

Evaluación técnica, económica y ambiental de una propuesta para la gestión de los residuos sólidos urbanos en Manta, Ecuador

Technical, economic and environmental evaluation of a proposal for the management of urban solid waste in Manta, Ecuador

María B. Muñoz- Menéndez^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-5780-7049>

Ana Margarita Contreras-Moya² <https://orcid.org/0000-0001-9374-9376>

Ronaldo Francisco Santos- errero² <https://orcid.org/0000-0002-5009-2084>

Elena R. Rosa-Domínguez² <https://orcid.org/0000-0002-5371-0976>

Teresa Cárdenas Ferrer² <https://orcid.org/0000-0003-2054-3136>

¹ Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador

² Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba

* Autor para la correspondencia: correo electrónico: beleta_1983@hotmail.com

RESUMEN

La gestión de residuos sólidos es fundamental para la sostenibilidad del planeta, por lo que hacía ello debe ser la tendencia de las investigaciones. La digestión anaeróbica de la fracción orgánica constituye un proceso atractivo, cuyos resultados muestran las ventajas de la separación de fases, que permite optimizar la acidogénesis y metanogénesis por separado y proporciona productos de alto valor agregado como hidrógeno y otros. El objetivo de este trabajo fue evaluar técnica, económica y ambientalmente una alternativa para la gestión de los residuos sólidos urbanos en Manta, Ecuador a partir de un modelo que incluye procesos de reciclaje de la fracción inorgánica de los residuos, digestión anaeróbica en fases separadas de la fracción orgánica y disposición final en relleno sanitario. Los resultados experimentales globales muestran una remoción promedio de sólidos totales (ST) de 58,24 % con valor máximo de 71,31 %; una remoción promedio de 64,83 % de sólidos totales volátiles (STV) con valor máximo de 78,78 %, rendimientos promedio de la producción de hidrógeno de 35 LH₂/kg STV alim y producción de metano de 426 LCH₄/kg STV alim. La evaluación mediante Análisis de Ciclo de Vida evidencia las

ventajas de la alternativa propuesta con relación a la situación actual de la gestión de los RSU de Manta, con valores de puntuación única de -7,46 kPt y 15,55 kPt, respectivamente. El análisis económico refleja la factibilidad de la inversión requerida, con un VAN de \$ 6 100 987,57 y una TIR de 66 %, que puede ser recuperada en un período de aproximadamente dos años.

Palabras clave: residuos sólidos urbanos; digestión anaeróbica; fases separadas; análisis de ciclo de vida, evaluación técnico- económica.

ABSTRACT

Solid waste management is essential for the sustainability of the planet, for that, toward it should be the tendency of the researches. The anaerobic digestion of the organic fraction constitutes an attractive process, the results of which show the advantages of phase separation, which allows to optimize acidogenesis and methanogenesis separately and provides high added value products such as hydrogen and others. The objective of this work was to evaluate technically, economically and environmentally an alternative for the management of urban solid waste in Manta, Ecuador from a model that includes recycling processes of the inorganic fraction of the waste, anaerobic digestion in separate phases of the organic fraction and final disposal in a sanitary landfill. The global experimental results show an average removal of total solids (TS) of 58, 24 % with a maximum value of 71,31 %; an average removal of 64,83 % of total volatile solids (STV) with a maximum value of 78,78 %, average yields of hydrogen production of 35 LH₂/kg STV feed and methane production of 426 LCH₄/kg STV feed. The evaluation by Life Cycle Analysis shows the advantages of the proposed alternative in relation to the current situation of the management of MSW in Manta, with single score values of -7,46 kPt and 15,55 kPt, respectively. The economic analysis reflects the feasibility of the required investment, with a NPV of \$ 6 100 987,57 and an TIR of 66 %, which can be recovered in a period of approximately two years.

Keywords: urban solid wastes; anaerobic digestion; separate phases; life cycle analysis; technical- economic evaluation.

Recibido: 18/04/2021

Introducción

La disposición final de los desechos sólidos es, en este momento, uno de los problemas más sensibles que alteran a las sociedades modernas tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, ya que los efectos ambientales adversos afectan a todos sin distinción. El sistema más usado actualmente es la disposición final en relleno sanitario y de forma general, la gestión de los desechos sólidos, es fuente de costos económicos, ambientales y a la salud humana. En ese sentido, deben realizarse esfuerzos para encontrar soluciones viables y reducir así, los impactos negativos de esta actividad.

La gestión integral de los residuos sólidos busca ser compatible con las preocupaciones ambientales y la salud pública y se enmarca en la filosofía del desarrollo sostenible. En diferentes países la jerarquización de tales alternativas es similar y se agrupa como: prevención (minimización y reducción en la fuente), valorización, reutilización, reciclaje y compostaje, recuperación de energía (digestión anaerobia, incineración, etc.) y disposición final en rellenos sanitarios. Las tecnologías implicadas inciden en los sistemas productivos, ya que se hace necesario producir más con menos recursos. Considerando lo anterior, la actual jerarquía de gestión de residuos, puede verse como un menú de opciones de recuperación, entre la prevención y la disposición final y esto es coincidente con lo formulado por diferentes autores. ^(1,2,3,4)

La reutilización no solo es importante por la riqueza de los materiales desechados, sino por los beneficios indirectos que implica: menor ocupación del suelo destinado al vertido, ahorro energético y disminución de la contaminación. Por otra parte, se ratifica el valor del tratamiento, ya que modifica las características físicas, químicas o biológicas de los residuos, para aprovecharlos, estabilizarlos o reducir su volumen, antes de la disposición final, considerando que la gestión adecuada de los residuos sólidos urbanos (RSU) requiere tratar por separado las fracciones orgánica e inorgánica.

La digestión anaerobia es uno de los procesos de tratamiento más atractivos en la actualidad y la conducción del mismo en fases separadas es un esquema novedoso que mantiene dos reactores en serie, en los que se llevan a cabo las fases de acidogénesis y metanogénesis, respectivamente con el objetivo de conseguir un tiempo de retención

global inferior al de un único reactor. En la etapa acidogénica (fermentación oscura) se genera un biogás con alto contenido en hidrógeno, lo que tiene especial interés ya que el hidrógeno se considera el vector energético del futuro próximo y su producción a partir de la degradación de residuos orgánicos presenta un especial interés, ⁽⁵⁾ ya que, reciclar tomado el residuo como materia prima es la estrategia más afín al principio de sustentabilidad y las bio-refinerías constituyen una de las aplicaciones más avanzadas de la misma.

El aprovechamiento de la biomasa como materia prima, para la obtención de productos y energía, presenta grandes ventajas pues constituye una fuente renovable, permite tener un control de desechos y reduce la contaminación al disminuir la emisión de gases contaminantes.⁽⁶⁾ La biomasa es el mayor contribuyente a la generación de energías renovables ⁽⁷⁾ y según BIOPLAT y SusChem-España ⁽⁸⁾ y Chandra, ⁽⁹⁾ se refiere a la fracción biodegradable de los productos y residuos de origen biológico procedentes de diferentes actividades, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y urbanos.

