

APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO Y ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS TRATADOS EN DIGESTORES ANAERÓBICOS DE LA PLANTA DE BIOGÁS DE SAN MARCOS, NICARAGUA.

¹Mario F. Castellón Zelaya

mcastellonzelaya@yahoo.com Maestro en Ingeniería Ambiental. Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios Ambientales (PIENSA). Universidad Nacional de Ingeniería.

Ronald F. Rivera Madriz

romarivera@hotmail.es Maestro en Ingeniería Ambiental. Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios Ambientales (PIENSA). Universidad Nacional de Ingeniería.

RESUMEN

La conversión energética de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se ha perfilado en las últimas décadas como una de las formas más rápidas y seguras para resolver el problema del manejo inadecuado de los residuos sólidos. En Nicaragua se han dado pasos significativos en esta línea, siendo uno de los más notables la construcción y puesta en marcha a escala piloto de la Planta de Biogás de la ciudad de San Marcos; la cual fue objeto de este estudio. Los biodigestores fueron alimentados con Residuos Sólidos Orgánicos Domésticos (RSOD). Para dicho sustrato se realizó una caracterización física y química. Luego se realizó el monitoreo in situ de los parámetros de operación de la planta y se tomaron muestras de lixiviados y de efluentes líquidos y sólidos de la misma, las cuales fueron analizadas para determinar la eficiencia de los biodigestores en la estabilización de los RSU. Finalmente, se utilizaron modelos matemáticos recomendados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés) para estimar el potencial energético del metano generado, así como para cuantificar las reducciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) asociadas a su aprovechamiento energético.

Palabras claves: Digestión anaerobia, metano, biodigestores, efecto invernadero, energía.

INTRODUCCIÓN

La conversión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en energía es hoy una actividad extendida en países europeos y del primer mundo, con el objetivo fundamental de disponer en forma rápida y eficiente los residuos producidos por las comunidades, minimizando así la contaminación ambiental asociada a su inadecuado manejo y disposición. (INTI, 2010, p.4).

Como una alternativa en el aprovechamiento energético de los RSU, surge el uso de reactores anaeróbicos (biodigestores) para la biodigestión de la biomasa proveniente de los RSU. En Nicaragua, hasta la fecha el aprovechamiento energético de la biomasa se ha limitado al de bagazo de caña producido en los ingenios azucareros, a partir del cual se genera energía eléctrica a través de un proceso de incineración.

Se cuentan algunas experiencias en la implementación de bosques con fines energéticos, así como de sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales, que generan como subproducto, el biogás. En cuanto a la biodigestión, existen algunas experiencias de la aplicación de tecnologías de biodigestión para el aprovechamiento de residuos generados en algunas industrias, principalmente en los mataderos y granjas porcinas. También existe una amplia experiencia en el uso de biodigestores en el procesamiento de estiércol vacuno y humano.

¹ Managua, Villa Progreso. Del RUPAP 1 cuadra arriba. (505) 87463759
mcastellonzelaya@yahoo.com

A través de este estudio se monitoreó y evaluó la operación de la Planta de Biogás existente en el municipio de San Marcos, departamento de Carazo, la cual trata una Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) generados en el municipio. Esto con el fin de determinar y evaluar los parámetros de operación de la planta, tales como temperatura, pH, Tiempo de Retención Hidráulica (TRH), entre otros. Así mismo se determinó la cantidad y calidad del biogás generado, y la calidad del efluente líquido de los biodigestores para medir la eficiencia con que son estabilizados los RSU.

Tomando como referencia el volumen y características del biogás generado, se calculó el potencial de aprovechamiento del biogás como fuente alternativa para la generación de energía eléctrica expresado en función de su poder calorífico y además se estimó la reducción en las emisiones de Dióxido de Carbono y Metano, los cuales son algunos de los principales Gases de Efecto Invernadero (GEI's).

Estos resultados permitieron emitir criterios y recomendaciones para la optimización en el uso de la tecnología ya implementada y dió pautas para la réplica de plantas de esta naturaleza en otras localidades del país.

