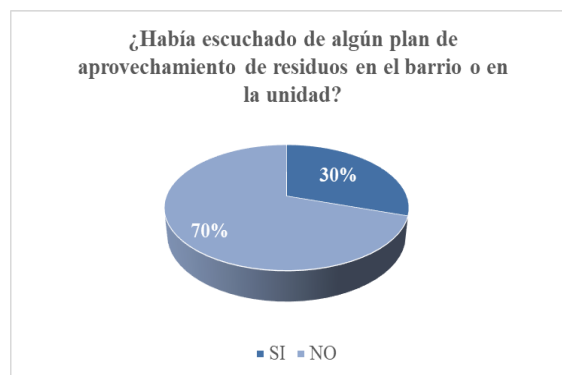


Figura 8. Conocimiento del PGIRS municipal

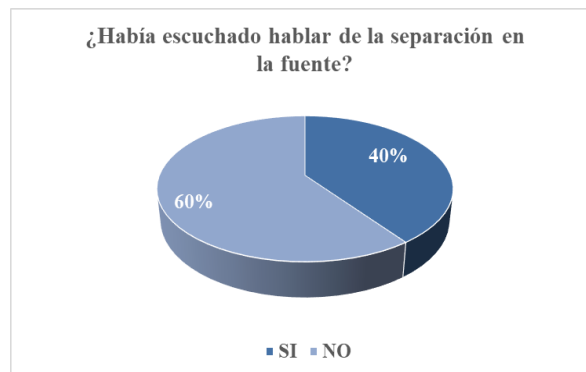


Figura 9. Conocimientos en separación en la fuente

Otro aspecto importante que se alcanzó a detectar en la encuesta 1 es que, aunque el PGIRS a nivel municipal ha sido divulgado [44], este no ha llegado a toda la población y, por ende, la participación y el conocimiento ciudadano en cuanto a cultura y contextualización ambiental es baja, es decir, el impacto en el factor social es insuficiente. Lo anterior se refleja en la Figura 8, donde el 70% de los apartamentos encuestados no tiene conocimiento alguno sobre el aprovechamiento de residuos en el sector. Es por esto que el propósito de la estrategia y del proyecto fue despertar el interés por el medio ambiente en Forte Zúñiga.

La aplicación de la encuesta 1, además de obtener el diagnóstico, pretendió identificar el interés de las personas participantes en el proyecto en temas ambientales, logrando que el diseño y aplicación de las capacitaciones posteriores llevaran a la efectividad de la estrategia y la obtención de buenos resultados en la

separación de los residuos sólidos. En la Figura 10 se puede observar que una extensa mayoría de la población considera importante el aprovechamiento de los residuos y el cuidado del medio ambiente.

Finalizado el proyecto, una de las formas para evaluar la efectividad de la estrategia era que las personas, independientemente de la continuación o no del proyecto, siguieran realizando la separación de los residuos en sus hogares o en otros espacios, divulgaran los conceptos aprendidos y despertaran el interés por el cuidado del medio ambiente. Para esto, se presentan en la Tabla 4 los resultados de la aplicación de la encuesta 2. Para las preguntas 2,3,4 y 5, el resultado positivo indica que las capacitaciones y el material de dotación utilizado como herramienta pedagógica para la separación de los residuos fueron exitosas, es decir, la información suministrada al participante fue, en gran medida, clara y concisa.

Otro factor importante que determinó la efectividad de la estrategia es el impacto que causó en las personas, la necesidad de divulgar una forma diferente para el aprovechamiento de los residuos. En la Tabla 4, las preguntas 7 y 8 hacen referencia a este factor, dando resultados satisfactorios, ya que, al transmitir la información del proyecto, se transmiten cultura y conceptos ambientales a la sociedad. La utilidad y el interés del proyecto se vio reflejada en los resultados de las preguntas 1,10,11 y 12, dando a entender que el interés en solucionar la problemática ambiental no es de unos sino de todos y que parte del éxito fue mostrarle al participante la materialización y los resultados del proyecto. En otras palabras, los participantes manifestaron sentir el proyecto como propio.

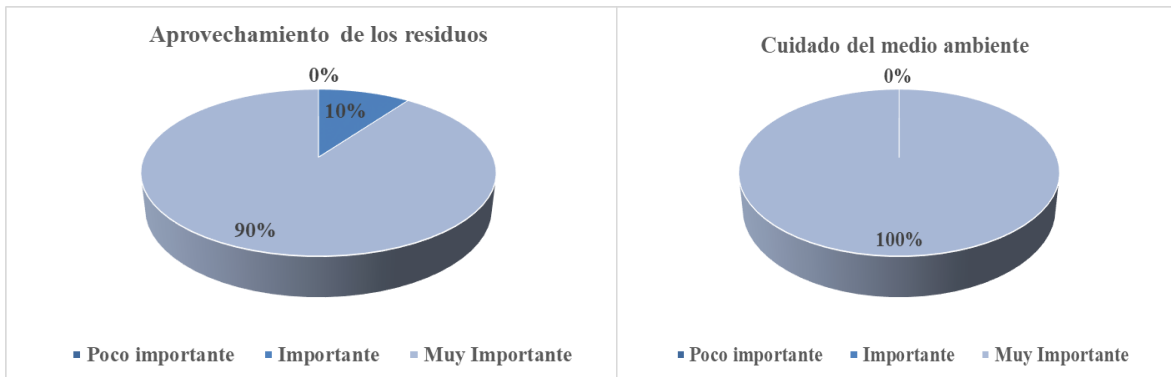


Figura 10. Opiniones sobre aprovechamiento de residuos y separación en la fuente

Por último y el factor más importante es la formación en el hábito. La metodología de recolección y el tiempo durante el cual se recolectó, aproximadamente 3 meses, facilitó a los participantes la creación del hábito, ya que, al convertirse en parte de la rutina diaria, hay posibilidades de que se mantenga por largo tiempo. La pregunta 4, en la Tabla 4 hace referencia a este tema. A su vez, en esta pregunta se evaluó el conocimiento adquirido en las capacitaciones, donde el 90% de la población manifestó identificar plenamente el concepto de “separación en la fuente” en comparación con la primera encuesta.