Actualmente se han desarrollado diferentes estudios de producción de biogás a partir de numerosas materias primas, aún insuficientes en el caso de la fracción orgánica de los residuos urbanos (FORSU) y sobre todo en el caso de la digestión anaerobia en fases separadas. El estudio y utilización de estos métodos brinda la posibilidad de tratar un residuo que puede ser contaminante para el medio ambiente, reciclarlo y convertirlo en productos de alto valor agregado.

Se ha demostrado la importancia y pertinencia de la instalación de plantas para el manejo integral de los desechos sólidos, capaces de conducir la gestión de estos residuos al reciclaje de materiales, la elaboración de abonos y el aprovechamiento del biogás producto del proceso de degradación de la materia orgánica, entre otras acciones. ⁽¹⁰⁾

Algunos autores ⁽¹¹⁾ reportaron que una serie de procesos de fermentación oscura - digestión anaeróbica metanogénica de la FORSU, que ellos crearon en procesos termofílicos y mesofílicos, fueron en promedio 76 y 42 % superior, en términos de potencial energético, que el bio-reactor metanogénico solo. Además, otros ^(12,13) reportaron otras mejoras logradas en la etapa de fermentación de hidrógeno.

En la literatura científica se observa un interés por la valoración de las cadenas de valor basadas en biomasa, cuya sostenibilidad es principal para la implantación de bio-

refinerías, ya que los productos de estas deben mostrar menores impactos que los productos convencionales. ^(14, 15, 16, 17, 18) Las metodologías más comunes que aportan valoraciones adecuadas son el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y análisis económico.

De aquí que una valoración científicamente fundamentada, basada en ACV de nuevos productos basados en biomasa es beneficioso para la toma de decisiones. Algunos autores ⁽¹⁹⁾ coinciden con lo anterior y otros ⁽²⁰⁾ plantean la metodología de ACV como la mejor herramienta para evaluar el desempeño medioambiental de sistemas de gestión de residuos, ya que permite evaluar, desde una perspectiva global, todos los impactos ambientales que ocasiona la gestión integral de los residuos. ^(21, 22, 23)

Habiendo concluido la investigación del estudio técnico, el análisis económico permite determinar cuál es el monto de los recursos económicos necesarios para la realización del proyecto, cuál será el costo total de la operación de la planta (que abarque las funciones de producción, administración, ventas), así como otra serie de indicadores que servirán como base para la parte final y definitiva del proyecto, que son la evaluación económica para determinar la factibilidad económica del proyecto unido a la evaluación del impacto ambiental.

La evaluación de la rentabilidad esperada del proyecto se lleva a cabo haciendo uso de diversas herramientas. ⁽¹⁰⁾ El Valor Actual Neto (VAN) es el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión, el cual es muy importante para la valoración de inversiones en activos fijos, a pesar de sus limitaciones respecto a situaciones inesperadas. La Tasa Interna de Retorno (TIR) evalúa el proyecto en función de una única tasa de rendimiento por periodo con la cual la totalidad de los beneficios son exactamente iguales a los desembolsos expresados en moneda actual. Se utiliza para decidir sobre la aceptación o rechazo de un proyecto de inversión. El Tiempo de Recuperación de la Inversión (TRI) denota el plazo en el que los ingresos netos cubren el monto de la inversión inicial del proyecto. Es decir, el TRI tiene como objetivo determinar el número de años en que se recupera la inversión.

Materiales y métodos

Según el procedimiento experimental realizado por algunos autores ⁽²⁴⁾ se simula a nivel de laboratorio el proceso de digestión en fases separadas de los RSU de Manta. A partir de los resultados experimentales se propone un modelo para la gestión de los RSU de Manta que incluye la digestión anaeróbica en fases separadas de la FORSU, obteniéndose una variedad de productos de alto valor agregado, como se muestra en la figura 1.

El diagrama parte de la recogida selectiva de los RSU y la entrada en una planta de transferencia y clasificación, donde se separan los residuos sólidos inorgánicos (RSI), la FORSU y otros que no se incluyen en estas categorías. De la fracción inorgánica se separan los que pueden ser reciclados y los restantes, junto con los denominados “otros” y parte de la FORSU se disponen en el relleno sanitario (RS); mientras los RSI y FORSU con características adecuadas son enviados a la empresa comercializadora y proceso de digestión anaeróbica respectivamente.

De las 250 t de residuos que se generan diariamente, se consideran potencialmente reciclables 58,05 t de RSI, que según los resultados de caracterización y criterios para el establecimiento de la alternativa, se corresponden con 26,38 t de plástico; 22,93 t de papel y cartón; 4,63 t de vidrio y 4,13 t de metal. Aproximadamente 152 t de la FORSU se incorporan al proceso de digestión anaeróbica en fases separadas el resto se envía al RS.

