



*El proceso de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos sólidos. Métodos y resultados*

*The anaerobic digestion process for the treatment of solid waste. Methods and results*

*O processo de digestão anaeróbia para o tratamento de resíduos sólidos. Métodos e resultados*

María Belén Muñoz-Menéndez <sup>I</sup>

[beleta\\_1983@hotmail.com](mailto:beleta_1983@hotmail.com)

<https://orcid.org/0000-0002-1705-2259>

Ana Margarita Contreras-Moya <sup>II</sup>

[anama@uclv.edu.cu](mailto:anama@uclv.edu.cu)

<https://orcid.org/0000-0001-9374-9376>

Ronaldo Francisco Santos-Herrero <sup>III</sup>

[ronaldo@uclv.edu.cu](mailto:ronaldo@uclv.edu.cu)

<https://orcid.org/0000-0002-5009-2084>

Elena Regla Rosa-Domínguez <sup>IV</sup>

[erosa@uclv.edu.cu](mailto:erosa@uclv.edu.cu)

<https://orcid.org/0000-0002-5371-0976>

Teresa Margarita Cárdenas-Ferrer <sup>V</sup>

[teresam@nauta.cu](mailto:teresam@nauta.cu)

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

**Correspondencia:** [beleta\\_1983@hotmail.com](mailto:beleta_1983@hotmail.com)

Ciencias técnicas y aplicadas

Artículo de investigación

\***Recibido:** 13 de septiembre de 2020 \***Aceptado:** 09 de octubre de 2020 \* **Publicado:** 06 de noviembre de 2020

- I. Ingeniera Agropecuaria Mención Agrícola, Magister en Desarrollo y Ambiente, Se desempeña como Directora de Educación Continua en la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, Manta, Ecuador.
- II. Doctora en Cs. Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Química, en la Universidad Central Martha Abreu de las Villas, Cuba.
- III. Doctor en Ciencias, Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Central Martha Abreu de las Villas, Cuba.
- IV. Doctora en Ciencias, Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Central Martha Abreu de las Villas, Cuba.
- V. Magister en Ciencias, Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Central Martha Abreu de las Villas, Cuba.

## Resumen

Este trabajo tiene el objetivo de describir el proceso de digestión anaeróbica de residuos sólidos urbanos de Manta, desde la asunción de la metódica materialista. Desde el punto de vista epistémico, el mismo se sustenta en aportes de: Castellanos, (2017), Angeriz (2018) y Bentsen (2019), entre otros. Con respecto a lo metodológico el estudio se soporta en los lineamientos del materialismo dialéctico en concordancia con lo expresado por (Cerezal y Fiallo, 2004). Entre los métodos de tratamiento se destaca la digestión anaerobia como uno de los procesos más atractivos y novedosos en la actualidad. Entre los resultados destaca: De forma general, se obtiene una remoción promedio de ST de 69,80 % con un valor máximo de 85,3 % y de 75,09 % de STV con valor máximo de 88, 80 %. El rendimiento de la producción de hidrógeno alcanza un valor promedio de 37,28 LH<sub>2</sub>/kg STV alim, mientras el rendimiento de la producción de metano muestra un valor promedio de 425,02 LCH<sub>4</sub>/kg STV alim. Como conclusión se obtuvo: De los resultados obtenidos y en correspondencia con el objetivo propuesto en este trabajo, se ha logrado describir que una alternativas factible para la disminución de la ocurrencia del problema en la fracción orgánica de los RSU, es la obtención de un procedimiento energético, a través de su tratamiento por biogás, sin embargo, para que se obtenga mayor confiabilidad de los resultados, ello debe ser verificado experimentalmente.

**Palabras claves:** Digestión anaeróbica; residuos sólidos; fases separadas; método materialista-dialéctico.

## Abstract

This work has the objective of describing the process of anaerobic digestion of urban solid waste in Manta, from the assumption of the materialistic method. From the epistemic point of view, it is based on contributions from: Castellanos, (2017), Angeriz (2018) and Bentsen (2019), among others. With respect to the methodological, the study is supported by the guidelines of dialectical materialism in accordance with what was expressed by (Cerezal and Fiallo, 2004). Among the treatment methods, anaerobic digestion stands out as one of the most attractive and innovative processes today. Among the results, the following stand out: In general, an average removal of ST of 69.80% is obtained with a maximum value of 85.3% and of 75.09% of STV with a maximum value of 88. 80%. The hydrogen production yield reaches an average value of 37.28 LH<sub>2</sub> / kg feed STV, while the methane production yield shows an average value of 425.02 LCH<sub>4</sub> / kg feed STV. As a conclusion it was obtained: From the results

obtained and in correspondence with the objective proposed in this work, it has been possible to describe that a feasible alternative for reducing the occurrence of the problem in the organic fraction of MSW, is to obtain a procedure energy, through its treatment by biogas, however, for greater reliability of the results to be obtained, this must be verified experimentally.