Así mismo, el monitoreo de la producción de biogás producido y la determinación de su potencial energético; permitió determinar su nivel de aprovechamiento como fuente de energía y de reducción de GEI's con el fin de aportar al manejo adecuado de los Residuos Sólidos Urbanos y a la protección ambiental.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestra

Se realizó un muestreo de los RSU para todo el municipio a fin de determinar la Producción Per Cápita (PPC), densidad y su composición física. Para la determinación de la muestra se utilizó el Método de Muestreo en la Fuente. Según dicho método, se puede determinar el tamaño necesario de la muestra (n) por la siguiente ecuación:

$$n = \frac{V^2}{\left(\frac{E}{1.96}\right)^2 + \frac{V^2}{N}} \quad (1)$$

n = número de viviendas a muestrear aleatoriamente

V = desviación estándar de variables xi (xi = PPC de la vivienda i) (gr/hab/día)

E = error permisible en la estimación de PPC (gr/hab/día)

N = número total de viviendas del estrato en cuestión

Caracterización físico química

Los parámetros físico químicos fueron obtenidos mediante la aplicación del *Standard Methods 21st edition*, 2000. Los parámetros estudiados fueron: Densidad, humedad, pH, alcalinidad total, materia seca, materia volátil, cenizas, nitrógeno total, carbono total, materia orgánica y fósforo total.

Arranque y operación de la planta

Para el arranque de la planta los biodigestores fueron inoculados con lodos provenientes de una planta demostrativa ubicada en las instalaciones de la Universidad Politécnica de Nicaragua (UPOLI) en la ciudad de Managua.

a) Recolección de RSU

Los RSUO domésticos fueron recolectados en los distintos barrios de la ciudad a través del Sistema de Recolección Municipal para luego ser transportados hasta un predio aledaño a la Planta de Biogás y posteriormente separar manualmente la fracción orgánica.

b) Almacenamiento

Para el almacenamiento del sustrato se utilizaron depósitos de 0.2 m³ y fosas recubiertas con plástico de polietileno color oscuro.

c) Selección y pesaje

Del volumen de residuos almacenados se procedió a la separación de la fracción orgánica. Posteriormente se realizó el pesaje según la carga a alimentar.

d) Triturado, mezcla y alimentación

A pesar de que la planta cuenta con trituradoras de materia orgánica, estas no pudieron ser operadas a causa de no existir una conexión a la red de energía eléctrica.

Desde su construcción, la planta cuenta con un generador de energía eléctrica utilizando biogás, el cual debería estar siendo utilizado para operar las trituradoras. Sin embargo, el biogás producido actualmente en la planta, está siendo suministrado a viviendas aledañas para su uso como fuente de calor, limitando la disponibilidad de biogás para la operación del generador.

Ante la inutilización del generador, cada sustrato utilizado en la alimentación de la planta fue picado manualmente utilizando palas metálicas y machetes.

Los biodigestores fueron alimentados diariamente con un peso de 120 lbs diarias. La biomasa fue picada hasta alcanzar una masa homogénea con partículas de aproximadamente 3 cm en promedio. Posteriormente fue llevada hasta la pila de mezcla agregándose un volumen de agua de agua equivalente al volumen de sustrato para obtener una relación 1:1. La mezcla fue agitada hasta lograr su homogenización para luego ser descargada a cada biodigestor.

Monitoreo de parámetros de operación

Durante la medición de los parámetros de operación no fue posible obtener valores para cada uno de los 7 biodigestores, debido a que la planta no presta las condiciones necesarias para ello. Por tanto para las mediciones se consideró que todos los biodigestores trabajan en las mismas condiciones de temperatura, pH, Tiempo de Retención Hidráulica y Velocidad de Carga Orgánica.

a) Temperatura

La temperatura fue medida en la muestra obtenida directamente de la descarga en el pozo de biol. Se utilizó un Termómetro marca *TEL – TRU Germanow*.

b) pH

En la muestra recogida en la descarga de la pila de biol se midió el valor de pH utilizando un pHímetro marca PH Meter, modelo PH- 009 (I).

c) Velocidad De Carga Orgánica

Conocido el volumen de sustratos con que se alimentó cada digestor y la concentración del sustrato se calculó la Velocidad de Carga Orgánica (VCO).

$$VCO(Kg / m^3 * dia) = \frac{Q * S}{V} \quad (2)$$

Donde, Q = caudal de alimentación del sustrato (m³/día)

S = concentración de sustrato en la alimentación (kg/m³)

V = volumen del biodigestor (m³)

d) Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

El TRH se calculó como la relación entre el biodigestor y el caudal de alimentación del sustrato.

$$TRH(días) = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

Donde, Q = caudal de alimentación del sustrato (m³/día)

V = volumen del biodigestor (m³)

Producción de biogás

a) *Medición de biogás producido*

El volumen de biogás producido se obtuvo mediante el registro de las lecturas de un medidor de flujo de gases instalado en la Planta de Biogás. Para ello se llevó un registro diario de las lecturas del medidor.

b) *Toma de muestras*

Las muestras de biogás fueron tomadas directamente en el gasoducto antes de llegar al tanque de eliminación de vapor de agua. Para la toma de muestras se utilizaron bolsas *SKC Quality Sample Bag Catalog Number: 231- 20* de 40 litros de capacidad.

c) *Producción de metano*

Se realizó análisis de laboratorio para determinar la producción de metano como porcentaje del biogás generado. El método de análisis utilizado fue el de Desplazamiento de Líquidos utilizando Hidróxido de Sodio (NaOH).