⁽²⁴⁾

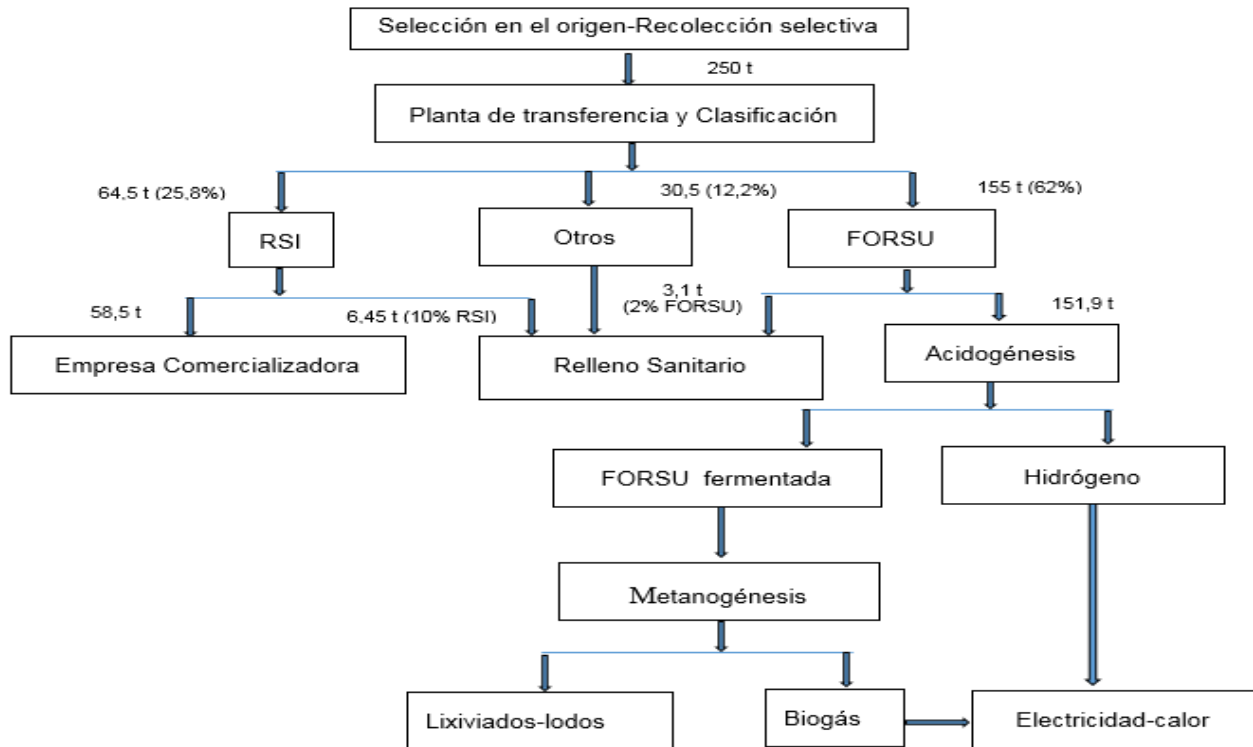


Fig.1 -Modelo propuesto para la gestión de los RSU de Manta. Fuente: Muñoz *et al.* ⁽²⁴⁾

Se realiza la evaluación ambiental de la propuesta tecnológica resultante de dicha investigación mediante un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que cumple con los últimos métodos establecidos en el ámbito internacional de las normas ISO 4040, ^(25, 26) como se describe a continuación:

Objetivo y alcance

Se define el objetivo del estudio y en el alcance se establece la unidad funcional, el flujo de referencia y los límites del sistema del ACV.

El objetivo del presente ACV es estimar los impactos ambientales potenciales para el modelo de gestión de los RSU de Manta que se propone e identificar las etapas del proceso donde se producen las emisiones con mayor relevancia.

Como unidad funcional se toma el tratamiento de los RSU generados diariamente en Manta, resultando un flujo de referencia de 250 t de RSU.

Este estudio se dirige a tomadores de decisiones en materia de tratamiento y gestión de residuos y la academia en general.

Entre las consideraciones del estudio se destaca:

- Para la valoración no se tiene en cuenta la recolección ni la clasificación de los residuos en el origen.
- No se toma en cuenta el transporte de los RSU a la planta.
- Se tiene en cuenta el acondicionamiento de la FORSU.
- Se utiliza agua residual doméstica para el acondicionamiento de la FORSU, la cual se considera como producto evitado (alimentación de agua).
- Se considera la producción de hidrógeno y metano como productos evitados (generación de energía eléctrica y calor), evitando la generación a partir de combustible fósil.
- Los lodos de la digestión anaeróbica se consideran como producto evitado (bio-abono).

Los límites del sistema se muestran en la figura 2, dentro de estos se considera la planta de transferencia- clasificación, el proceso de digestión anaeróbica de la FORSU, el reciclaje de los RSI y la disposición en RS.

Aquí se definen las entradas de materiales y energía del sistema para la obtención de los datos que permiten identificar y cuantificar todos los efectos ambientales asociados a la unidad funcional. Se incluyen tanto las emisiones de gases contaminantes, como de efluentes de aguas, residuos sólidos, consumo de recursos naturales, ruidos, radiaciones, olores, etc. En este caso los datos requeridos fueron obtenidos de los resultados experimentales ⁽²⁴⁾ y resultados de la literatura, ⁽²⁷⁾ completados con balances de materiales y energía. Las entradas y las salidas fueron ajustadas a la unidad funcional. No se llevó a cabo la asignación de cargas ambientales, sino que se extendieron los límites del sistema para considerar los productos evitados por el aprovechamiento de los subproductos. Se consideró en el inventario solo la entrada de electricidad de la red en la planta de transferencia en el resto se considera como un autoabastecimiento.

Para la evaluación del perfil ambiental del modelo propuesto para la gestión de los residuos sólidos urbanos de Manta se utilizó el Software SimaPro de la empresa PRé-Consultants, el método de ReCiPe 2016 v1.1, versión Hierarchist (H) y la base de datos Ecoinvent v 3.

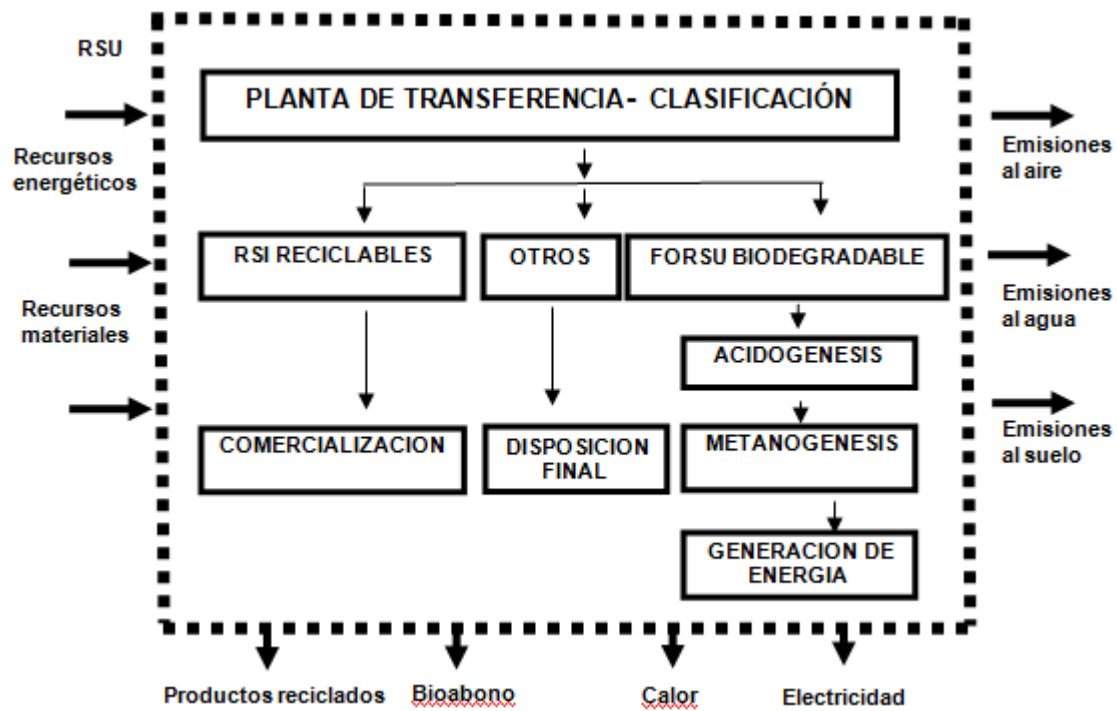


Fig.2- Límites del sistema

Los valores de las entradas y salidas se presentan en la tabla 1 del inventario de ciclo de vida.