**Keywords:** Anaerobic digestion; solid waste; separated phases; materialistic-dialectical method.

## Resumo

Este trabalho tem por objetivo descrever o processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos em Manta, a partir do pressuposto do método materialista. Do ponto de vista epistêmico, baseia-se nas contribuições de: Castellanos, (2017), Angeriz (2018) e Bentsen (2019), entre outros. No que diz respeito ao método metodológico, o estudo está amparado pelas diretrizes do materialismo dialético de acordo com o que foi expresso por (Cerezal e Fiallo, 2004). Dentre os métodos de tratamento, a digestão anaeróbia se destaca como um dos processos mais atraentes e inovadores da atualidade. Dentre os resultados, destacam-se os seguintes: Em geral, obtém-se uma remoção média de ST de 69,80% com valor máximo de 85,3% e de 75,09% de STV com valor máximo de 88,80%. O rendimento da produção de hidrogênio atinge um valor médio de 37,28 LH<sub>2</sub> / kg de alimentação STV, enquanto o rendimento da produção de metano mostra um valor médio de 425,02 LCH<sub>4</sub> / kg de alimentação STV. Como conclusão obteve-se: A partir dos resultados obtidos e em correspondência com o objetivo proposto neste trabalho, foi possível descrever que uma alternativa viável para reduzir a ocorrência do problema na fração orgânica de RSU, é a obtenção de um procedimento energia, por meio do seu tratamento por biogás, porém, para maior confiabilidade dos resultados a serem obtidos, esta deve ser verificada experimentalmente.

**Palavras-chave:** Digestão anaeróbia; resíduos sólidos; fases separadas; método materialista-dialético.

## Introducción

Hoy en día, el abordaje de temas como el tratamiento de los residuos sólidos se ha transformado en un tópico relevante y de creciente interés ante la comunidad científica estudiosa en esta materia, esto es importante y puede deberse a una serie de factores y condicionantes tales como el incremento poblacional, así como el desarrollo cada vez mayor de la actividad comercial e

industrial, lo cual implica hace que cotidianamente se viertan miles de millones de toneladas a las superficies terrestre y acuática, sin la debida previsión en cuanto al tratamiento y manejo de estos desechos, lo cual origina una crisis de contaminación ambiental y destrucción del planeta cada día más amenazante.

En correspondencia con lo antes expuesto, quienes ostentan la responsabilidad de la gestión de residuos, puede desentrañar un mundo de alternativas de recuperación, en el marco de lo cual destaca la previsión de fallas, y el manejo, el tratamiento y la disposición final de los RSU, lo cual colide con lo propuesto por diferentes autores (Soto, 2014; Mandujano, 2001; Castellanos, 2017), con quienes se coincide.

De allí que se confirma el valor del manejo y tratamiento de los residuos, porque es justamente esto lo que permite que se cambien las condiciones 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 RSU requiere tratar por separado la FORSU y la fracción inorgánica.

En (Muñoz, Contreras, Santos, Regla y Cárdenas, 2020) se afirma que “el proceso de digestión anaerobia 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.”(p. 3)

En este marco referencial, cabe acotar que, en la etapa acidogénica (fermentación oscura) se suscita un biogás con alto contenido en hidrógeno, lo cual es de relevancia porque el hidrógeno se asume como el vector energético de los próximos años y su producción a partir de la degradación de residuos orgánicos presenta un especial interés (Angeriz, 2018), esto porque se considera que reciclar tomando el residuo como materia prima es la estrategia más afín al principio de sustentabilidad y las biorrefinerías constituyen una de las aplicaciones más avanzadas de la misma. Dado que tal como lo refieren los autores citados, la biomasa es el mayor contribuyente a la generación de energías renovables (Bentsen, 2019) y según BIOPLAT y SusChem-España (2017) y Chandra et al. (2019), alude 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 municipales (FORSU).

De allí que el aprovechamiento de la biomasa como materia prima, para la obtención de productos y energía, ofrece una serie de ventajas porque se conforma en una fuente renovable, que permite tener un control de desechos y reduce la contaminación al disminuir la emisión de

gases contaminantes (Agrela et al, 2019). En ese orden, el presente trabajo tiene como objetivo de describir el proceso de digestión anaeróbica de residuos sólidos urbanos de Manta, desde la asunción de la metódica materialista