El procedimiento consistió en utilizar una solución concentrada de NaOH de 15 gr/lit. A medida que el biogás pasaba a través de esta solución de pH alto, el CO₂ del biogás se convirtió en carbonato y fue absorbido dentro del líquido.

Únicamente el gas metano pasó a través de la solución y un volumen equivalente fue impulsado afuera de la botella de *Mariotte*. El líquido desplazado se midió en un cilindro graduado y se pesó. Posteriormente se determinó su densidad y se calculó el volumen.

Eficiencia de estabilización de RSU

a) *Calidad de lixiviado*

Para la obtención de las muestras de lixiviado se tomó una cantidad de aproximadamente 10 kg del sustrato en la alimentación de los digestores y fue depositada en un recipiente y dejada en reposo durante 12 días, tiempo en que se considera se ha agotado todo el oxígeno presente.

El recipiente fue perforado en el fondo a fin de permitir el paso del lixiviado hasta un recipiente más pequeño que permitió la recolección de la muestra. Una vez obtenida la muestra, se analizaron los siguientes parámetros: pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno, Nitrógeno Total Kjeldahl, Fósforo Total y Potasio.

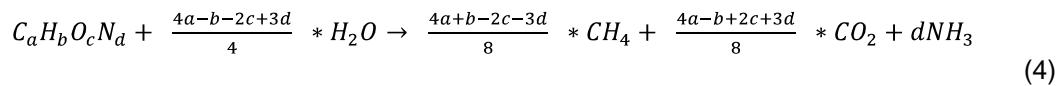
b) Calidad del biol

La muestra de biol fue recolectada directamente de la descarga de los biodigestores en la pila de biol. En el efluente líquido se analizaron los siguientes parámetros: pH, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Demanda Química de Oxígeno. En los lodos se obtuvieron parámetros de Nitrógeno Total Kjeldahl, Fósforo Total y Potasio.

Poder energético de los RSU

Para estimar el potencial energético de los Residuos sólidos Urbanos se utilizó un modelo matemático es el desarrollado por el *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*.

Mediante este modelo se estimó el potencial energético de la biomasa como una función del metano generado a partir del carbono en la descomposición anaerobia y del Poder Calorífico Inferior (PCI). La reacción global de descomposición del carbono orgánico se determinó mediante la siguiente ecuación:



En el modelo se consideró que el metano se colecta sin pérdidas y el amoníaco es muy bajo, por tanto, su aporte al potencial energético es mínimo. La estructura del modelo se define como:

$$PE_{RSOU} = M_{RSOU} * FO * FCB * FCM * \frac{16}{12} * PCI_{CH_4} \quad (5)$$

Donde,

PE_{RSOU} = Potencial energético de biomasa de RSOU (TJ/año)

M_{RSOU} = Masa de RSOU generados (ton/año)

FO = Fracción orgánica de los residuos de rápida biodegradación, expresado como ton Materia Orgánica / ton Materia Total

FCB = Fracción de carbono de los residuos de rápida biodegradación, expresado como ton carbono biodegradable/ ton materia orgánica de rápida biodegradación.

FCM = Fracción de carbono biodegradado a metano, expresado como t carbono degradado a CH4/ton materia biodegradable.

PCI_{CH_4} = Poder calorífico inferior del metano (TJ/ton masa seca)

Reducción de Emisiones de GEI's

Para estimar las reducciones de GEI's mediante el aprovechamiento energético de los Residuos Sólidos Orgánicos se monitoreó la producción diaria de biogás y se caracterizó calculando el volumen de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). La reducción de las emisiones de GEI's fue determinada por la cantidad de energía generada aprovechando el biogás y por el desplazamiento de combustibles fósiles.