Tabla 1- Inventario de ciclo de vida

Entradas	Cantidad	Unidad	Observaciones
RSU	250	T	
Electricidad	760	kWh	Consumida de la red
Pentóxido de difósforo (P2O5)	8 436	kg	
Bicarbonato de Sodio	10 796,56	kg	
Salidas	Cantidad	Unidad	Observaciones
FORSU	152 000	kg	
Papel	22,93	T	Reciclado
Plástico	26,35	T	Reciclado
Acero hierro	4,13	T	Reciclado
Vidrio	4,63	T	Reciclado
Residuos otros	40	T	Relleno Sanitario
Dióxido de carbono biogénico	46815,74	kg	
Monóxido de dinitrógeno	15,49	kg	
Sulfito de hidrógeno	579,69	kg	
Hidrógeno	0,02	kg	
Ion amonio	0,02	kg	
Nitrato	0,73	kg	
Nitrito	0,02	kg	
Metano biogénico	218,43	kg	
Electricidad por hidrógeno	6120,85	kWh	
Electricidad por biogás	189513,25	kWh	

Se realiza un análisis comparativo de la alternativa propuesta con la situación actual de la gestión de RSU de Manta, que consiste en la recolección no segregada (250 t), transporte directo por medio de camiones al relleno sanitario (238 t) y separación de residuos inorgánicos por recicladores de base (5, 16 t de papel; 5,27 t de plásticos y 1,21 t de vidrio. En la definición de objetivos y alcance del ACV se realizan consideraciones similares a las del estudio del modelo propuesto, para que resulte válida la comparación; para los resultados de punto medio y para la categoría de puntos finales, mediante el indicador de puntuación única.

Se realiza la evaluación económica de la alternativa propuesta.

El capital fijo de inversión (CFI) se determina mediante la siguiente ecuación

$$CFI = \text{Costo directo (CD)} + \text{Costo indirecto (CI)} \quad (1)$$

Para calcular la inversión se tuvo en cuenta el costo de adquisición de los equipos de la planta de transferencia de residuos, la planta de digestión anaeróbica en dos fases, una planta de cogeneración de energía y una celda combustible. Los valores de costo de

adquisición fueron calculados directamente de las fuentes disponibles y corregidos al año 2019. ^(28,29, 30)

El costo de producción asociado a la operación de la planta se estimó a partir de las necesidades de mano de obra y consumo de utilidades; además del valor de la depreciación y gastos de laboratorio.

$$\text{CTP} = \text{Costo Fabricación (CF)} + \text{Gastos Generales (GG)} \quad (2)$$

Los ingresos se estimaron a partir de los precios de venta de energía eléctrica, abono y los diferentes materiales reciclables. ^(31, 32,33)

A partir de la inversión total, los costos de producción e ingresos se estimaron los valores de los indicadores de rentabilidad (VAN, TIR y PRD), considerando un período de vida útil de diez años y una tasa de actualización del 15 %.

Finalmente se realiza un análisis de sensibilidad a la reducción de los ingresos a un 10, 20 y 30 %, que puede estar influenciada por cambios en los rendimientos o precios de los productos.

Resultados y análisis

Los resultados globales de los estudios experimentales se muestran en la tabla 2 en términos de remoción promedio de sólidos totales (ST), remoción promedio de sólidos totales volátiles (STV), rendimientos promedio de la producción de hidrógeno ($\text{LH}_2/\text{kg STV alim}$) y de la producción de metano ($\text{LCH}_4/\text{kg STV alim}$).

Tabla 2 -Resultados globales de remoción de ST y STV. Rendimientos de producción de hidrógeno y metano

No	TRH	% R Global ST	% R Global STV	LH ₂ /kg STV alim	LCH ₄ /kg STV alim
1	10	51,09	55,18	32,71	327,12
2	10	46,14	52,40	24,53	310,76
3	10	56,11	62,56	34,49	394,14
4	10	53,37	59,25	27,33	360,25
5	15	63,03	70,42	40,63	503,82
6	15	57,35	63,56	36,76	479,46
7	15	71,31	78,78	45,21	527,44
8	15	67,54	76,51	41,90	507,94
	Prom	58,24	64,83	35,45	426,37
	Desv St	7,96	9,00	6,70	82,40
	Max	71,31	78,78	45,21	527,44
	Min	46,14	52,40	24,53	310,76

Se obtiene una remoción promedio de sólidos totales (ST) de 58,24 % con un valor máximo de 71,31 % y una remoción promedio de 64,83 % de sólidos totales volátiles (STV) con valor máximo de 78,78 %, así como, rendimientos promedio de la producción de hidrógeno del orden de los 35 LH₂/kg STV alim y de la producción de metano del orden de 426 LCH₄/kg STV alim.

A partir de los resultados experimentales se establecen los parámetros operacionales del proceso de digestión anaeróbica, que unido a otros datos resultantes de los balances de materiales, permiten el cálculo de los equipos y facilitan la evaluación ambiental y económica del proceso.

Los resultados del ACV del modelo de gestión propuesto para los RSU de Manta se muestran en la figura 3.