### **Materiales y métodos**

Este trabajo de investigación se realizó siguiendo los lineamientos del materialismo dialéctico porque éste permite la elaboración un resultado científico que se pone a disposición de la comunidad, en concordancia con lo expresado por (Cerezal y Fiallo, 2004), los distintos métodos teóricos en el proceso investigativo son los siguientes: El análisis y la síntesis, el primero permite estudiar el comportamiento de cada una de las partes, así como definir los elementos y aspectos que ejercen una influencia decisiva en las otras partes del objeto de investigación y determinan su comportamiento, mientras que el segundo, sobre la base de la generalización de algunas características definidas como resultado del análisis, lleva a la formulación de leyes, teorías e hipótesis que explican la conducta del objeto de investigación. Así, este método sirvió de guía para establecer las categorías de análisis, dimensiones e indicadores de la investigación, procesamiento de los datos obtenidos a partir de los distintos instrumentos de experimentación. Otro de los métodos teóricos considerados fueron la inducción y deducción. La inducción y la deducción se complementan en el proceso del conocimiento científico. A partir del estudio de numerosos casos particulares, por el método inductivo se llega a determinadas generalizaciones, lo cual constituye punto de partida para inferir o confirmar formulaciones teóricas (Cerezal y Fiallo, 2004).

Por otro lado, se empleó el método histórico lógico. De lo cual (Cerezal y Fiallo, 2004) afirman que lo histórico está relacionado con el estudio de la trayectoria real de los fenómenos y acontecimientos en el de cursar de una etapa o período. Lo lógico se ocupa de investigar las leyes generales del funcionamiento y desarrollo del fenómeno, estudia su esencia. Es así como, el método en cuestión se constituyó en la base para seleccionar los antecedentes del estudio y para establecer la ruta teórica de la investigación analizando cómo se han estudiado las categorías participación protagónica y proyecto de aprendizaje, a través de la historia para adentrarse en la lógica de su desarrollo y los elementos que influyen en el desarrollo de los mismos.

## **Esencialidades sobre los métodos de tratamiento de los residuos sólidos urbanos**

Entre los métodos de tratamiento se destaca la digestión anaerobia como uno de los procesos más atractivos y novedosos en la actualidad. La digestión anaeróbica es un proceso que convierte la materia orgánica en una mezcla gaseosa compuesta principalmente por metano y dióxido de carbono. Los problemas en el control y estabilización de los sistemas convencionales de digestión anaerobia han llevado al desarrollo de nuevas soluciones tecnológicas, entre estas la separación de fases, que implica una configuración de reactores separados; una primera fase para la hidrólisis y ácido génesis y una segunda para la acetogénesis y metanogénesis, conectados en serie, permitiendo la optimización de cada proceso por separado. La primera fase ha sido poco estudiada, la cual consiste en la conversión de compuestos complejos, como los aminoácidos, glucosa y ácidos grasos de cadena larga, por medio de la fermentación, en hidrógeno y ácidos grasos volátiles (AGV) (acético, butírico, propiónico y valérico). La mayoría de los AGV para uso industrial que se producen en el mundo, se obtienen a partir de combustibles fósiles, mediante de síntesis química. Por lo tanto, la fermentación acidogénica se presenta como una plataforma que consolida el concepto de biorefinería en lugar de una etapa de tratamiento convencional.

Las diferentes aplicaciones del hidrógeno y los AGV hacen que el proceso de fermentación acidogénica tome importancia y sea campo de estudio.

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.

Escamilla-Alvarado et al. (2012a) reportaron que una serie de procesos de fermentación oscura - digestión anaeróbica metanogénica (FO-DA) de la FORSU, que ellos crearon (H-M), (H: la fase de producción de hidrógeno, M: la fase de producción de metano) en procesos termofílicos y mesofílicos, fueron en promedio 76 y 42% superior, en términos de potencial energético, que el bioreactor metanogénico solo. Además, Escamilla-Alvarado et al. (2012b, 2013a) reportaron otras mejoras logradas en la fermentación de hidrógeno de la serie de procesos FO-DA de la FORSU.

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 biorefinerías, ya que los productos de estas deben mostrar menores impactos que los productos convencionales (De Jong y Jungmeier, 2015; Saraiva, 2017; Cherubini y Strømman, 2011; Ivanov et al., 2015; Zhang, 2008). Las metodologías más comunes que aportan valoraciones adecuadas son el análisis de ciclo de vida (ACV) y análisis costo beneficio. De aquí que una valoración científicamente fundamentada, basada en ACV de nuevos productos basados en biomasa es beneficioso para la toma de decisiones (Lindorfer, et al. 2019).

Coincidiendo con lo anterior y otros autores, Bovea (2016) plantea 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 (Arena et al. 2003, Mc Dougall et al. 2001, Laurent et al. 2014).

El desarrollo de estudios experimentales de la degradación anaeróbica de la fracción orgánica biodegradable presente en los RSU, explica desde el punto de vista teórico experimental la realidad biológica de estos tipos de procesos, según las variables que influyen en este, para a partir de estos modelar y simular el proceso. (Muñoz, Contreras, Santos, Regla y Cárdenas, 2020).