Tabla 4. Resultados encuesta #2

Pregunta	SÍ	NO
1 ¿Le pareció interesante la temática del proyecto?	100%	0%
2 ¿Se le dificultó separar sus residuos orgánicos?	10%	90%
3 ¿Considera que gracias al proyecto se le facilitó diferenciar los residuos orgánicos de los demás residuos generados en su hogar?	90%	10%
4 ¿Cree que ha sido útil para usted participar en este proyecto?	60%	40%

5	¿Ha aplicado la separación en la fuente en otros espacios, como el trabajo, colegio, lugares públicos?	80%	20%
6	Una vez culminado este proyecto, ¿seguirá separando sus residuos en la fuente?	90%	10%
7	¿Ha divulgado a su familia y grupos sociales el proyecto en el que está participando?	60%	40%
8	¿Le gustaría que más personas se enteraran del proyecto que se está realizando en su edificio residencial?	100%	0%
9	¿Conoce algún programa o proyecto para el aprovechamiento de los residuos orgánicos en Envigado?	10%	90%
10	¿Siente que es necesario la implementación de proyectos como éstos en otros lugares?	100%	0%
11	¿Está interesado en conocer los resultados del proyecto?	100%	0%
12	¿Usted estaría dispuesto a invertir en proyectos ambientales?	70%	30%

3.2. Desempeño del sistema SEBAC

En la Figura 11 se presenta la imagen del sistema SEBAC construido y en la Tabla 5 se presenta el balance de masa para el tiempo de operación, en términos de SV y ST, tanto para el RH como para el RM. Estos resultados reflejan que los porcentajes de remoción reportados para ambos reactores son acordes a los reportados en la literatura para este tipo de sistemas [45], [9].



Figura 11. Sistema SEBAC construido



Figura 12. Porcentaje de metano: Monitor multigases y Prueba de llama

Tabla 5. Balance de masa del proceso

	Entrada		SALIDA			%Remoción RH	%Remoción RM
	FORSU	LODO PTAR	LODO FORSU	EFLUENTE	BIOGÁS		
ST (g ST/g total)	0,224	0,1415	0,199	0,0779	-	11,16%	65,20%
SV (g SV/g total)	0,1906	0,0489	0,1828	0,0023	-	4,09%	98.79%
Flujo	74 kg/mes	-	64,1 kg/mes	40 L/mes	385L/mes		

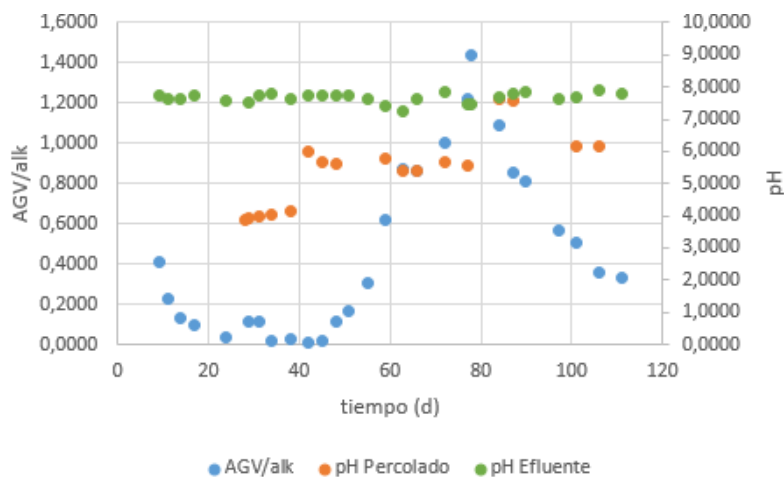


Figura 13. Relación AGV/alk y pH en el RM

En la Figura 13 se presenta la relación AGV/alk durante el tiempo de medición, así como el pH del percolado y del efluente, es decir, a la entrada y salida del RM, respectivamente. El pH del percolado es la salida del RH, en donde la materia orgánica alimentada es degradada a sustratos simples como azúcares, ácidos grasos y aminoácidos y posteriormente, estos son transformados en AGV y alcoholes [46] (Figura 16). Este percolado al inicio se encontraba con un pH de 3.98 en promedio, por el contenido de AGV, el cual indicaba un medio no apto para la alimentación al RM, según lo indicado por Parra[47] y Montes[9], quienes recomiendan que el pH

mínimo debe ser 5.5, con el fin de disminuir el tiempo de adaptación de los microorganismos y evitar la inhibición del sistema. Para alcanzar las condiciones apropiadas se agregó efluente y bicarbonato de sodio y se logró estabilizar el pH en 5.6, como se observa en el día 40.