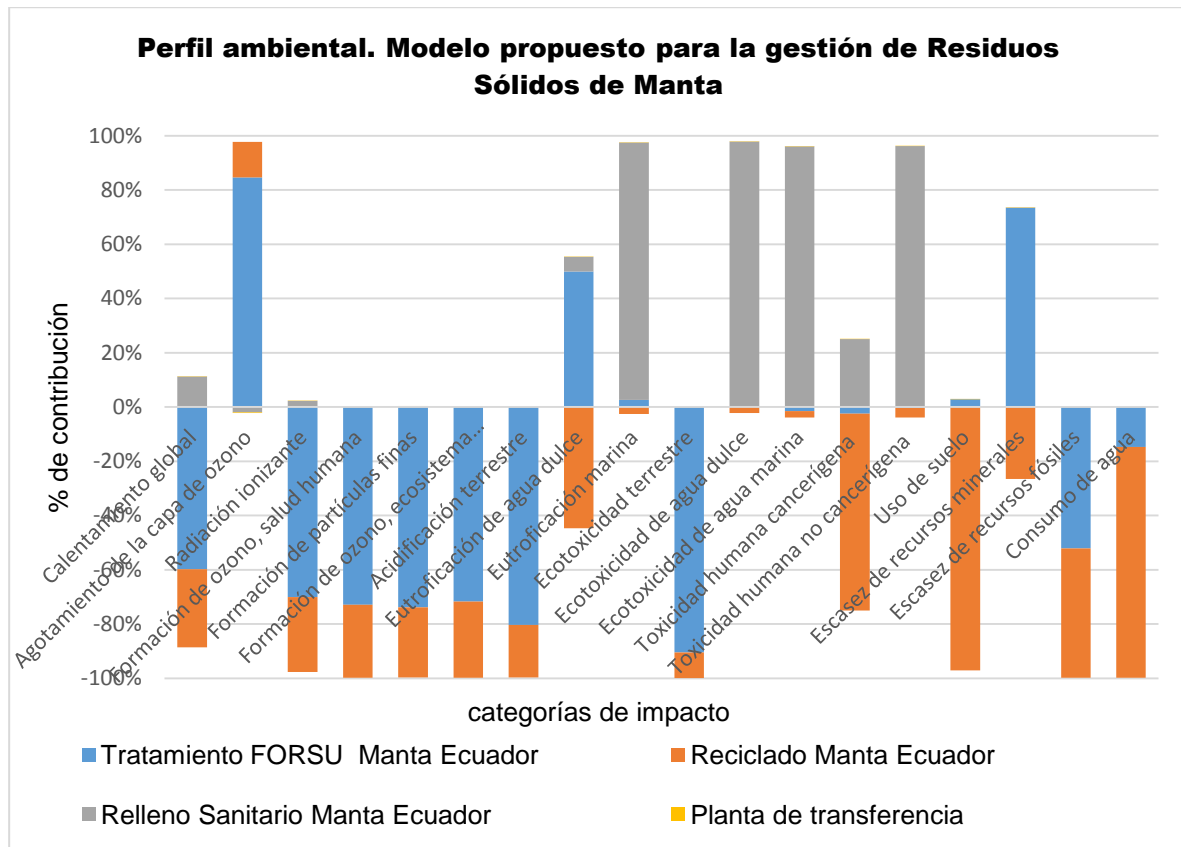


Fig. 3 -Perfil ambiental del modelo propuesto para la gestión de Residuos Sólidos de Manta

Interpretación

Se observa que los principales impactos positivos están dados por el RS, por sus efectos en la eutrofización del agua de mar, ecotoxicidad del agua dulce y de mar, así como en la toxicidad humana cancerígena y no cancerígena y calentamiento global, producto de las emisiones que se generan, ya que es un RS donde no se recolectan el biogás y lixiviados. Este resultado evidencia la importancia de fomentar las acciones de reciclaje y otras opciones de tratamiento que minimicen la cantidad de residuos a disponer en el RS. El tratamiento de la FORSU impacta positivamente la categoría de agotamiento de la capa de ozono, eutrofización del agua dulce y escasez de recursos naturales, las emisiones de gases y aguas que se pueden escapar en el proceso, así como la utilización de los subproductos del proceso como bio-fertilizantes. En menor medida resultan impactadas el uso del suelo, eutrofización marina y ecotoxicidad del agua dulce.

Resultan de gran valor los resultados negativos para la mayoría de las categorías de impacto como resultado del reciclaje de los RSI y la valorización de los productos de la

digestión anaeróbica, lo que hace que los mismos sean procesos muy atractivos para la gestión de la FORSU de Manta, que además de reforzar el planteamiento anterior relacionado con el relleno sanitario, reporta múltiples beneficios ambientales.

Los resultados de impacto de la planta de transferencia, como es lógico, son mínimos comparados con los restantes elementos del modelo de gestión propuesto, ya que no se producen consumos ni emisiones relevantes.

Los resultados del análisis comparativo de la situación actual de la gestión de RSU de Manta con la alternativa propuesta, para los resultados de punto medio, se muestran en la figura 4.

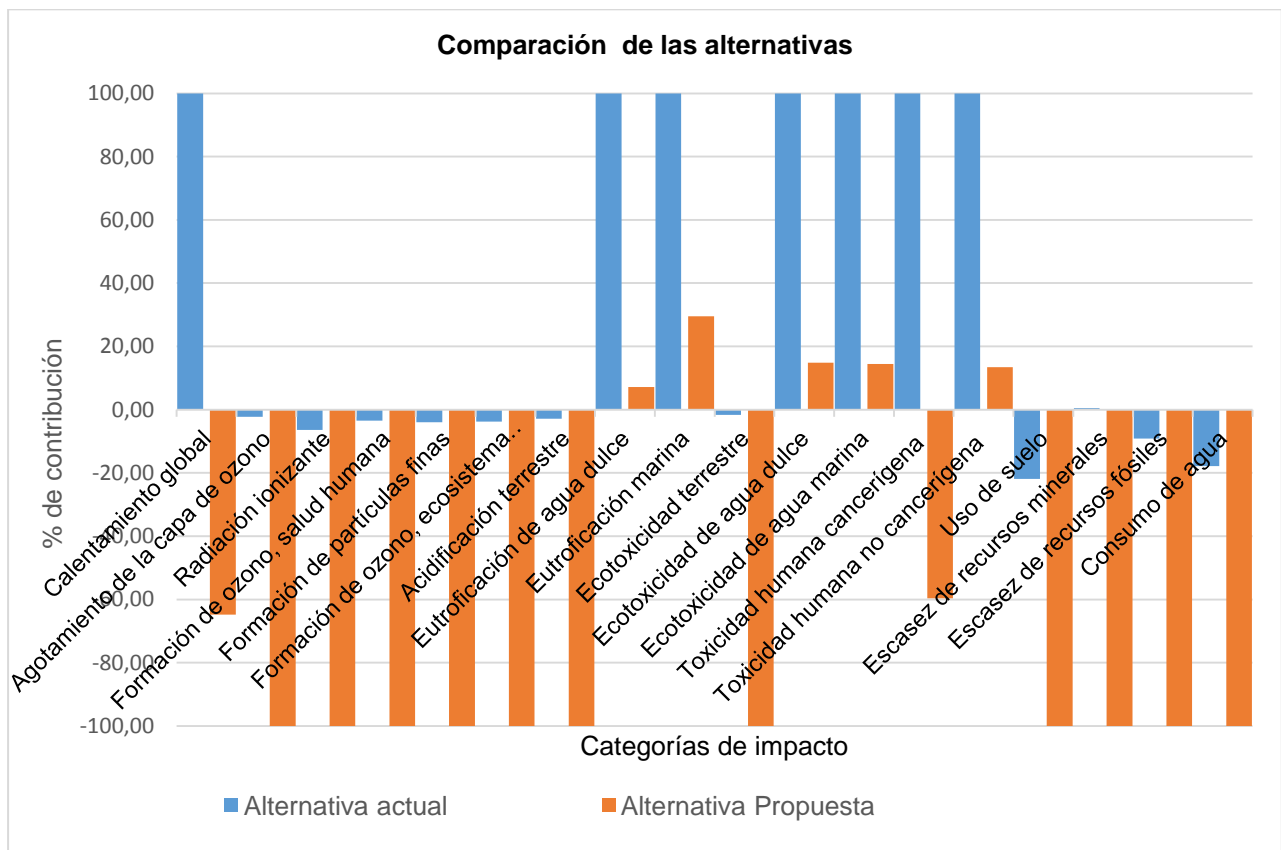


Fig.4- Comparación de alternativas

Se evidencian los beneficios ambientales de la alternativa propuesta con relación a la situación actual de la gestión de los RSU de Manta, ya que en la mayoría de las categorías de impacto, los resultados para la alternativa propuesta son negativos, o positivos pero con un valor menor que el de la situación actual. Destacándose los

impactos perjudiciales que se producen como resultado de la gestión actual, fundamentalmente en las categorías de calentamiento global, eutroficación del agua dulce y agua de mar, ecotoxicidad del agua dulce y agua de mar, así como toxicidad humana cancerígena y no cancerígena; efectos estos indicativos de la necesidad de una adecuada gestión de los RSU en el cantón Manta.