### **Análisis y discusión de resultados**

Para este experimento se preparó en el laboratorio una mezcla de FORSU (que represente aproximadamente la composición en carbohidratos, proteínas, etc. de la FORSU original, a partir de restos de comida, carnes, verduras, frutas, cascaras de vegetales, postres, etc y se caracterizó. La reducción de tamaño se realizó mediante la molienda de la FORSU a un tamaño de partícula de 5 mm aproximadamente, en condiciones húmedas. Una vez reducido el tamaño de los residuos seleccionados, se procedió a hidratar con la cantidad de residual establecida, ya que se estudió la codigestión con agua de una planta de tratamiento anaerobia de aguas residuales o una laguna anaeróbica.

La caracterización físico - química de los sustratos: agua residual, FORSU y mezcla de agua-FORSU se realizaron mediante los parámetros y métodos que se muestran en las Tablas 1 y 2.

**Tabla 1:** Parámetros utilizados para la caracterización del residual y la mezcla agua- FORSU

Parámetro	Unidad	Método
Sólidos Totales (ST)	Kg/m <sup>3</sup>	Standard methods (APHA, 2005)
Sólidos Totales Volátiles (STV)	Kg/m <sup>3</sup>	

**Tabla 2:** Parámetros utilizados para la caracterización de la FORSU

Parámetro	Unidad	Método
Materia orgánica,	%	Técnicas Analíticas estandarizadas
Sólidos Volátiles	Kg/m <sup>3</sup>	

Se implementó el sistema en dos fases en rango mesofílico, cuyo valor óptimo de temperatura es de 30oC a 33oC y se evaluó su eficiencia en el tratamiento mediante monitoreo y análisis de los parámetros operacionales y de control establecidos (Mandujano, 2001). Según Montes (2008), la concentración de sólidos totales en digestores anaerobios debe estar entre 22-28 kg/m<sup>3</sup>, para ser considerados de Alta Carga, valor dado por Tchobanoglous (2004). Por lo que, la concentración adecuada de FORSU para preparar la alimentación al digestor está entre 70 y 90 g de FORSU/L.

La determinación de los parámetros fisicoquímicos para la caracterización y operación del sistema se realiza según se describe en la tabla 3.

**Tabla 3:** Parámetros utilizados para la operación y control del sistema

Parámetro	Unidad	Método
Temperatura	oC	Termómetro
pH	-	pH metro
Sólidos Totales	Kg/m <sup>3</sup>	Standard methods (APHA, 2005)
Sólidos Volátiles	Kg/m <sup>3</sup>	Standard methods (APHA, 2005)
Biogás	L/d	Desplazamiento de agua

Posteriormente con los sustratos ya acondicionados, preparar la mezcla residual- FORSU, a esta mezcla se le determina: ST y SV con la finalidad de establecer las condiciones del sustrato de alimentación.

## Estabilización

Después de la inoculación el sistema entra a un periodo de aclimatación, para que los microorganismos se adapten al sistema. La evaluación del sistema se realiza mediante el análisis y monitoreo de los parámetros de la Tabla 3. Además, se determina la riqueza del hidrógeno y del metano, mediante un cromatógrafo de líquidos con detector doble masa.

En la Tabla.4 se muestran las condiciones de operación de ambas fases, basado en criterios de Montes (2008); Mandujano (2001) y Lagunes-Paredes, et al. (2016).

**Tabla 4:** Valores de los parámetros de control del sistema en fases.

Parámetro	Valor	
	Fase Acidogénica	Fase Metanogénica
Temperatura (oC)	30 ± 2	31 ± 2
pH	5,5- 6,5	3,75- 4,3
Tamaño de partícula (mm)	0,3- 5	
Concentración de ST (kg ST/m3)	22- 28	
TRH (d)	2-3	7- 15
Volumen de trabajo (L)	10	10

Se propuso un diseño experimental tipo factorial 23 con dos replicas, con los niveles de variables que se muestran en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Valores de los niveles de las variables de estudio del diseño factorial.

Variable	Abreviatura	Nivel Inferior (-)	Nivel superior (+)
pH inicial de la mezcla	X1	5,5	6,5
Concentración inicial de sustrato (kg ST/m3)	X2	22	28
Tiempo de retención hidráulico total	X3	10	15

**Fuente:** elaboración propia a partir de (Montoya-Pérez y Duran- Herrera, 2017; Mandujano, 2001).

Variables respuesta: remoción de ST y remoción de STV, rendimiento en la producción de hidrógeno y en la producción de metano.

En la tabla 6 se muestra la matriz del diseño.