Por otra parte, la relación AGV/alk al inicio del proceso estaba en 0.413 y fue disminuyendo conforme se estabilizaba el sistema hasta alcanzar valores de 0.02. A partir del día 42 empezó a aumentar la relación debido a que se inició la alimentación de percolado y se mantuvo por debajo de 0.17. Este valor indicaba que el sistema se encontraba estable y tenía capacidad de procesar más carga orgánica, según lo explicado por Vandevivere[48]. Por tal motivo, se aumentó la alimentación al reactor de 0.95L/d a 1.41 L/d, correspondientes a una Velocidad de Carga Orgánica (VCO) de 102.51 kg/m³/d y 304.72 kg/m³/d, respectivamente. Con este cambio en la VCO se presentó un aumento acelerado de la relación AGV/alk alcanzando un valor de 1.42, debido a una sobrecarga en la alimentación, así que se diluyó nuevamente el percolado con efluente y se agregó bicarbonato de sodio, para llevar la relación AGV/alk a niveles de 0.8 sin detener el funcionamiento del sistema siguiendo lo recomendado en la literatura [20].

El monitoreo de la relación AGV/alk permitió mantener el pH del efluente en un rango entre 7.2 y 7.9, el cual se encuentra en los valores recomendados, es decir, por encima de 6.2 [10], para propiciar el crecimiento de los microorganismos productores de metano [49]. En un pH mayor a 7, todos los AGV se encuentran en forma de sales y la relación ácido acético-acetato es de 1:100, permitiendo que el acetato pueda ser transformado en metano [10].

Otro factor importante en la operación para prevenir la inhibición del sistema es la VCO, la cual relaciona la concentración de DQO del percolado y el caudal alimentado al RM con el volumen de trabajo del RM [10]. Se debe tener en cuenta entonces que un aumento en la DQO o en el caudal de alimentación, se ocasiona un aumento en la VCO provocando un crecimiento en la relación AGV/Alk (Figura 15) y puede producir, la no degradación de la materia orgánica, acidificación del reactor, y cese total de la metanogénesis, debido a que hay mayor actividad de las bacterias hidrolíticas que metanogénicas [49].

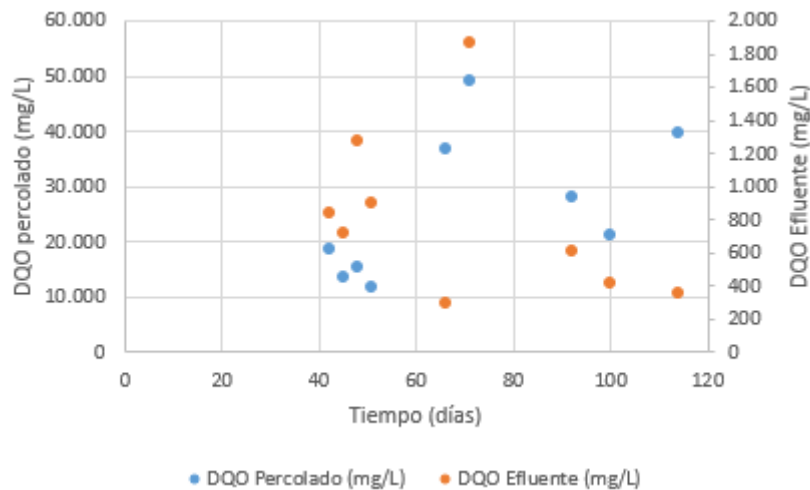


Figura 14. DQO en el percolado y el efluente

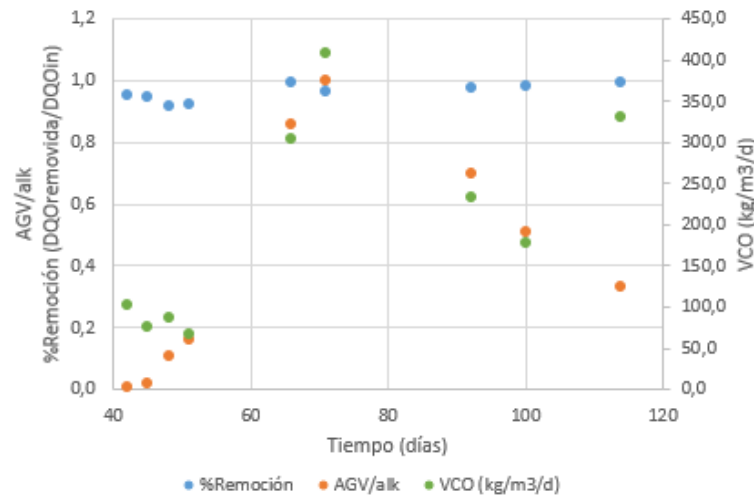


Figura 15. Relación AGV/alk, % Remoción DQO y VCO

Una vez estabilizados los AGV y puesto en marcha del sistema, se observa en la Figura 14 que la DQO en el RH tiene un comportamiento variable, aumentando en el transcurso del tiempo como consecuencia de la dependencia significativa respecto al incremento de los residuos orgánicos alimentados. Este incremento en la DQO es esperado, ya que en la etapa de hidrólisis hay una ruptura en los enlaces de azúcares y otros compuestos que puedan ser difíciles de degradar en el percolado, precisando una mayor demanda de oxígeno [46] (Figura 16).

Por otro lado, el comportamiento de la DQO en el efluente, luego de haber pasado por todas las etapas de biodigestión fue satisfactorio. En esta etapa, la DQO fue mucho menor que la del percolado, obteniendo un porcentaje de remoción de DQO hasta de un 99%, superando los porcentajes de remoción en la biodigestión de la literatura para una temperatura mayor a 20°C, entre el 55% y el 75% del porcentaje de remoción de DQO [50], como se muestra en la Figura 15. Esto permite indicar que se obtuvo una buena transformación de la materia orgánica y garantizar la posible obtención de un buen fertilizante líquido debido a su gran contenido de nutrientes [51].

