

Integración de Modelos de Evaluación de Viabilidad Económica e Impacto Ambiental a Modelos Empíricos y Técnicos del Proceso de Codigestión Anaeróbica

Melo Katerin, Estudiante de Ingeniería Ambiental¹, Piñeros Viviana, Estudiante de Ingeniería Ambiental¹
¹Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, katerinmelo@usantotomas.edu.co, viviana.pineros@usantotomas.edu.co

Abstract– *Evaluar la viabilidad económica de la producción de energía eléctrica, a partir de la co-digestión anaeróbica de la cáscara de cacao, estiércol de cerdo, fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (RSU), lodos de depuradora y residuos de frutas provenientes de despulpadoras en Cundinamarca, Colombia, en contraste con mezclas sugeridas en el modelo empírico realizado previamente según el artículo [1], mediante estudio de disponibilidad de los residuos, estudio de localización del proyecto con el método MEDIDA DE PREFERENCIA DE LOCALIZACIÓN (mpl), seguido de estudio de ingeniería de proyecto y evaluación financiera, determinando así indicadores financieros. Por último se realizará la evaluación de impacto ambiental y determinación de indicadores de sostenibilidad.*

Se ha encontrado una generación total de todos los residuos de 1609.34 Ton para el mes de Diciembre del año 2017 y con una proyección de generación de 64960 Ton / año para el año 2038 de todos los residuos, de los cuales se encuentran disponibles un total de 44044.7 Ton en el 2017, bajo los cuales se realizará el estudio de viabilidad; actualmente el proyecto está en desarrollo en la etapa de Ingeniería de proyectos.

I. INTRODUCCIÓN

A Nivel mundial para el año 2050 se estima una población aproximada de 9.6 Billones de habitantes, lo cual implica un aumento en los desechos generados [2]. Donde la tercera parte de estos poseen una composición orgánica, producida por restos de alimentos crudos o procesados [3]. En Colombia para el año 2008 más de 28.800 Ton de residuos eran producidos diariamente, cifra que sigue en aumento [4], conllevando un alto impacto ambiental.

Hoy en día algunos de estos residuos son valorizados por procesos de digestión anaeróbica siendo estos convertidos en energía o en productos fertilizantes [5]. En Europa en el año 2012 se manejaron aproximadamente el 90% de los residuos orgánicos con esta metodología [6]. Sin embargo este proceso puede llegar a ser inhibido debido a la acumulación de altos niveles de amoníaco, producto de la degradación del contenido proteico del sustrato lipídico y la acumulación de cadenas largas de ácidos grasos [7].

Con el propósito de evitar inhibiciones en el proceso, se utiliza la co-digestión anaeróbica, donde se pueden mezclar varios sustratos que reduce la sobrecarga orgánica, ya que se

diluye el contenido de Nitrógeno y mejora la biodegradación [8].

Los esfuerzos por encontrar mayor producción de energía eléctrica a partir de la mezcla de sustratos han aumentado considerablemente, es un potencial que crece fuertemente y rápidamente [9], es un sector en el que aumenta el empleo, ayuda a proteger ecosistemas y biodiversidad, y minimiza el desperdicio y la contaminación [10]. Sin embargo, aunque hay un adelanto en tecnologías hay un vacío en información respecto a viabilidad económica en la producción de energía [11].

El objetivo del presente estudio evalúa la viabilidad económica del proceso de co-digestión anaeróbica para la producción de energía eléctrica, y la evaluación de impacto ambiental en las actividades que esta conlleva. Este proceso tendrá en cuenta un modelo empírico que arrojó unas mezclas idóneas para la producción de energía, compuesta por 5 residuos en un estudio realizado en Cundinamarca, Colombia [1].

II. MATERIAL Y METODOLOGÍA

Para el desarrollo del trabajo se planeó una metodología basada en 3 etapas, la primera enfocada a evaluar la disponibilidad de biomasa, con el fin de obtener un mapeo de la localización de los residuos, la cantidad producida y la disponibilidad final. La etapa 2 se denominó gestión de proyecto, donde se buscó diseñar la planta con un estudio técnico y calcular los costos para la puesta en marcha del proyecto, con la evaluación financiera. La etapa 3 se denominó evaluación ambiental, donde se buscó identificar el impacto ambiental generado por la empresa.

A. ETAPA 1

Ubicación de los residuos e Identificar disponibilidad

Colombia es un país que dispone de gran diversidad, a nivel cultural, ambiental y social, es por esto que se requiere enfocar el proyecto en las regiones donde se encuentra la problemática, es decir, los 5 residuos orgánicos mencionados anteriormente.