**Tabla 6:** Matriz de diseño.

Experimento	Condiciones X1		Condiciones X2		Condiciones X3	
	Nivel	Valor	Nivel	Valor	Nivel	Valor
1	-	5,5	-	22	-	10
2	+	6,5	-	22	-	10
3	-	5,5	+	28	-	10

4	+	6,5	+	28	-	10
5	-	5,5	-	22	+	15
6	+	6,5	-	22	+	15
7	-	5,5	+	28	+	15
8	+	6,5	+	28	+	15

Con los resultados experimentales se realiza un ACV con el objetivo de identificar las etapas del proceso donde se producen las emisiones con mayor relevancia. Para el estudio de ACV solo se considera el proceso de digestión anaeróbica de la FORSU, el reciclaje de los RSI y la disposición en relleno sanitario. Como unidad funcional se toma el tratamiento de la FORSU con características adecuadas para la digestión anaeróbica, producida diariamente en Manta, resultando un flujo de referencia de 151,9 t de FORSU.

Los datos del inventario de ACV fueron obtenidos de los resultados experimentales y resultados de la literatura. 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.

Para el análisis 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.

### Análisis y discusión de los resultados

En la Tabla 7 se muestran los resultados experimentales de la fase acidogénica, donde aparecen los valores Sólidos Totales iniciales (STi) y en el efluente (STe), los Sólidos Totales Volátiles iniciales (STVi) y en el efluente (STVe), expresados en mg/L y los respectivos porcentajes de remoción, de acuerdo a los valores de pH y carga orgánica de ST (COST) y de STV (COSV) establecidos, expresados en kg ST/m<sup>3</sup>d y kg STV/m<sup>3</sup>d, según la matriz de diseño que aparece en la tabla 6 para un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 3 días.

**Tabla 7:** Resultados experimentales para la fase acidogénica.

	pHi	pHe	CO <sub>ST</sub>	CO <sub>SV</sub>	TRH	STi	STe	%Rem	STVi	STVe	%Rem
1	5.5	3.31	22	19.56	3	68.7	60.7	11.64	61.14	54.73	10.48
2	6.5	3.86	22	19.58	3	68.7	62.86	8.50	61.14	55.02	10.01
3	5.5	3.34	28	25.98	3	87.5	76.13	12.99	81.19	69.41	14.51
4	6.5	4.63	28	25.76	3	87.5	77	12.00	80.50	70.19	12.81
5	5.5	3.40	22	19.68	3	68.7	60.52	11.91	61.53	53.96	12.30
6	6.5	4.26	22	20.00	3	68.7	61.14	11.00	62.57	55.06	12.00
7	5.5	3.57	28	25.48	3	87.5	74.37	15.01	79.63	66.09	17.00

8	6.5	3.56	28	25.19	3	87.5	75.25	14.00	78.75	66.70	15.30
Prom	6	3.74	25	22.65	3	78.1	68.4963	12.13	70.81	61.40	13.05
Desv St	0.5	0.45	3	2.96	0	9.4	7.25419	1.85	9.24	6.82	2.25
Max	6.5	4.63	28	25.98	3	87.5	77	15.01	81.19	70.19	17.00
Min	5.5	3.31	22	19.56	3	68.7	60.52	8.50	61.14	53.96	10.01

Se observa que en la fase acidogénica se obtienen valores promedio de remoción de Sólidos Totales (ST) de 12, 13 % , de Sólidos Totales Volátiles de 13, 05 % y el pH promedio que se alcanza es de 3,74; valor que se considera adecuado para la fase acidogénica. El mayor % de remoción de ST y STV se obtiene para un valor de pH de entrada de 5,5; una carga orgánica de 28 kg ST/m3d.

De forma similar, en la Tabla 8 se muestran los resultados experimentales de la fase metanogénica.

**Tabla 8:** Resultados experimentales para la fase metanogénica

	TRH	STi	STe	%Rem	STVi	STVe	%Rem	pHi	pHe
1	7	60.7	33.60	44.65	54.73	27.40	49.94	3.31	7.40
2	7	62.86	37.00	41.14	55.02	29.10	47.11	3.86	7.79
3	7	76.13	38.40	49.56	69.41	30.40	56.20	3.34	7.68
4	7	77	40.80	47.01	70.19	32.80	53.27	4.63	7.11
5	12	60.52	25.40	58.03	53.96	18.20	66.27	3.40	7.04
6	12	61.14	29.30	52.08	55.06	22.80	58.59	4.26	7.34
7	12	74.37	25.10	66.25	66.09	16.90	74.43	3.57	7.01
8	12	75.25	28.40	62.26	66.70	18.50	72.26	3.56	6.91
Prom	9.5	68.50	32.25	52.62	61.40	24.51	59.76	3.74	7.29
Desv St	2.5	7.25	5.67	8.25	6.82	5.81	9.53	0.45	0.30
Max	12	77.00	40.80	66.25	70.19	32.80	74.43	4.63	7.79
Min	7	60.52	25.10	41.14	53.96	16.90	47.11	3.31	6.91

En la fase metanogénica, el valor promedio de remoción de ST es de 52, 62 % y de STV es de 59,76 %, con un valor promedio de pH de 7, 29. El mayor % de remoción de ST y STV se obtiene para el valor de pH de entrada de 5,5; carga orgánica de 28 kg ST/m3d y TRH de 12 días.