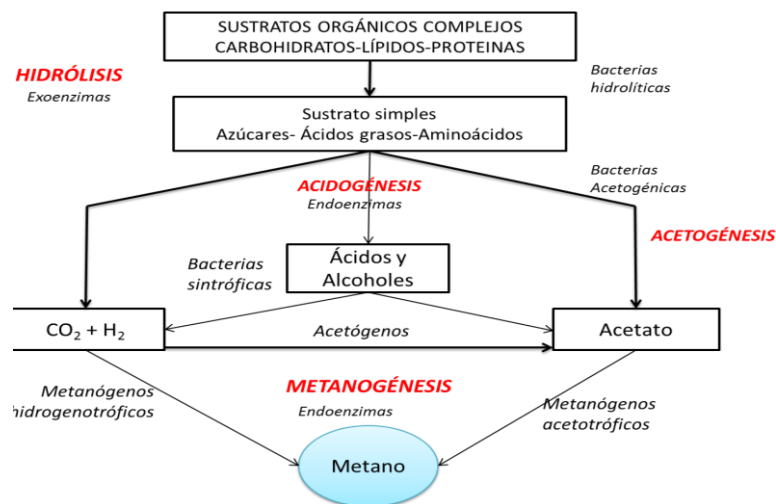


Figura 16. Ruta metabólica para la conversión de materia orgánica hasta Metano. Fuente: Rivera[52].

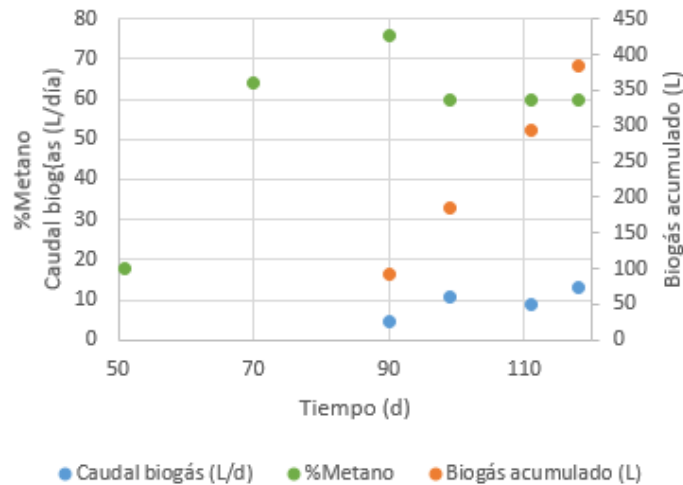


Figura 17. Biogás obtenido y porcentaje de metano

En cuanto a la producción de biogás, en la Figura 17 se observa que durante la etapa 2 se tenía un porcentaje de metano del 18% y en la etapa 3 se alcanzó un valor de 64%, el cual continuó aumentando hasta llegar a un 76% en la etapa 4. A partir de este valor, se realizó prueba de llama para verificar que el contenido de metano superará el 60% (Ver Figura 12), tal como se reporta desde el día 98, el cual indica que es adecuado para ser aprovechado. El aumento en el porcentaje de composición de metano, confirma que hubo desarrollo de las bacterias metanogénicas y culminación de la actividad hidrolítica [49].

El caudal de biogás fue medido desde la etapa 3 y muestra una tendencia creciente (Figura 17). En promedio, se obtuvo un caudal de 7.06 LCH₄/d y el caudal esperado, según lo reportado por García[51], era de 17.67L CH₄/d, es decir, un 250% mayor. Este alto porcentaje de diferencia puede estar dado porque en el tiempo de operación no se logró estabilizar la producción de metano y porque el caudal no fue medido durante los 3 meses, dado que en las primeras etapas se presentaron fugas en el sistema. Además, en el proceso no se controlaron parámetros para garantizar un alto rendimiento.

En la Figura 18 se presenta el rendimiento del proceso durante las etapas 3 y 4. El rendimiento se muestra en relación a la DQO (L CH₄/kgDQO) y a los SV destruidos (L CH₄/kg SV destruidos) y en promedio se encuentra en 159.58L CH₄/kgDQO y 151 L CH₄/kg SV destruidos, los cuales son menores en un 25% y 32% a los reportados en la literatura para reactores y residuos similares [45], [53]. Ambas gráficas evidencian que el rendimiento tiene un comportamiento variable y no se logra estabilizar en un valor. Los datos encontrados en la literatura evidencian que el rendimiento en procesos de biodigestión tiene un comportamiento creciente durante los primeros días y alcanza un punto en el que se estabiliza [54], es decir, la producción de metano para la cantidad de materia orgánica digerida es constante. Teniendo en cuenta lo anterior, es posible que el rendimiento no haya alcanzado a estabilizarse durante el tiempo de monitoreo y que éste sea mayor al encontrado durante los días de experimentación. Otro factor importante es falta de control de la temperatura, ya que, a variaciones de temperaturas, podría disminuir la actividad microbiana y posiblemente provocar un aumento en la relación carga orgánica/actividad microbiana, limitando el proceso e incrementando los AGV [49], [53].