A partir de la revisión, se determinó que se debía dar uso a los residuos más generados, por actividades realizadas a nivel industrial y agropecuario, como estiércol de cerdo, residuos de cacao (cacota), lodos de PTAR estabilizados, residuos sólidos urbanos (RSU) y residuos de frutas, para el proceso de co-

mismo departamento o en los departamentos más próximos al de Cundinamarca.

Con la información anterior se realizó una revisión bibliográfica de los residuos (¹DANE, ²UMATAS, Federaciones y artículos de investigación) estableciéndose dónde se localiza la mayor producción a nivel Nacional y Departamental. Ya con los lugares más productores establecidos, se diseñó una encuesta para cada residuo y se aplicaron en el departamento de Cundinamarca. Con estos datos se determinaron cantidades demandadas y ofertadas en el mercado en cada residuo, si el mercado existía, y se determinó la cantidad de producción de cada residuo; finalmente se estimaron las cantidades mensuales, se proyectaron estos residuos por cada mes, ya que los residuos pueden variar según la temporada climática, y posterior se proyectó hasta el año 2038 (20 años de vida productiva del reactor) basado en índices de crecimiento de cada sector.

El tamaño del reactor tuvo en cuenta potencial metanogénico de mezclas realizadas en los residuos con anterioridad, y cantidades de residuos a tratar hasta el año 2038 para la generación de biogás.

Con datos de disponibilidad y ubicación de tales residuos se determinó la ubicación exacta de la planta, mediante el modelo de Brown y D.F.Gipson, llamado “Método de la medida de preferencia de localización (MPL)[12],” donde se determinan factores objetivos y subjetivos para tres localizaciones dentro del territorio de Cundinamarca.

Con la localización y tamaño del proyecto ya determinado se procedió a realizar un estudio de “Ingeniería de proyecto”, que tiene en cuenta, descripción de los productos, diagrama de proceso productivo de biogás y de la producción de energía, selección de equipos y tecnología, recurso humano (mano de obra directa e indirecta), y adecuaciones de instalaciones para el almacenamiento de materias primas e insumos y para producto terminado.

Finalizado la etapa de ubicación y disponibilidad de residuos, se plantea seguir con la siguiente metodología a futuro.

B. ETAPA 2

Evaluación económica

En la evaluación económica, se realizará un estudio sobre el comportamiento que ha tenido el mercado energético en Colombia (oferta-demanda). Igualmente se hará una entrevista al experto en temas energéticos, y finalmente se realizará las debidas proyecciones sobre generación de energía requerida para venta a la red eléctrica y autoconsumo de la planta.

Después de culminar el estudio de mercado energético, el siguiente paso a proceder es un estudio de factibilidad financiera y económica, donde se correlaciona el costo requerido en el estudio de “ingeniería de proyecto” y las proyecciones del mercado energético.

Finalmente para concluir en el estado financiero se aplicarán una serie de indicadores como Tasa Interna Bruta (TIR), Valor Presente Neto (VPN) y relación costo beneficio.

C. ETAPA 3

Evaluación Ambiental

Se utilizaron dos herramientas de medición: cálculo de huella de carbono y matriz de impactos ambientales.

Para realizar el cálculo de huella de Carbono, producida por la actividad del proyecto, se implementó la metodología mixta basada en Greenhouse Gas Protocol e ISO 14064, la cual fue adaptada en la ciudad de Bogotá por la Corporación Ambiental Empresarial (CAE), determinando primero el factor de emisión (F.E.) multiplicado por la cantidad del componente generador de gases de efecto invernadero.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

ETAPA1: Las empresas encuestadas que generan los residuos objeto de estudio, informaron por medio de encuestas la cantidad de residuo que producían y lo que se estaba haciendo actualmente con los mismos. Para el actual uso de los residuos se encontraron 4 clasificaciones: 1. Sin ningún uso, desechado por la empresa, 2. Uso determinado dentro del proceso productivo, 3. Venta de este residuo a otros, 4. Pago por recolección y servicio de disposición final a otras empresas. La información se resume en la tabla 1.

Tabla 1 Estado de disponibilidad de los residuos

RESIDUO	SIN NING UN USO	USO PREDETERMINADO	VENTA A TERCEROS Y PRECIO POR Kg	PAGO POR SERVICIO DE RECOLECCIÓN * Kg		
Lodos	93%	7%				
Estiércol de cerdo		1%	99%	\$200		
Cacota	15%		85%	\$136		
RSU	5,43 %		38%	\$113	39%	\$164.15
Frutas	56%			42%	\$1.702	

El residuo con mayor disponibilidad es el estiércol de cerdo con 37.547 ton/año, y el que tiene menor disponibilidad es el residuo proveniente de despulpadoras de frutas con 197,71 ton/año para el primer año del proyecto

ETAPA 2: Teniendo en cuenta la producción de energía, se realizó la ingeniería de proyectos evaluando equipos, mano de obra, localización de proyecto, macro ruteo y por último la inversión inicial, para cada mezcla.