Considerando los objetivos del estudio se seleccionó el escenario B3 – T2 de la Metodología consolidada para la generación de electricidad y calor a partir de biomasa (ACM0006), en el cual

se considera que el biogás se captura y se utiliza para producir electricidad y / o energía térmica y el gas ciudad es producido a partir de biomasa y combustibles fósiles como materia prima y combustible para el proceso de producción.

El cálculo de las reducciones de ton CO₂ se hizo utilizando la siguiente expresión matemática:

$$EB_{CH_4,y} = PCG_{CH_4} * D_{CH_4} * FCM * B_0 * M_{RSOU} * VS_{LT,y}$$

Donde,

EB_{CH₄,y}: Emisiones de línea base en el año y

PCG_{CH₄}: Potencial del Calentamiento Global (PCG) del metano

D_{CH₄}: Densidad del metano (ton/m³)

FCM: Fracción de carbono biodegradado a metano, expresado como ton carbono degradado a CH₄/ton materia biodegradable.

B₀: Producción máxima potencial de metano de los sólidos volátiles generados (m³_{CH₄}/kgSV)

M_{RSOU} = Masa de RSOU generados (ton/año)

VS_{LT,y}: Fracción de sólidos volátiles (kgSV/ton masa seca)

RESULTADOS Y DISCUSION

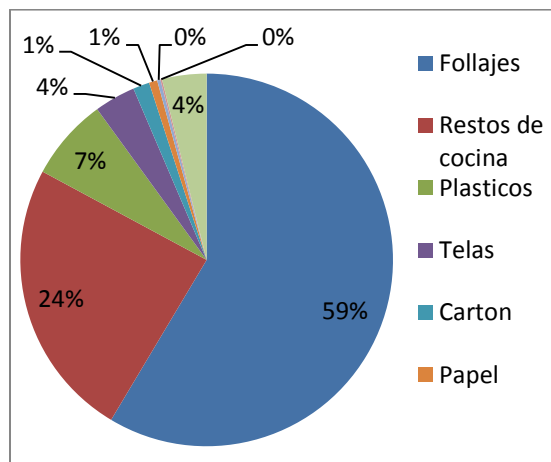
Producción de RSU

De la aplicación del método descrito en la metodología se obtuvo un tamaño de muestra de 58 viviendas para el casco urbano del municipio de San Marcos. Se determinó una Producción Per Cápita (PPC) en el casco urbano del municipio de San Marcos es de 0.55 kg/hab/día, con un volumen total de generación de 79.70 m³/día.

Caracterización físico química

En el municipio de San Marcos el 88% del volumen de residuos sólidos corresponden a la Fracción Orgánica, compuesta mayormente por follajes o residuos de jardín, y restos de comida. Ver Figura 1.

Figura 1.- Clasificación de Residuos Sólidos Urbanos, ciudad de San Marcos.



De medición de campo y de los análisis de laboratorio se obtuvieron los parámetros que definen la composición físico química del sustrato.

Tabla 1.- Características físico química de los RSUO.

Parámetro	Unidad	Valor
Densidad Suelta	Kg/m ³	650.99
Potencial Hidrógeno	pH	3.89
Humedad	%	90.10
Alcalinidad	g/Kg	<0.0002
Materia Seca	%	19.53
Materia Volátil	%	90.43
Cenizas	%	9.57
Nitrógeno Total	g/Kg	0.0012
Carbono Total	g/Kg	0.17
Fósforo Total	gP ₂ O ₅ /MS	0.00017
Materia Orgánica	g/Kg	0.32

Parámetros de operación de la planta

a) pH y temperatura

Los valores de temperatura a la cual operaron los digestores durante el periodo de estudio varían entre los 24 y 26 grados, lo que corresponde a un rango mesofílico.

El pH promedio fue de 7.6. La homogeneidad del pH a lo largo del tiempo de muestreo puede deberse a que se mantuvo constante el tipo y concentración del sustrato.

b) Velocidad de Carga Orgánica (VCO)

El valor de VCO durante el monitoreo fue la misma dado que el caudal y la concentración de alimentación se mantuvo constante.