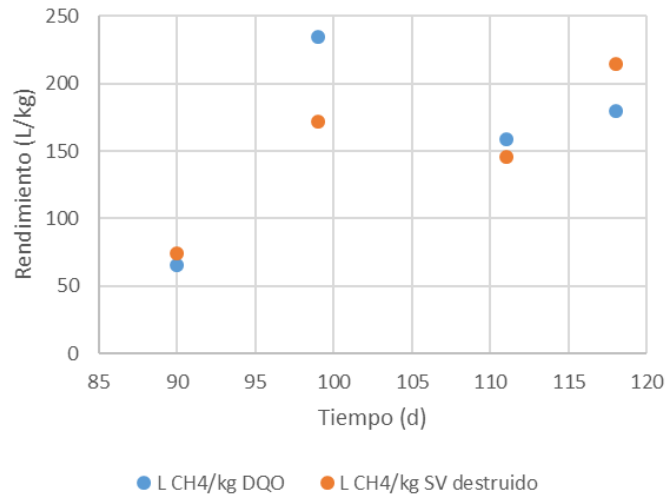


Figura 18. Rendimiento del proceso de biodigestión

Los subproductos obtenidos en la biodigestión fueron el compost y el biofertilizante líquido, provenientes del proceso de hidrólisis y del de metanogénesis, respectivamente. Según la literatura, estos dos subproductos se consideran beneficiosos para el cultivo, germinación y mantenimiento de plantas [55], [56]. Para verificar que los productos pudieran ser usados en el edificio, se obtuvieron los parámetros reportados en la Tabla 6, estos cumplen con lo establecido en la NTC 5167, aunque no corresponden a todos los parámetros que deben ser medidos. Para su comercialización es necesario además tener en cuenta la normatividad vigente (Resolución ICA 150 2003), como lo recomienda Puerta[57].

Las temperaturas obtenidas para el compost fueron las deseadas (40°C a 60°C), las cuales determinan que hubo una transformación de los residuos orgánicos. Además, estas temperaturas favorecieron que patógenos y algunos microorganismos murieran, pero al mismo tiempo se desarrollaran bacterias formadoras de esporas y actinomicetos [11]. El pH obtenido estuvo en el rango deseado según la literatura (6-7), ya que, a estos valores la actividad bacteriana es mejor [11]. Por último, la prueba de germinación realizada indicó que el suelo es apto para el crecimiento de plantas [55] (Figura 19).

Tabla 6. Caracterización del compost obtenido

pH	6.9
Humedad	41,33%
Cenizas	5,12%
Materia orgánica	94,88%
COT (%)	52,71%
ST (g ST/g totales)	0,5700
SV (g SV/g totales)	0,0563



Figura 19. Prueba de germinación para el compost

En el Anexo 6 se presenta el resumen de todos los datos de monitoreo del proceso.

3.3. Evaluación sostenible del sistema SEBAC

Tabla 7. Resultados para las externalidades (ingresos) y los egresos operacionales

	Ítem	Valor / año
Ingresos	Ahorro en la tasa de aseo	\$ 132.539,53
	Ahorro en el Gas Natural	\$ 3.343,53
	Ingresos por compost	\$ 64.800,00
	Ingresos por fertilizante	\$ 2.520.000,00
	Disminución en GEI en los rellenos	\$ 13.710,51
	Disminución de CO2 en el transporte	\$ 348,07
	Disminución de lixiviados	\$ 17.708,62
	Aumento de la vida útil de los rellenos	\$ 3.205,36
Egresos	Mano de obra operativa	\$ 273.600,00
	Mano de obra profesional	\$ 420.000,00
	Mantenimiento	\$ 80.000,00
	Consumo energía	\$ 60.357,44
	Consumo agua	\$ 2.970,47
Ingreso Neto (Ingresos-Egresos)		\$ 1.921.698,19

Tabla 8. Inversión inicial para el proyecto

Ítem	Valor (\$)
Materiales reactor	\$ 250.000,00
Bomba	\$ 1.450.000,00
Compostador	\$ 250.000,00
Triturador	\$ 2.092.000,00
Sistema estufa de gas	\$ 430.000,00
Mano de obra profesional	\$ 250.000,00

Mano de obra - Construcción	\$ 182.400,00
TOTAL	\$ 4.904.400,00

En la Tabla 7 se muestran las externalidades valoradas y en el Anexo 7 se reportan los cálculos realizados. Puede observarse que, comparando la externalidad social con la externalidad ambiental, la social genera mayores ganancias, siendo la venta de biofertilizante líquido la principal fuente de estas ganancias, ya que, en comparación con el compost, se genera mayor cantidad y su precio es más elevado. Esto quiere decir que el producto es considerado de mayor efectividad que el abono sólido tradicional, a causa de que es un subproducto derivado del proceso anaerobio, por lo que el contenido de nutrientes en él es más bioasimilable para las plantas que el compost sólido [58]. En cuanto a la externalidad ambiental, se observa que la rentabilidad económica resulta ser menor, dado que aún no existe un precio elevado para los bonos de CO₂ y en Colombia no hay un mercado consolidado para estos [59]. Adicionalmente, el tratamiento de residuos en un relleno sanitario se hace muy económico por los grandes volúmenes que se manejan [5]. Teniendo en cuenta que el proyecto fue realizado a una escala menor, la valoración económica implica un menor impacto ambiental.

Según el rendimiento de metano obtenido, éste podría ser usado para abastecer una estufa de gas 2.25 días[60]. Se observa que la externalidad relacionada con el ahorro en gas natural solo representa el 0.01% del total de externalidades, debido a que el costo del gas natural en Colombia es muy bajo con respecto al biogás, lo cual representa una barrera para el desarrollo de este tipo de energías. Según Octaviano[61], si las externalidades de los combustibles fósiles fueran internalizadas, su costo podría ser mayor y las energías renovables podrían ser más competitivas en términos económicos.