El tiempo de operación de la planta se distribuye de la siguiente manera: 24 horas / 7 días de la semana; con un tiempo de retención hidráulico de mezcla de 21 días (TRH), lo que lo hace un proceso discontinuo o en batch donde se tendrán ciclos de producción de 23 días incluyendo días de cargue de materia prima y descargue de digestato.

Por otro lado para determinar la ubicación de la planta en el Departamento de Cundinamarca, se eligieron tres municipios de preferencia bajo el criterio de cercanía con los proveedores, los cuales fueron: Mosquera, Soacha Y Tenjo, se aplicó la

¹ Departamento Administrativo Nacional de Estadística

metodología MPL, con el fin de determinar la localización más idónea. Para la micro localización se involucró los resultados de la metodología MPL y un macro ruteo.

Los factores subjetivos a tenidos en cuenta fueron servicios públicos de la zona, facilidad de conexión a la red eléctrica, ubicación de proveedores, adecuación de instalaciones, vías de comunicación, disponibilidad y confiabilidad de sistemas de apoyo (hospitales, CAI de policías, bomberos), seguridad, peaje entrada a Bogotá, facilidad de acceso a servicio de transporte público para los trabajadores. Estos factores subjetivos son ponderados entre el peso de cada uno. El factor objetivo tuvo en cuenta la mejor cotización del precio por m2 en cada Municipio.

Igualmente esta metodología determinó que la mejor área para la instalación de la planta de energía con respecto a las mezclas 1 y 2 y ubicación de proveedores es Mosquera con una inversión para infraestructura de COP \$106.717.240 (875 m2 construidos) respectivamente; para la mezcla 3 se localiza la planta de energía en Soacha (igualmente teniendo en cuenta la ubicación de los proveedores), requiriendo una inversión de COP \$107.144.109 (878 m2 construidos).

ETAPA 2b: Con el diagrama de flujo se identificaron los equipos requeridos, los cuales fueron cotizados obteniendo los siguientes valores para el equipo básico: para la mezcla 1 COP \$306.635.392, mezcla 2 COP \$302.331.370 y mezcla 3 COP \$290.619.335. Con respecto al equipo auxiliar (EA), debido a que es el mismo para las tres mezclas, se tiene para los tres casos COP \$281.185.683. En el equipo auxiliar se incluyó todo el concerniente a laboratorio, vehículos, equipos de comunicación, de almacenamiento y de emergencia.

La mano de obra requerida suma una nómina total de COP \$585.080.010 anualmente, incluido las prestaciones de ley colombianas, aproximadamente del 58,02% del sueldo base, compuesto por 17 empleados, precio equivalente para cada una de las mezclas. Para realizar la proyección de incremento anual de nómina se utilizó el 5.7%, proveniente de un histórico de aumento salarial en Colombia.

Respecto a los servicios públicos se contará con agua, luz y telefonía, donde el consumo energético será proporcionado por la planta (autoconsumo) (ver tabla 6). El agua, tiene en cuenta el personal de la empresa, según RAS 2000 (Reglamento Técnico del sector de Agua Potable y Saneamiento Básico), cada empleado tiene un consumo de 150L/día, adicionalmente el reactor requiere de un volumen de agua necesario para el proceso anaeróbico.

Para la obtención de los indicadores VPN y TIR se estimó la totalidad de los ingresos directos e indirectos (ventas y recolección de residuos), egresos (costos de operación, recambio de equipos y un 10% adicional por imprevistos), para obtener las utilidades antes de impuesto. Se calculó la depreciación de equipos, impuestos sobre el patrimonio y utilidades.

En el proceso productivo se genera 785 Ton anuales de digestato para la mezcla uno, siendo este el de mayor

producción. Este tienen un valor agregado como abono, definiéndose así producto potencial de ingreso para la empresa, estimado por COP \$2.000 / kg.