Se obtuvo una Velocidad de Carga Orgánica de 0.07 kgSV/m³*día para la FORSU.

c) Tiempo de Retención Hidráulica (TRH)

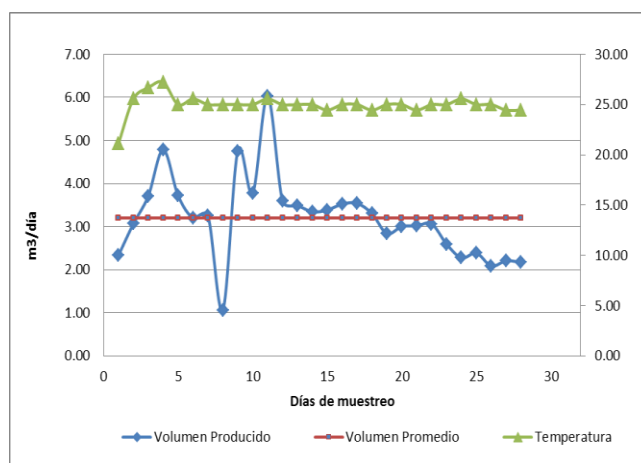
El TRH fue el mismo durante el periodo de monitoreo debido a que se mantuvo constante el caudal de alimentación de los digestores. El TRH fue de 33.33 días.

El valor de TRH se encuentra bastante aproximado al del diseño de la planta que fue de 33 días.

Producción de biogás

Se obtuvo una producción promedio de 3.20 m³/día. Esto equivale a una generación de 0.24 m³CH₄/kgSV. Expresada en función de la Materia Seca de alimentación se obtiene una producción de 0.10 m³CH₄/kgMS.

Figura 2.- Producción de metano vs temperatura. FORSU.



Se realizó el Balance de Masas para estimar el potencial de generación de metano del sustrato utilizado y luego contrastarlos con los volúmenes de biogás registrados en la operación de la planta obteniéndose que el potencial de generación sea de 0.48 m³CH₄/kgMS.

Generación de metano y estabilización de RSU

En promedio el porcentaje de metano es de 59.5 %. Este valor es similar a lo reportado en la bibliografía y comparado con los resultados del Balance de Masas, el porcentaje de metano del biogás medido se encuentra por encima del estimado que fue de 53.42.

Los parámetros estudiados fueron DQO y DBO₅ ya que se consideran como parámetros representativos que indican la calidad del efluente y que condiciona su reutilización o vertido.

a) Efluente líquido

A pesar de que las concentraciones de DQO se reducen significativamente, estas no cumplen con el Decreto 33 – 95 sobre Calidad de Vertidos de Efluentes provenientes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, lo cual significa que debe aplicarse un tratamiento posterior para mejorar la calidad del efluente. En la DBO₅ las concentraciones en el afluente fueron de 65,144 mg/l. Ver tablas 2.

Tabla 2.- Remoción de DQO y DBO₅ para RSUO.

DQO			DBO ₅		
Afluente (mg/l)	Efluente (mg/l)	Eficiencia (%)	Afluente (mg/l)	Efluente (mg/l)	Eficiencia (%)
140344	6042	96	65144	2500	96
	5671	96		1933	97
	9496	93		3495	95
	8640	94		4800	93
Promedio	7462	95	Promedio	3182	95

b) Lodos

Los lodos resultantes del proceso de biodigestión tienen un alto contenido nutricional que los convierten en una excelente alternativa para su uso como mejorador de los suelos en fincas aledañas a la planta o en los viveros de árboles frutales y maderables. Ver tabla 3.

Tabla 3.- Contenido nutricional de lodos.

	Nitrógeno Total (mg/lit)	Fósforo Total (mg/lit)	Potasio (mg/lit)
Sustrato 2	525.00	64.54	1647.00
	441.90	82.60	2595.00
	425.80	24.08	1892.00
Promedio	464.23	57.07	2044.67

Poder energético de los RSU y reducción de GEI's

Con la planta operando en óptimas condiciones podrían generarse 19.62 MW-hr/año de energía utilizando residuos domésticos orgánicos. Si se proyectara utilizar el total de los restos de comida generados en el casco urbano del municipio se trataría un 24% del total generado, equivalente a 1601 toneladas por año. Para esta cantidad de sustrato el potencial energético sería de 1548.14 MW-hr/año.

CONCLUSIONES

Se obtuvo una producción per cápita de RSU de 0.55 kg/hab/día, lo que equivale a una producción anual de 1601 ton/año, de este el 24.3% corresponde a restos de comida y cáscaras, los cuales por ser fácilmente biodegradables tienen un alto potencial para ser tratados mediante digestión anaerobia.

Los RSUO poseen una humedad del 43.21% con una densidad de 367.43kg/m³. El porcentaje de Materia Volátil de los RSUO es de 42.59%.

Se determinó que las unidades de biodigestión operan con valores de temperatura en un rango de 24-27 °C, que corresponde a un rango mesofílico.