Estos resultados se encuentran en el rango de los obtenidos por otros autores (Mandujano, 2001).

En la tabla 9 se presentan los resultados de porcentos de remoción global de ST y STV y los rendimientos de la producción de hidrógeno y metano.

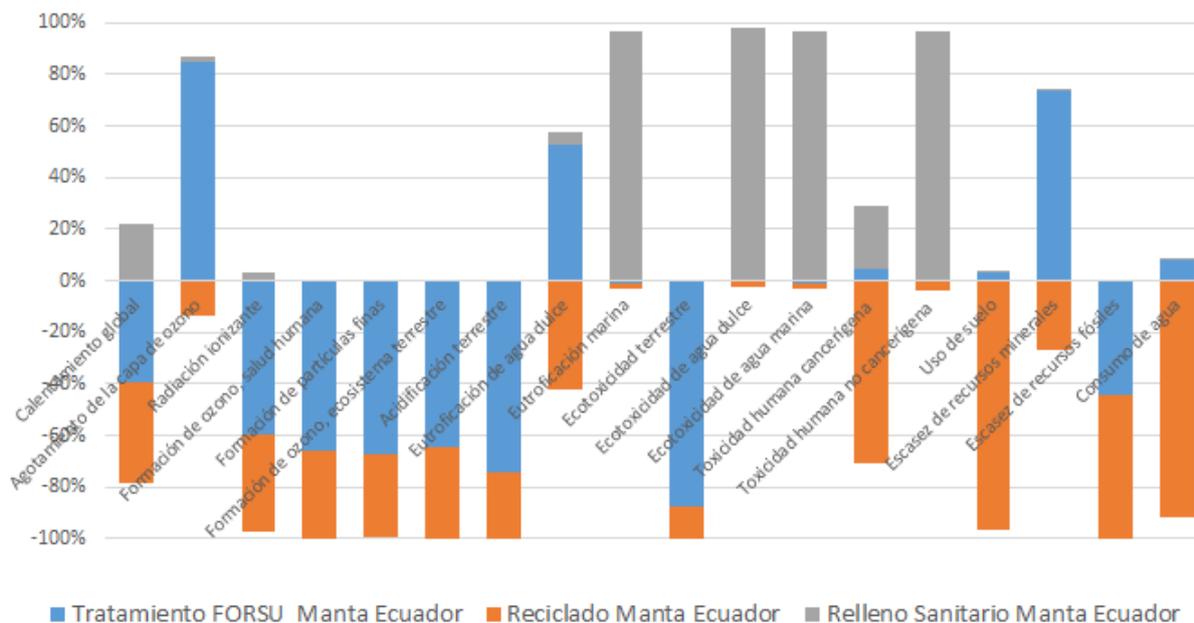
**Tabla 9:** Resultados globales de remoción de ST y STV. Rendimientos de producción de hidrógeno y metano.

	TRH	%R Global ST	%R Global STV	LH <sub>2</sub> /kg STV alim	LCH <sub>4</sub> /kg STV alim
1	10	67.10	73.63	45.80	523.39
2	10	51.51	58.62	35.98	474.32
3	10	76.30	81.29	40.65	492.67
4	10	69.92	77.33	37.27	372.67
5	15	64.00	71.14	32.50	325.04
6	15	65.69	72.29	23.97	303.66
7	15	85.30	88.80	45.21	527.44
8	15	78.57	77.60	36.83	380.95
Prom	12.5	69.80	75.09	37.28	425.02
Desv St	2.5	9.69	8.17	6.60	84.10
Max	15	85.30	88.80	45.80	527.44
Min	10	51.51	58.62	23.97	303.66

De forma general, se obtiene una remoción promedio de ST de 69,80 % con un valor máximo de 85,3 % y de 75,09 % de STV con valor máximo de 88, 80 %. El rendimiento de la producción de hidrógeno alcanza un valor promedio de 37,28 LH<sub>2</sub>/kg STV alim, mientras el rendimiento de la producción de metano muestra un valor promedio de 425,02 LCH<sub>4</sub>/kg STV alim

Por otra parte, se obtienen los resultados del ACV. En la figura 1 se muestra el perfil ambiental de la alternativa propuesta.

**Figura 1:** Perfil ambiental. Alternativa de tratamiento de Residuos Sólidos. Manta Ecuador.



Se observa que los principales impactos positivos están dados por el relleno sanitario, por sus efectos en la eutrofización del agua de mar, ecotoxicidad del agua fresca 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 relleno sanitario donde no se recolectan el biogás y lixiviados.