Por lo tanto en la Ilustración 1 se evidencia la Tasa de Retorno, según tres escenarios: E1 sin valorización de residuos; E2 valorización mínima; finalmente E3, valorización máxima

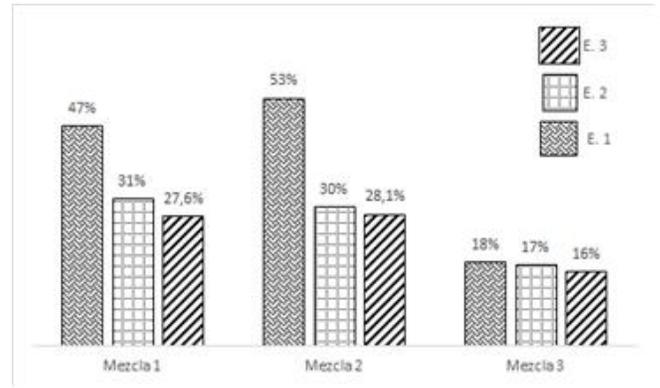


Ilustración 1 Tasa Interna de Retorno

La tasa interna de retorno, indica que el escenario más atractivo para inversión es el mezcla 2, E1 con un 53% de rentabilidad. Esto es debido a que el ingreso no operacional obtenido por la recolección de los residuos es mucho mayor que en la mezcla 1.

Se estima un VPN de COP \$4.658.393.596 para la mezcla 1 y mezcla 2 de COP \$7.898.027.079 hasta el año 2038. El proyecto con la mezcla 3 es considerado inviable, ya que para el año 2028 se ve en la necesidad el recambio de los equipos (aumento en la salida de los egresos de COP \$583.043.473), lo que genera que la empresa tenga pérdidas a partir de este año por COP -\$2.964.329

ETAPA 3:

La medición de impacto ambiental realizada en la matriz, identificó que las áreas más afectadas son fermentación y secado de lodos, así logrando la degradación de los componentes agua y aire y los aspectos de aumento de consumo de agua y producción de olores, para finalmente alterar la calidad del aire, por otro lado el impacto más alto es el de producción de energía con micro turbinas, el cual incide de manera positiva en el proyecto, estimando la disminución del impacto; igualmente sucede con el componente suelo con la disposición final de los residuos al relleno sanitario.

Si la empresa desea desarrollar una gestión ambiental para aplicar las medidas pertinentes, debe enfocarse en los siguientes aspectos: componente AIRE, se debe enfocar en la generación de malos olores, principalmente SOX y NOX principalmente en las zonas de fermentación y almacenamiento de lodos. Componente SUELOS, denominado como generación de residuos dentro de la tabla 9, se debe preparar acciones que mitiguen el aumento de vectores en la zona de almacenamiento de materia prima y de lodos, adicionalmente

en la zona de triturado un cuidado especial para los residuos que se esparcen. Componente AGUA, se evidencia que el consumo de agua en el proceso de fermentación es importante, por lo tanto se debe trabajar en medidas que puedan compensar este hecho, se realizaron fichas de manejo para establecer objetivos, metas, plan de acción y costos.

Para el contexto del proyecto se calcula la huella de Carbono, teniendo en cuenta la ISO 14064 – 1 y 14064 – 2, la cual es en términos de la organización, definiéndose el inventario para la generación de G.E.I y el diseño e implementación de medidas para la mitigación de este tipo de gases. Este tipo de cálculo, requiere definir el factor de emisión (F.E) en unidades de Ton de CO₂eq. Una de las formas para determinarlo es establecida por la Corporación Ambiental Empresarial (CAEM). Esto consiste en la determinación de la cantidad de gases de efecto invernadero, generados en la empresa.

La CAEM, calcula el factor de emisión para consumo de combustible, energía eléctrica, actividades agropecuarias, tratamiento de residuos aplicables al proyecto. Cada mezcla posee una huella de carbono, ya que requiere de diferentes cantidades de materia prima (estiércol de cerdo, residuos orgánicos y lodos de PTAR). Igualmente cada mezcla requiere de una cantidad de galones de diésel para la recolección de sus residuos (Macro ruteo). Los datos calculados son determinados en su gran mayoría por la Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), quien otorga datos ya estandarizados. Finalmente se concluye los siguientes datos de huella de carbono en cada una de sus mezclas M1 262, M2 390 M3 143 Ton CO₂ equivalentes, identificando mayor cantidad de emisiones de G.E.I en la mezcla 2, a razón de mayor recorrido para la recolección de los sustratos (macro ruteo), mayor consumo de energía en la planta para la operación y mayor cantidad de residuos agropecuarios (estiércol de cerdo).