El pH de operación varió de 7.0 – 8.5, manteniéndose sin variaciones significativas.

Para los parámetros de temperatura y pH no fue posible obtener una correlación directa con la eficiencia en la calidad y cantidad de biogás generado en el proceso de digestión anaerobia.

La producción de metano a partir de RSOU es de 0.24 m³CH₄/kgSV. Esto representa un aprovechamiento 22% del potencial de generación de metano calculado. Esto se debe fundamentalmente a las deficientes condiciones de operación de la planta, fundamentalmente en el triturado y mezcla de los sustratos.

El biogás producido utilizando los RSOU contiene un porcentaje de metano del 59%. Este valor es considerablemente mayor al porcentaje estimado teóricamente, el cual fue del 53%.

Al utilizar los RSOU como sustrato en la alimentación de los bio digestores se obtuvo un potencial de 0.07 TJ/año, que de ser aprovechado para la co generación de energía eléctrica representaría un potencial de 19.62 MW-hr/año.

Las reducciones en las emisiones de GEI's son bastante considerables alcanzando las 817 tonCH₄/ton Materia Seca, lo cual permite validar el beneficio ambiental de la digestión anaerobia como una tecnología limpia para el tratamiento de los Residuos Sólidos Urbanos Orgánicos.

BIBLIOGRAFÍA

Badami, M., Mittica, A., y Poggio, A. (2008). MSM Incineration Capacity Evaluations for the province of Turin (Northern Italy). 16th Annual North American Waste to Energy Conference, Pennsylvania.

Breure, A. M. (1986). Hydrolysis and acidogenesis fermentation of protein and carbohydrates in anaerobic ewaste waster treatments. Alblasserdam.

BUN-CA, U. N. (2002). Manuales de Energías Renovables: BIOMASA. San José, Costa Rica.

Carneiro, T. F. (2005). Digestión anaerobia termofílica seca de residuos sólidos urbanos: estudios de las variables en el proceso de arranque y estabilización del bio-reactor. Universidad de Cádiz, Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos Y Tecnologías del Medio Ambiente, Cádiz.

Carneiro, T. F., Fernández, L., Pérez García, M., Romero García, L., Álvarea Gallego, C., y Sales, D. (2004). Biometanización de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos: proceso SEBAC. Recuperado el 15 de Abril de 2013, de Companhia Ambiental do Estado de São Paulo: http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/mudancasclimaticas/biogas/file/docs/artigos_dissertacoes/8_foster_fernandez_perez_romero_sales.pdf

Comisión Nacional de Energía (CNE). (s.f.). Potencial de Recursos Energéticos de Nicaragua. Recuperado el 24 de Mayo de 2013, de Instituto Nicaraguense de Energía: http://www.ine.gob.ni/DGE/mercado/CNE_energias_renovables.pdf

González, R. (2013). Informe Final Proyecto Piloto: Tratamiento de Residuos Sólidos Urbanos con Aprovechamiento Energético Integral en la Ciudad de San Marcos. San Marcos.

Hernández, H. E., Orduz Prada, J., Zapata Lesmes, H., Cardona Ruiz, M., & Duarte Ortega, M. (2010). Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia. Bogotá.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). (2007). Biomasa: Digestores anaerobios. Madrid.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI). (2010). Valorización Energética de Residuos Sólidos Urbanos. Buenos Aires.

Madigan, M. T., y Jhon M. Martinko. (2006). Brock Biology of Microorganisms (11 ed.). Upper Saddle River: Prentice Hall.

Martínez, G. L. (2003). Biodigestión Anaerobia de Residuos Sólidos Urbanos. Universidad Distrital Francisco José de Caldas (F.J.C.).

McCarty, P. L. (1964). Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. Public Works, 107-111.

Ministerio de Energía y Minas (MEM). (2012). Balance Energético Nacional 2011. Managua.

Pozuelo, E. C., Flotats i Ripoll, X., & Bonmatí i Blasi, A. (s.f.). Biogás y aprovechamiento de la Biomasa. Universidad de Lleida.

Rossin, A., Teixeira, P., Zepeda, F., y Acurio, G. (1997). Diagnóstico de la Situación del Manejo de Residuos Sólidos Municipales en América Latina y el Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo (BID).

Tchobanoglous, G., Theisen, H., y Vigil, S. (1994). Gestión Integral de Residuos Sólidos. (A. G. Brage, Ed.) Madrid: McGraw - Hill/Interamericana de España S.A.