También se destacan los impactos positivos del tratamiento de la FORSU, por sus efectos en el agotamiento del ozono estratosférico, la eutrofización del agua fresca, escasez de recursos minerales y en menor medida en el consumo de agua, uso del suelo y toxicidad humana cancerígena. 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.

## Conclusiones

De los resultados obtenidos y en correspondencia con el objetivo propuesto en este trabajo, se ha logrado describir que una alternativa factible para la disminución de la ocurrencia del problema en la fracción orgánica de los RSU, es la obtención de un procedimiento energético, a través de su tratamiento por biogás, sin embargo, para que se obtenga mayor confiabilidad de los resultados, ello debe ser verificado experimentalmente.

## Referencias

1. Agrela, F., Cabrera, M., Martín M., Zamorano, M., Alshaaer, M. (2019). Biomass fly ash and biomass bottom ash. *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102480-5.00002-6>.
2. Angeriz, R. (2018). Producción de bio-hidrógeno por co-digestión anaerobia acidogénica de residuos sólidos urbanos, residuos alimentarios de cocina y lodos de depuradora. Trabajo de tesis. Ciencias tecnológicas, Ingeniería y tecnología del medio ambiente. Universidad de Cádiz. España. 2018.
3. APHA, (2005) "Standard methods for the examination of water and wastewater". American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. 21st edition, ISBN-13:978-0875530475. Public Health Association, Washington, USA.

4. Arena U., Mastellone M.L. y Perugini F. (2003). Life Cycle Assessment of a plastic packaging recycling system. *Int. J. Life Cycle Assess.* 8 (2), 92-98. DOI: 10.1007/BF02978432.
5. Barradas, A. (2009). *Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales. Estado del Arte.* Veracruz, México: Instituto Tecnológico de Minatitlán. Extracto de la tesis de Doctor en Ciencias en Ingeniería Ambiental del autor, por la Universidad Politécnica de Madrid, pp. 4-9.
6. Beily, M. E.; Bres, P.; Rizzo, P.; Giampaoli, O.; y Crespo, D. (2010) Monitoreo de un reactor anaeróbico semi-continuo para el tratamiento de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos. Parte II. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 14*, 2010. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
7. Bentsen, N.S. (2019). Biomass for Biorefineries: Availability and Costs. *Biorefinery*, pp 37-47. Disponible en: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-10961-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-10961-5_2).
8. BIOPLAT y SusChem-España (Plataformas Tecnológicas Españolas de Biomasa para la Bioeconomía y de Química Sostenible). (2017). Manual sobre las Biorrefinerías en España. [http://www.bioplat.org/setup/upload/modules\\_docs/content\\_URI\\_4020.pdf](http://www.bioplat.org/setup/upload/modules_docs/content_URI_4020.pdf).
9. Bovea, M., Cruz, S., Mercante, I., Coutinho, C., Eljaiek, M., Ibáñez, V. (2016). Aplicación de la metodología de ACV para evaluar el desempeño ambiental de sistemas de gestión de residuos en Iberoamérica., *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 32, No. Especial Residuos Sólidos, 2016, pp. 23-46. DOI: 10.20937/RICA.2016.32.05.03.
10. Castellanos, S. (2017). *Análisis de Ciclo de Vida para los biorresiduos sólidos urbanos generados en Bogotá D.C, Colombia.* Trabajo final para optar al título de Magister en Ingeniería Ambiental. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C, Colombia 2017.
11. Chandra, R., Iqbal, H.M., Vishal, G., Lee, H.S., Nagra, S. (2019). Algal Biorefinery: A Sustainable Approach to Valorize Algal-based Biomass towards Multiple Product Recovery. *Bioresource technology*, Vol. 278, pp 346-359.