Los resultados de la comparación para la categoría de puntos finales mediante el indicador de puntuación única, aparecen en la figura 5, se observa que el impacto total de la gestión actual tiene un valor de 15,55 kPt, mientras la alternativa propuesta tiene impacto de -7,46 kPt, por lo que la implementación de la misma implicará una reducción de los problemas ambientales en el cantón Manta.

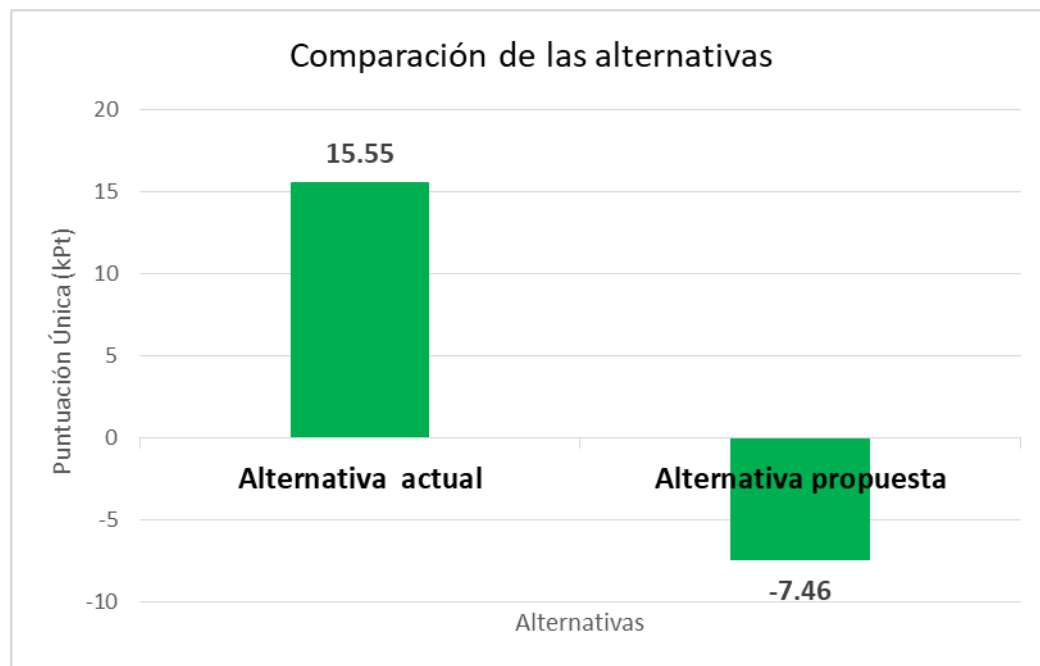


Fig. 5 -Comparación de alternativas. Indicador de puntuación única

Los resultados de la evaluación económica del esquema tecnológico propuesto para la implementación de la alternativa muestran, en primer lugar un valor de CFI de \$3 246 357,48; desglosados como se observa en la tabla 3.

Tabla 3- Costo fijo de inversión

Costo Directo (CD)	Valor \$
Costo Equipos (CE)	1199475,88
Costo Tuberías. y accesorios	143937,11
Instrumentación y control (IC)	179921,38
Instalación Eléctrica (IE)	119947,59
Costo Edificación	203910,90
Servicios. y facilidades (SF)	299868,97
Total Costo Directo (CD)	2147061,83
Costo Indirecto (CI)	Valor
Ing. y Supervisión	214706,18
Gastos de Contratación	150294,33
Contingencias	193235,56
Total Costo Indirecto(CI)	558236,08
Capital Fijo de Inversión	2705297,90
Costo Total de Inversión	3246357,48

El costo de producción asociado a la operación de la planta se estimó a partir de las necesidades de mano de obra y consumo de utilidades; además del valor de la depreciación y gastos de laboratorio, alcanzando un valor de \$ 5 953 011,95 por año, como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4 -Costo de producción

Costo Fabricación	Valor \$/año
Costo Directo Producción (CDP)	
Materias Primas (MP)	1952008, 32
Utilidades (U)	12570, 1
Mano de obra (MO)	2092581, 5
Supervisión (S)	209258, 15
Mantenimiento (M)	270529, 79
Suministro (Su)	67632, 45
Gastos de laboratorio. (GL)	209258, 15
Total CDP	4813838, 46
Cargos Fijos (FC)	
Depreciación (D)	270529, 79
Seguros , Impuestos (SI)	0, 00
Total FC	270529, 79
Gastos Generales (GG)	Valor \$/año
Distribución	0,1 CTP
Desarrollo e Investigación .	0,05 CTP
Financiación	0,15 CTP
Total GG	868643, 702
Costo Total de Producción	5953011, 95

El costo anual de producción es de \$ 5 953 011, 95.

El total de ingresos alcanza un valor de \$ 9 178 499, 214, aun sin considerar las externalidades, por la dificultad para la estimación de las mismas.

En la tabla 5 y figura 6 se presentan los valores del VAN, TIR y PRD para la propuesta analizada.