Otro aspecto importante, que no fue valorado en términos económicos es que mediante este proyecto se contribuye al cumplimiento de la normativa ambiental, en el caso específico del Decreto 219 de 2013 de la Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Rural, en el cual se exige la formulación y ejecución del PMIRS para las unidades residenciales del municipio de Envigado, para el cual, hasta la fecha, los principales avances se han dado en cuanto a reciclaje [44]. Adicionalmente, el proyecto se ve beneficiado por lo dispuesto en la Resolución CRA 720 de 2015, en donde se regula el manejo de las tarifas de aseo teniendo en cuenta la tasa de aprovechamiento, por lo tanto, se obtiene un ahorro económico del 45% al disminuir la cantidad de residuos que el edificio dispone en el relleno sanitario.

De acuerdo a los resultados en cuanto a las externalidades y a los costos operacionales reportados en la Tabla 7, el VPN del proyecto es de \$15 223 019, obteniendo un RSI de 3.1, teniendo en cuenta la inversión inicial (ver Tabla 8), lo cual indica que el proyecto es rentable en un horizonte para el horizonte de 10 años evaluado. En la literatura se reportan beneficios económicos para proyectos a mayor escala [62], [9], los cuales confirman que la biodigestión puede ser una alternativa de aprovechamiento de residuos económicamente viable.

4. Conclusiones

La estrategia de capacitación en separación en la fuente propició que los habitantes reconocieran la importancia de hacerse responsables del manejo y la separación de los residuos, al comprender que la solución a la problemática ambiental no está en el desarrollo e implementación de grandes y costosas tecnologías, sino que la efectividad de una buena estrategia para la gestión de residuos está dada por la creatividad para solucionar el problema y la participación y educación ciudadana. Igualmente, la estrategia permitió darle al proyecto el componente social en cuanto al empoderamiento de la comunidad.

La tecnología SEBAC implementada se adecuó a las necesidades planteadas para el aprovechamiento de la FORSU en el edificio Forte Zúñiga, con respecto a la valorización de residuos orgánicos en zonas urbanas. El sistema presentó un desempeño satisfactorio en corto tiempo en cuanto a la remoción del porcentaje de DQO y producción de biogás rico en metano, obteniendo resultados que se aproximan a los descritos en la literatura.

La implementación de un sistema SEBAC en un edificio de una zona urbana es un proyecto sostenible, ya que se obtiene un retorno social de la inversión de 3.1 pesos por cada peso invertido. Además, se generan externalidades ambientales positivas como disminución de GEI, disminución de lixiviados y aumento en la vida útil de los rellenos sanitarios y externalidades sociales dadas por los productos obtenidos en el proceso y la disminución de la tasa de aseo.

Se recomienda para trabajos futuros evaluar otras variables de proceso y las relaciones entre éstas que no fueron estudiadas para este proyecto, esto con el fin de aumentar el desempeño del sistema. Adicionalmente, debido a que en este estudio sólo se evaluaron las externalidades positivas, se precisa evaluar también las externalidades negativas, así como el consumo de recursos naturales en el arranque y mantenimiento del sistema, la generación de CO₂ y H₂S, si se desea obtener un análisis más detallado.

5. Tabla de Anexos o Apéndices

Tabla 9. Documentos adicionales incluidos con el proyecto de grado.

Nombre	Desarrollo	Tipo de Archivo	Enlace google drive
Anexo 1: Carta permiso	Propio	PDF	https://goo.gl/NDSa1J
Anexo 2: Encuesta 1	Propio	PDF	https://goo.gl/S5pVXL
Anexo 3: Volante capacitación 1	Propio	PDF	https://goo.gl/28tUzs
Anexo 4: Video proceso biodigestión	Propio	MP4	https://goo.gl/EnW7Jk
Anexo 5: Encuesta 2	Propio	PDF	https://goo.gl/j12cYC
Anexo 6: Rendimiento del sistema SEBAC	Propio	PDF	https://goo.gl/3j1vcu
Anexo 7: Externalidades	Propio	XLSX	https://goo.gl/SrYy4c

Referencias

- [1] *Proyecto de Acuerdo 113 de 2011*, Cundinamarca, 2011.
- [2] "Disposición Final de Residuos Sólidos," Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Bogotá DC2015, Available: <http://www.superservicios.gov.co/content/download/10760/88380>.
- [3] D. Hoornweg and P. Bhada-Tata, "What a waste," in "A Global Review of Solid Waste Management," Banco Mundial2012, vol. 15.
- [4] U. d. Medellín, "Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos-PGIRS Municipio de Medellín 2016 – 2027," Alcaldía de Medellín, Medellín2015.
- [5] K. M. Noguera and J. T. Olivero, "Los Rellenos Sanitarios en Latinoamérica: Caso Colombiano," *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias*, vol. 34, pp. 347-356, 2010.
- [6] G. Lissens, P. Vandevivere, L. De Baere, E. M. Bley, and W. Verstraete, "Solid Waste Digesters: Process Performance and Practice for Municipal Solid Waste Digestion," *Water Science Technology*, vol. 44, pp. 91-102, 2001.
- [7] S. Álvarez Jaramillo and D. Duque García, "Análisis de Prefactibilidad de la Construcción de una Planta Generadora de Energía a partir de Desechos Orgánicos del Oriente Antioqueño," Ingeniería de Procesos, Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín, 2014.
- [8] M. L. Gaviria Alzate, A. Pérez-Hernández, V. G. Nevárez-MOorillón, N. Rinderknecht-Seijas, and H. M. Poggi-Varaldo, "Comparación de dos sistemas anaerobios acoplados para la biometanización de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos," *Interciencia*, vol. 28, pp. 436-442, 2003.
- [9] M. E. Montes Carmona, "Estudio Técnico-Económico de la Digestión Anaerobia Conjunta de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos y Lodos de Depuradora," D, Departamento de Ingeniería Civil: Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente E.T.S. I. de Caminos, Canales y Puertos, 2008.