12. Cherubini, F. & Strømman, A.H. (2011). Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, 102, 437-451.
13. De Jong, E. & Jungmeier, G. (2015). Chapter 1 - Biorefinery Concepts in Comparison to Petrochemical Refineries. In: Pandey, A., Höfer, R., Taherzadeh, M., Nampoothiri, K. M. & Larroche, C. (eds.) *Industrial Biorefineries & White Biotechnology*. Amsterdam: Elsevier.
14. EEscamilla-Alvarado, C.; Ríos-Leal, E.; Ponce-Noyola, M.T.; Poggi-Varaldo, H.M. (2012a). Gas biofuels from solid substrate hydrogenogenic-methanogenic fermentation of the organic fraction of municipal solid waste. *Process Biochemistry* 47: 1572–1587.
15. Escalona, E. (2014). Daños a la salud por mala disposición de residuales sólidos y líquidos en Dili, Timor Leste. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, vol. 52, núm. 2, mayo-agosto, 2014, pp. 270-277.
16. Escamilla-Alvarado, C.; Poggi-Varaldo, H.; Ponce-Noyola, M.T. (2011). Producción de hidrógeno y metano como biocombustibles bajo el esquema de biorrefinería. *Rev. Ide@s CONACYTEG*, Vol. 6, No. 71, Pág. 526-539.
17. Hoornweg, D. y Bhada-Tata, P. (2012). What a waste. A Global Review of Solid Waste Management. Washington: World Bank. Urban Development Series, March 2012, No. 15. [http://www.prepare-net.com/sites/default/files/what\\_a\\_waste2012\\_final.pdf](http://www.prepare-net.com/sites/default/files/what_a_waste2012_final.pdf).
18. Ivanov, V., Stabnikov, V., Ahmed, Z., Dobrenko, S. & Saliuk, A. (2015). Production and applications of crude polyhydroxyalkanoate-containing bioplastic from the organic fraction of municipal solid waste. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12, 725-738.
19. Jaramillo, G. y Zapata, L. (2008). Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. Medellín: Universidad de Antioquia. Recuperado el 9 de marzo del 2014, de [http://tesis.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/45/1/Aprovechamiento\\_RSOUnColombia.pdf](http://tesis.udea.edu.co/dspace/bitstream/10495/45/1/Aprovechamiento_RSOUnColombia.pdf).
20. Lagunes-Paredes, Y.; Montes-Carmona, M.E.; Vásquez-Márquez, A. y Cárdenas-Guevara, G.E. (2016). Evaluación de la generación de metano y la estabilidad del proceso de codigestión de lodos residuales y fracción orgánica provenientes de un

- centro comercial. *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*. Septiembre 2016 Vol.2 No.5 26-35.
21. Laurent A., Bakas I., Clavreul J., Bernstad A., Niero M., Gentil E., Hauschild M.Z. y Christensen T.H. (2014) Review of LCA studies of solid waste management systems—Part I: Lessons learned and perspectives. *Waste Manage.* 34 (3):573-88 DOI: 10.1016/j.resconrec. 2012.07.003.
  22. Lindorfer, J.; Lettner, M.; Hesser, F.; Fazeni, K.; Rosenfeld, D.; Annevelink, B.; Mandl, M. (2019). Technical, Economic and Environmental Assessment of Biorefinery Concepts. Developing a practical approach for characterization. IEA (International Energy Agency). *Bioenergy: Task 42:2019:01*. Copyright © 2019 IEA Bioenergy. All rights Reserved. ISBN: 978-1-910154-64-9.
  23. Mandujano, P. (2001). Digestión anaerobia de sólidos en alta concentración. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
  24. McDougall F., White P., Franke M., Hindle P. (2001). *Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory*, (Second edition) Copyright © 2001 by Blackwell Science Publishing Ltd.
  25. Montes, M.E. (2008). Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás. Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería Civil: Ordenación del Territorio, Urbanismo y Medio Ambiente E.T.S. I. de Caminos, Canales y Puertos
  26. Montoya-Pérez, L; Durán-Herrera, E. (2017). Producción de hidrógeno a partir de la fermentación de residuos agroindustriales de la piña. *Tecnología en Marcha*. Vol. 30-3. Julio-Setiembre 2017. Pág 106-118.
  27. Muñoz, M., Contreras, A., Santos, R., Regla, E., y Cárdenas, T. (2020) El método dialectico en el proceso de digestión anaeróbica para el tratamiento de residuos sólidos. *Revista ALLPA*. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, vol. 3. Num. 6. Disponible en <https://publicacionescd.uleam.edu.ec/index.php/allpa/article/view/119>
  28. Romero-Paredes, A. (2013). Gestión integral de residuos sólidos urbanos de la CEDA. Programa para el Desarrollo Bajo en Emisiones de México (MLED).

- CONTRATO: AID-523-C-11-00001. Tetra Tech ES Inc. Julio 7, 2013.  
www.mledprogram.org
29. Saraiva, A. B. (2017). System boundary setting in life cycle assessment of biorefineries: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14, 435-452.
  30. Soto, J.L. (2014). Alternativas de recogida, tratamiento y eliminación de residuos sólidos urbanos. Trabajo de Grado en Ingeniería de Obras Públicas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos. Universidad de Valencia. 2014
  31. Tchobanoglous, G., Theisen, H. y Vigil, S. (2004). Gestión integral de residuos sólidos. New York: McGraw-Hill.
  32. Tenorio, M. (2008). Diseño de plan de manejo integral de residuos sólidos para plegacol S.A., Pasantía para de Administrador del Medio Ambiente y de los recursos naturales., Universidad Autónoma de Occidente, Colombia, 2008.
  33. Zhang, Y.H.P. (2008). Reviving the carbohydrate economy via multi-product lignocellulose biorefineries. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 35, 367-375.