Tabla 5- Valores dinámicos de la factibilidad

VAN	\$ 6 100 987, 57
TIR	66%
PRD	1, 8 años

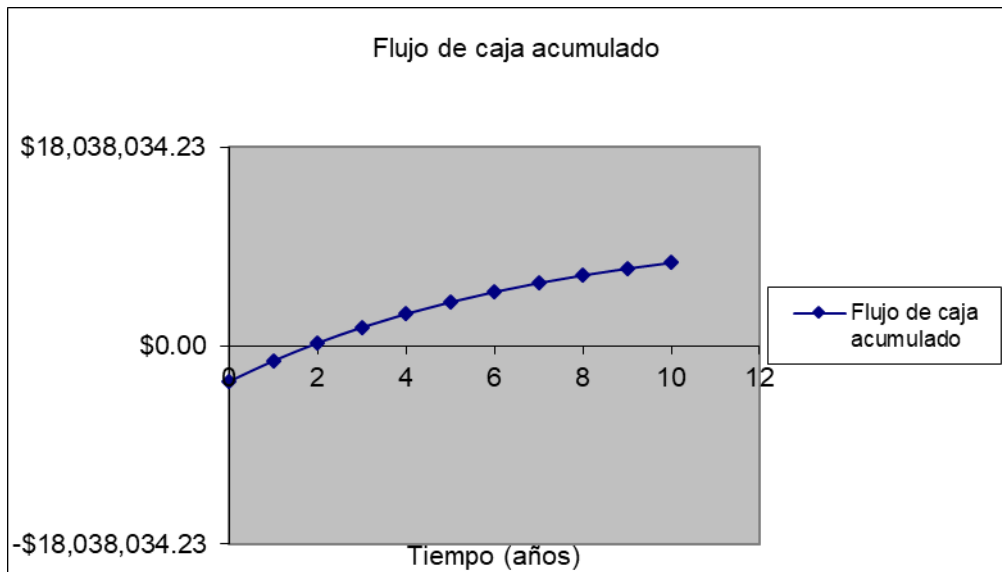


Fig. 6 -Flujo de caja acumulado Fuente: elaboración propia. Programa Excel

Los resultados muestran la factibilidad de la inversión para el modelo de gestión propuesto para los residuos sólidos urbanos de Manta, con un VAN de \$ 6 100 987,57 y una TIR de 66 %, que puede ser recuperada en un período de aproximadamente dos años.

La figura 7 muestra los resultados del estudio de sensibilidad a la reducción de los ingresos para valores de reducción de 10, 20 y 30 %.

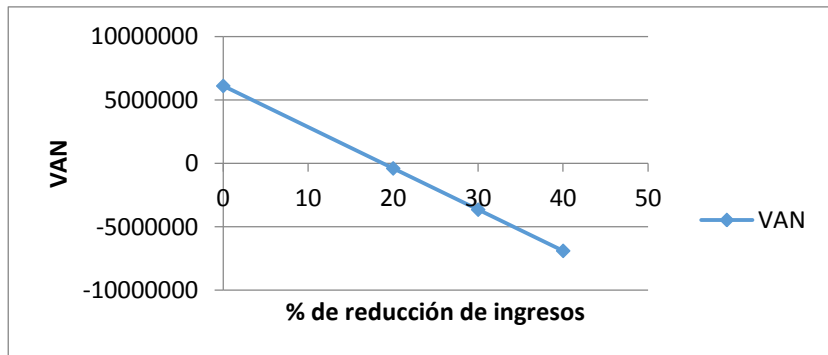


Fig. 7 -Sensibilidad a la reducción de los ingresos

Se evidencia que existe sensibilidad a la reducción de los ingresos. Hasta aproximadamente un 20 % de reducción, la inversión es factible, por lo que aun cuando se produzcan cambios en el rendimiento de la producción de hidrógeno y metano o disminuyan los precios de los productos hasta determinados niveles, se mantiene la factibilidad de la misma.

Conclusiones

1. Mediante el proceso de digestión anaeróbica estudiado experimentalmente se puede obtener una remoción promedio de sólidos totales (ST) de 58,24 % con valor máximo de 71,31 %; una remoción promedio de 64,83 % de sólidos totales volátiles (STV) con valor máximo de 78,78%, rendimientos promedio de la producción de hidrógeno de 35 LH₂/kg STV alim y producción de metano de 426 LCH₄/kg STV alim.
2. El ACV revela que los principales impactos ambientales positivos del modelo propuesto para la gestión de RSU en Manta están dados por el relleno sanitario, por el efecto que sus emisiones generan en diferentes categorías de impacto y algunas categorías resultan impactadas por el proceso de digestión anaeróbica.
3. El reciclaje de los RSI y la valorización de los productos de la digestión anaeróbica, reportan impactos beneficiosos para el medioambiente, lo que hace que los mismos sean procesos muy atractivos para la gestión de los RSU de Manta.
4. El ACV comparativo evidencia las ventajas de la alternativa propuesta con relación a la situación actual de la gestión de los RSU de Manta, con valores de puntuación única de -7,46 kPt y 15,55 kPt, respectivamente.
5. El modelo de gestión propuesto es factible desde el punto de vista económico, alcanzando un valor del VAN de \$ 6 100 987,57, una TIR de 66% y puede ser recuperada en un período de aproximadamente dos años, con una sensibilidad a la reducción de los ingresos hasta aproximadamente un 20 %.

Referencias bibliográficas

1. BARRADAS, A. *Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales. Estado del Arte*. Extracto de la tesis de Doctor en Ciencias en Ingeniería Ambiental inédita Universidad Politécnica de Madrid. 2009.

2. SOTO, J.L. *Alternativas de recogida, tratamiento y eliminación de residuos sólidos urbanos*. Trabajo de Grado inédito en Ingeniería de Obras Públicas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Universidad de Valencia. 2014.
3. MANDUJANO, P. *Digestión anaerobia de sólidos en alta concentración*. Tesis Doctoral inédita, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
4. CASTELLANOS, S. *Análisis de Ciclo de Vida para los biorresiduos sólidos urbanos generados en Bogotá D.C, Colombia*. Trabajo final inédito para optar al título de Magister en Ingeniería Ambiental. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C, Colombia 2017.
5. ANGERIZ, R. *Producción de bio-hidrógeno por co-digestión anaerobia acidogénica de residuos sólidos urbanos, residuos alimentarios de cocina y lodos de depuradora*. Trabajo de tesis inédito en Ciencias tecnológicas, Ingeniería y tecnología del medio ambiente. Universidad de Cádiz. España. 2018.
6. AGRELA, F., CABRERA, M., MARTÍN M., ZAMORANO, M., ALSHAAER, M. *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete. Biomass fly ash and biomass bottom ash*. Woodhead Publishing. 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00002-6>. ISBN 978-0-08-102480-5
7. BENTSEN, N.S. *Biorefinery. Biomass for Biorefineries: Availability and Costs*. Springer International Publishing 2019, pp. 37-47. Disponible en: https://doi.org/10.1007/978-3-030-10961-5_2. Electronic ISBN: 978-3-030-10961-5.
8. BIOPLAT y SusChem-España (Plataformas Tecnológicas Españolas de Biomasa para la Bioeconomía y de Química Sostenible). *Manual sobre las Biorrefinerías en España*. 2017. Disponible en: http://www.bioplat.org/setup/upload/modules_docs/content_URI_4020.pdf.
9. CHANDRA, R., IQBAL, H.M., VISHAL, G., LEE, H.S., NAGRA, S. *Algal Biorefinery: A Sustainable Approach to Valorize Algal-based Biomass towards Multiple Product Recovery*. *Bioresource technology*. 2019, **278**, pp. 346-359.
10. CALDERÓN, G.; MEJIA, P.; ZUNIGA, H. *Estudio de factibilidad para el tratamiento y aprovechamiento integral de los desechos sólidos producidos en el municipio de Izalco, Departamento de Sonsonate*. Trabajo inédito en opción al grado de Ingeniero Industrial. Universidad de El Salvador. Facultad de ingeniería y arquitectura. Escuela de Ingeniería Industrial. 2013.