- [10] R. Adhikari, "Sequential Batch and Continuous Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste in Pilot Scale Digesters," Master of Science, School of Environment, Resources and Development, Asian Institute of technology, Thailand, Enero, 2006.
- [11] G. Jaramillo Henao and L. M. Zapata Márquez, "Aprovechamiento de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia," Especialización en Gestión Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, 2008.
- [12] GreenLabUC and I. DICTUC, "Estimación de Parámetros para Cuantificación de Beneficios Sociales y Externalidades en Proyectos de Energización," Ministerio de Energía, Santiago de Chile 2012, vol. 3.
- [13] *Decreto 1077 de 2015*, 2015.
- [14] G. I. d. E. Moleculares, "Proyecto Evaluación de los residuos orgánicos urbanos del oriente antioqueño para la producción de fertilizantes mineral-orgánicos," Medellín, Antioquia, Colombia 2012.
- [15] *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*, 2011.
- [16] M. H. Gerardi, "Retention Times," in *The Microbiology of Anaerobic Digesters*: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 87-88.
- [17] H. Kapp, *Sludge with a High Solids Content (In German)*. 1984, pp. 1-300.
- [18] C. Lohri, "Titration Methodology According to Kapp for Monitoring of Anaerobic Digestion," in *VFA, alkalinity and A/TIC-ratio*, ed. Switzerland: Institute of Natural Resource Sciences - ZHAW, 2008.
- [19] J. Mata-Alvarez, S. Macé, and P. Llabrés, "Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives," *Bioresource Technology*, vol. 74, no. 1, pp. 3-16, 2000/08/01/ 2000.
- [20] D. Nguyen, V. Gadhamshetty, S. Nitayavardhana, and S. K. Khanal, "Automatic process control in anaerobic digestion technology: A critical review," *Bioresource Technology*, vol. 193, pp. 513-522, 10// 2015.
- [21] *STANDARD METHODS For the Examination of Water and Wastewater*, 1985.
- [22] *STANDARD METHODS For the Examination of Water and Wastewater*, 1985.
- [23] *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*, 2011.
- [24] *Productos para la industria agrícola. Productos orgánicos usados como abonos o fertilizantes y enmiendas o acondicionadores de suelo*, 2011.
- [25] I. A. S.A., "Estudio para la Evaluación Socioeconómica y Ambiental de Tres Prototipos de Biodigestores en Predios de Pequeños Productores Lecheros," Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), Santiago de Chile 2009.
- [26] G. Delacámara, "Guía para decisores: Análisis económico de externalidades ambientales," CEPAL, Santiago de Chile 2008.
- [27] F. Correa Restrepo. (2008) Tasa de descuento ambiental Gamma: una aplicación para Colombia. *Lecturas de Economía*. 141-162.
- [28] J. Nicholls, E. Lawlor, E. Neitzert, and T. Goodspeed, "A Guide to Social Return on Investment," ed. Reino Unido: The SROI Network, 2012.
- [29] B. H. Aristizábal Z., E. Vanegas C., J. P. Mariscal M., and M. A. Camargo V. (2015) Digestión Anaerobia de Residuos de Poda como Alternativa para Disminuir Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Rellenos Sanitarios. *Energética*. 29-36.
- [30] (2017, Octubre). *Precios CO2*. Available: <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>
- [31] O. C. d. C. Climàtic, "Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)," ed: Generlitat de Catalunya Comision Interdepartamental del Cambio Climático, 2011, p. 67.
- [32] S. d. C. y. Transportes. (2004, Octubre). *Bases para la Administración del Parque de Maquinaria a Cargo de CAPUFE*. Available: http://www.capufe.gob.mx/site/normateca/normas/77_Bases_para_la_Administracion_del_Parque_d_e_Maquinaria_a_cargo_de_CAPUFE_dic_05/Anexo05.pdf
- [33] E. Giraldo. Tratamiento de Lixiviados de Rellenos Sanitarios: Avances Recientes. *Revista de Ingeniería*.
- [34] EPM. (2014, Octubre). *El Vaso Altair, los próximos 15 años del Relleno Sanitario La Pradera*. Available:

- <http://www.epm.com.co/site/Home/Saladeprensa/BoletinesEstamosAhi/ElvasoAltairlospr%C3%B3ximos15a%C3%B1osdelRellenosanitariolaPradera.aspx>
- [35] C. Trujillo Villa, "Con Altaír II se extiende la vida útil del relleno La Pradera," in *El Colombiano*, ed. Medellín, 2014.
- [36] E. E.S.P. (2017, octubre). *Costos del servicio público de aseo*. Available: <http://enviaseo.gov.co/wp-content/uploads/2014/11/Tarifas-mes-de-septiembre-2017.pdf>
- [37] EPM. (2017, Octubre). *Tarifas Gas Natural 2017 en el Valle de Aburrá*. Available: http://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/Clientesyusuarios/Hogaresypersonas/Gasnatural.aspx
- [38] S. d. Hidrocarburos, "Proyección de Precios de los Energéticos para la Generación de Energía Eléctrica," Unidad de Planeación Minero Energética, Colombia2015, Available: http://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/publicaciones/Proyeccion_de_los_precios_de_los_combustibles_junio_2016.pdf.
- [39] B. d. l. República, "Informe sobre Inflación," Bogotá D.C.2017, Available: http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/isi_jun_2017.pdf.
- [40] I. ICF Consulting Canada, "Long-Term Carbon Price Forecast Report," Ontairo Energy Board2017, Available: <https://www.oeb.ca/sites/default/files/uploads/OEB-LTCPF-Report-20170531.pdf>.
- [41] (2017) ¿Cuándo llegará el salario mínimo al millón de pesos? *Dinero*. Available: <http://www.dinero.com/edicion-impresa/la-grafica/articulo/cuando-llegara-el-salario-minimo-al-millon-de-pesos/242485>
- [42] S. d. demanda, "Proyección de la Demanda de Energía Eléctrica y Potencia Máxima en Colombia," Unidad de Planeación Minero Energética2015, Available: http://www.siel.gov.co/siel/documentos/documentacion/Demanda/Proyeccion_Demanda_Energia_Electrica_Octubre2015.pdf.
- [43] EPM. (2017, Octubre). *Tarifas para servicios de acueducto y aguas residuales 2017*. Available: http://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/Clientesyusuarios/Hogaresypersonas/Agua/Tarifas.aspx
- [44] Corantioquia, "Informe Convenio Interadministrativo 140964," Alcaldía de Envigado2015, Available: http://www.corantioquia.gov.co/sitios/ExtranetCorantioquia/ciadoc/RESIDUOS%20SOLIDOS/GA-CV_1409_64_2014.pdf.
- [45] T. Forster-Carneiro, M. Pérez, and L. I. Romero, "Composting potential of different inoculum sources in the modified SEBAC system treatment of municipal solid wastes," *Bioresource Technology*, vol. 98, no. 17, pp. 3354-3366, 2007/12/01/ 2007.
- [46] M. H. Gerardi, "Anaerobic Digestion Stages," in *The Microbiology of Anaerobic Digesters*: John Wiley & Sons, Inc., 2003, pp. 51-57.
- [47] B. A. Parra-Orobio *et al.* (2014) Influencia del pH sobre la digestión anaerobia de bioresiduos de origen municipal. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 553-562. Available: <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v17n2/v17n2a27.pdf>
- [48] P. Vandevivere, L. Baere, and W. Verstraete, *Types of anaerobic digester for solid wastes*. 2002.
- [49] J. Fernández Rodríguez, "Optimización de la digestión anaerobia seca de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) en reactores en fases de temperatura," D, Departamento de Ingeniería Química y Tecnología de Alimentos, Universidad de Cádiz, Cádiz, 2010.
- [50] Y. Lorenzo Acosta and M. C. Obaya Abreu "La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I," *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 39, pp. 35-48, 2005.
- [51] L. García-Caro Andreu, "Estudio del comportamiento del tratamiento anaerobio de fangos ante modificaciones del pH.," Esp. en Química Industrial, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, Universidad Politécnica de València, 2015.
- [52] K. Rivera Echavarría, "Evaluación de Impactos Ambientales Generados en el Aprovechamiento Energético y Material de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos en el Municipio de El Carmen de Viboral, Antioquia," Maestría en Ciencias Ambientales, Corporación Académica Ambiental, Universidad de Antioquia, 2015.
- [53] B. A. Parra Orobio, "Producción de Metano a partir de la Digestión Anaerobia de Biorresiduos de Origen Municipal," Magíster en Ingeniería Énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y de Ambiente EIDENAR, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2014.

- [54] V. N. Nkemka and X. Hao, "Start-up of a sequential dry anaerobic digestion of paunch under psychrophilic and mesophilic temperatures," *Waste Management*, 2016/06/21/ 2016.
- [55] J. M. Muñoz C, J. A. Muñoz, and C. Montes R, "Evaluación de Abonos Orgánicos utilizando como Indicadores Plantas de Lechuga y Repollo en Popayán, Cauca," *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, vol. 13, pp. 73-82, 2015.
- [56] S. Biobolsa, "Manual de BIOL," ed. México D.F., 2017.
- [57] S. M. Puerta Echeverri, "Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos," *Revista LASALLISTA de Investigación*, vol. 1, pp. 56-65, 2004.
- [58] A. F. Romero Guiñán and I. Pereda Reyes. (2013) **Biofertilizantes a partir de residuos agrícolas.** *Ecosolar*. Available: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/ecosolar/Ecosolar49/HTML/Articulo06N.html>
- [59] S. Clavijo and Bancolombia. (2017, Febrero). *Bonos de Carbono y Mercado de Capitales*. Available: <http://anif.co/sites/default/files/feb8-17.pdf>
- [60] EPM. (2017, Octubre). *Tips de uso inteligente*. Available: http://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/Clientesyusuarios/Hogaresypersonas/Gasnatural/Tipsdeusointeligente.aspx
- [61] C. Octaviano, "Análisis general de las externalidades ambientales derivadas de la utilización de combustibles fósiles en la industria eléctrica americana," Naciones Unidas CEPAL, México D.F.2011, Available: <http://www20.iadb.org/intal/catalogo/PE/2011/08855.pdf>.
- [62] F. X. Aguilar and R. Botero-Botero, "Estimación de los Beneficios Económicos Totales de la producción de biogás utilizando un biodigestor de polietileno de bajo costo," ed. Costa Rica: Universidad EARTH, 2003.