IV. CONCLUSIONES

Actualmente en el desarrollo del proyecto y a partir de los análisis se concluyó que:

En efecto los residuos sólidos urbanos son una problemática ambiental y para las grandes empresas representa un costo alto, el disponer estos residuos de una adecuada manera, lo que indica que es viable presentar una opción en donde se puedan aprovechar estos residuos como insumo de producción energética, en el caso de los residuos sólidos urbanos y el residuo de frutas provenientes de despulpadoras, existe un nicho de negocio, puesto que las empresas generadoras están pagando cerca de \$150 cop el Kilogramo de RSU, y en el caso de la fruta pagan \$96 cop el kilogramo, actualmente las empresas que compran este residuo producen abono tipo A para la venta.

Por otro lado los lodos de depuradora, están siendo depositados y secados en unos lechos, pero actualmente no existe un aprovechamiento y se requiere con urgencia destinar estos lodos. En el caso de la cáscara de cacao y el estiércol de cerdo ya existe un mercado establecido, donde los campesinos venden los bultos de cada residuo a un precio estimado.

De todos los residuos generados (1609,34 ton/mes), reportados en las encuestas, aproximadamente 882,778 ton/mes están dispuestos para venta, 454,10 ton/mes se encuentran demandados por otras empresas, y por último 272,47 ton/mes están disponibles de forma gratuita.

Los residuos disponibles fueron proyectados anualmente y posterior hasta el año 2038 teniendo una aproximación de disponibilidad de 59656.7 ton anuales.

Para crear un mercado en donde los residuos puedan valorarse y aprovecharse, se requiere de una ubicación estratégica que este en función de la cercanía de los productores, es así como Mosquera es el municipio más adecuado dentro de Cundinamarca, para la instalación de la planta con respecto a costos y condiciones del área.

Se identifica que la mayor producción de energía está dada por la mezcla 1 con una producción de 6.767 (m³ CH₄/año), producción de potencia 3,88 kW y energía de 28.288 KWH, para lo cual se requiere una inversión inicial de COP \$2.066.329.499 incluyendo equipos, capital de trabajo y compra de terreno. Valorizando cada residuo a COP \$200 por kg se obtendrá un Valor Presente Neto de COP \$1.424.393.951,45, para el año 2038 y una tasa interna de retorno de 27.6%, generando rentabilidades superiores del 25% y teniendo la oportunidad de valorizar 4 residuos.

El mayor impacto ambiental, es generado en el proceso de fermentación y secado de lodos, por las emisiones de gases de efecto invernadero, pero esto es compensado por la generación de energía a partir del CH₄, ya que la huella de carbono no es tan significativa

Respecto a huella de carbono de mezcla 1 en promedio de 262 Ton CO₂ eq, un valor bajo debido a que los kilómetros a recorrer en el macro ruteo son menores, y las concentraciones de estiércol también, en comparación con los residuos requeridos en Mezcla 2 y 3.

V. REFERENCIAS

- [1] A. Rodríguez, J. Ángel, E. Rivero, P. Acevedo, I. Cabezas y M. Hernández, «Evaluation of the Biochemical Methane Potential of Pig Manure, Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Cocoa Industry Residues in Colombia.» *Chemical Engineering Transactions*, 57,5-60, 2017.
- [2] N.unidas, «World Population Prospects: The 2012 Revision.,» 2013.
- [3] FAO, «Global Food Losses and Food Waste - Extent, Causes and Prevention,» Roma, 2011.
- [4] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Diagnóstico nacional de salud ambiental,» Colombia, 2012.
- [5] M. R. M. C. J.-P. S. J.-P. D. R. E. G. Capson-Tojo, Food waste valorization via anaerobic processes: a review, vol. 15, *Environ. Sci. Bio/Technol*, 2016, pp. 499-547.
- [6] L. M. De Baere, Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste in Europe – status, experience and prospects in: *Waste Management*, vol. 3, Recycling and Recovery, pp. 517-526.
- [7] J. T. E. B. A. C. M.J. Broughton, Anaerobic batch digestion of sheep tallow, vol. 5, *Water Research*, 1998, pp. 1423-1428.

- [8] M. J. Cuertos, Anaerobic digestion and co-digestion of slaughterhouse waste (SHW): Influence of heat and pressure pre-treatment in biogas yield, vol. 3, waste management, 2010, pp. 1780-1789.
- [9] R. M. R.M. Jingura, The potential for energy production from crop residues in Zimbabwe, vol. 32, Biomass Bioenergy, 2008, pp. 1287-1292.
- [10] A. B. H Katuwal, Biogas: a promising renewable technology and its impact on rural households in Nepal, vol. 13, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, pp. 2668-2674.
- [11] Peter Nabusi Walekhwa, Economic viability of biogas energy production from family-sized digesters in Uganda, vol. 70, 2014, pp. 26-39.
- [12] Sunderesh Heragu, Facilities, Edition 4, Taylor and Francis group, 2016.