11. ESCAMILLA-ALVARADO, C.; RÍOS-LEAL, E.; PONCE-NOYOLA, M.T.; POGGI-VARALDO, H.M. Gas biofuels from solid substrate hydrogenogenic-methanogenic fermentation of the organic fraction of municipal solid waste. *Process Biochemistry*. 2012, **47**, pp. 1572–1587.
12. ESCAMILLA-ALVARADO, C.; PONCE-NOYOLA, M.T.; RÍOS-LEAL, E.; RINDERKNECHT-SEIJAS, N.; POGGI-VARALDO, H.M. *Biohydrogen production through solid substrate fermentation of organic municipal wastes: a multivariable evaluation*. Proceedings of the 12th International Congress of the Mexican Hydrogen Society, 2012, July 9-13 Mérida, México.
13. ESCAMILLA-ALVARADO, C.; PONCE-NOYOLA, M.T.; RÍOS-LEAL, E.; POGGI-VARALDO, H.M. A multivariable evaluation of biohydrogen production by solid substrate fermentation of organic municipal wastes in semi-continuous and batch operation. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013, **38**(28), pp. 12527-12538.
14. DE JONG, E. & JUNGMEIER, G. Chapter 1. Biorefinery Concepts in Comparison to Petrochemical Refineries. In: PANDEY, A., HÖFER, R., TAHERZADEH, M., NAMPOOTHIRI, K. M. & LARROCHE, C. *Industrial Biorefineries & White Biotechnology*. Eds. Elsevier. Amsterdam. 2015. pp. 3-30. Disponible en:<http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63453-5.00001-X>
15. SARAIVA, A. B. System boundary setting in life cycle assessment of biorefineries: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2017, **14**, pp. 435-452.
16. CHERUBINI, F. & STRØMMAN, A.H. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*. 2011, **102**, pp. 437-451.
17. IVANOV, V., STABNIKOV, V., AHMED, Z., DOBRENKO, S. & SALIUK, A. Production and applications of crude polyhydroxyalkanoate-containing bioplastic from the organic fraction of municipal solid waste. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 2015, **12**, pp. 725-738.
18. ZHANG, Y.H.P. Reviving the carbohydrate economy via multi-product lignocellulose biorefineries. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. 2008, **35**, pp. 367-375.
19. LINDORFER, J., LETTNER, M., HESSER, F.; FAZENI, K.; ROSENFELD, D.; ANNEVELINK, B., MANDL, M. Technical, Economic and Environmental Assessment of Biorefinery Concepts. Developing a practical approach for characterization. IEA

(International Energy Agency). Bioenergy: Task 42:2019:01. 2019. *IEA Bioenergy*. ISBN: 978-1-910154-64-9.

20. BOVEA, M., CRUZ, S., MERCANTE, I., COUTINHO, C., ELJAIEK, M., IBÁÑEZ, V. Aplicación de la metodología de ACV para evaluar el desempeño ambiental de sistemas de gestión de residuos en Iberoamérica. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2016, **32**(No. Especial Residuos Sólidos), pp. 23-46. DOI: 10.20937/RICA.2016.32.05.03.

21. ARENA U., MASTELLONE M.L. Y PERUGINI F. Life Cycle Assessment of a plastic packaging recycling system. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2003, **8**(2), pp. 92-98. DOI: 10.1007/BF02978432.

22. McDOUGALL F., WHITE P., FRANKE M., HINDLE P. *Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory*. Second edition. Blackwell Science Publishing Ltd. 2001. ISBN 0-632-05889-7.

23. LAURENT A., BAKAS I., CLAVREUL J., BERNSTAD A., NIERO M., GENTIL E., HAUSCHILD M.Z. Y CHRISTENSEN T.H. Review of LCA studies of solid waste management systems—Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Manage.* 2014, **34**(3), pp. 573-88 DOI: 10.1016.

24. MUÑOZ-MENÉNDEZ, M., SANTOS-HERRERO, R., CONTRERAS-MOYA, A., REGLA-DOMÍNGUEZ, E., & CÁRDENAS-FERRER, T. Análisis del proceso de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos sólidos urbanos de Manta, Ecuador. *Revista Científica Multidisciplinaria SAPIENTIAE*. 2020, **3**(6), pp. 65-83, ISSN: 2600-6030.

25. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework - ISO 14040, 2006, Geneva, Switzerland.

26. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines - ISO 14044, 2006, Geneva, Switzerland.

27. SOTELO, P.X. Análisis de ciclo de vida de una biorrefinería HMZS-SEBQ. Proyecto inédito del Diplomado en Gestión de ciclo de vida. CADIS. México. 2019.

28. MEJIA, C.S., MEJIA, C.P., RAMIREZ, D. M.E. “*Estudio de factibilidad técnico económico para la implantación de una planta productora de biogás a partir de*

desechos orgánicos". Tesis inédita para optar al título de Ingeniero Industrial. Universidad de E Salvador. 2005. <https://www.laitram.com>.

29. COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (CNE). Informe de costos de tecnologías de generación. Gobierno de Chile. 2019. Disponible en: www.cne.cl.

30. CARVAJAL-OSORIO, H., BABATIVA, J. H.; ALONSO, J. A. Estudio sobre producción de H₂ con hidroelectricidad para una economía de hidrógeno en Colombia. *Ingeniería y Competitividad* 2010, **12**(1), pp. 31-42 Universidad del Valle Cali, Colombia. Disponible en:

<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=291323517003>.

31. MACÍAS, J. E., VALAREZO, L. A., LOOR, G. Los diferentes costos que tiene la energía eléctrica en el Ecuador considerando los cambios de la estructura actual. *Revista RIEMAT*, 2018. **3**(2), pp. 29-36. ISSN 2588 072 DOI: <https://doi.org/10.33936/riemat.v3i2.1628>.

32. ESPINOZA, W. E. *Estudio de factibilidad para la creación de una planta productora de abono orgánico*. Tesis de grado inédita previo a la obtención del título de Ingeniero Industrial. Universidad de Guayaquil. 2009.

33. INICIATIVA REGIONAL PARA EL RECICLAJE INCLUSIVO (IRR). Reciclaje inclusivo y recicladores de base en el Ecuador. Avances en el reciclaje y en la inclusión de los recicladores de base en el Ecuador. 2015. Disponible en: www.reciclajeinclusivo.org.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Contribución de los autores

María Belén Muñoz Menéndez, autora principal, elabora de forma general y escribe el trabajo que es parte de su tesis de doctorado.

Ana Margarita Contreras Moya, asesora y participa fundamentalmente en la evaluación ambiental.

Ronaldo F. Santos Herrero, asesora y participa fundamentalmente en la propuesta del modelo de gestión.

Elena R. Rosa Domínguez, asesora y participa fundamentalmente en la evaluación económica.

Teresa Cárdenas Ferrer, participa en la caracterización y búsqueda de información para la evaluación del proceso.