

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ANÁLISIS DE LA DISPOSICIÓN DE LOS DESECHOS SÓLIDOS Y GENERACION DE BIOGAS EN EL RELLENO SANITARIO DE AMBATO, ECUADOR

* Bertha Elizabeth Ibarra-López¹
Mariana Lucía Narváez-Castro²
Andrés de la Rosa²

ANALYSIS OF SOLID WASTE DISPOSAL AND BIOGAS GENERATION IN THE SANITARY LANDFILL OF AMBATO, ECUADOR

Recibido el 19 de mayo de 2019; Aceptado el 6 de febrero de 2020

Abstract

Urban solid waste presents a high environmental problem due to the products that are generated from its decomposition such as landfill gas (biogas) and leachate. Ecuador is a country with low average income, and it is estimated that by 2025 the generation of urban solid waste (MSW) will be 18,041 tons / day. Ambato is a district located in the province of Tungurahua and is characterized for being an agricultural sector. The present study is focused on analyzing the disposal of urban solid waste and the generation of biogas at different areas of the landfill. The Landfill of Ambato receives 120 tons/day of solid waste that contains 65% of organic waste. This sanitary landfill began its operation in 2006 and has an evacuation system for Biogas and leachate. For the present study, the landfill was divided in eight zones (A-H). Representative samples of landfill (buried waste) and biogas were taken from each zone to carry out laboratory analysis. The tests performed on soil samples of landfill were pH, organic matter, humidity and landfill gas (LFG) was characterized. The results of this study demonstrate that zone C contains the highest amount of methane and soil (buried waste) has a basic pH. The district of Ambato is an agricultural area, it has a high amount of organic waste. To improve methane generation a better technical management of the disposal solid waste is suggested. Improve soil (buried waste) compaction and moisture is suggested at zones (C-H).

Keywords: Ecuador, landfill, methane, organic matter.

¹ Universidad Técnica de Ambato, Facultad Ciencias Agropecuarias. Carrera de Ingeniería Agronómica, Ecuador.

² Universidad Central del Ecuador, Facultad de Ingeniería Química. Carrera de Ingeniería Química, Ecuador.

*Autor corresponsal: Carrera de Ingeniería Agronómica. Universidad Técnica de Ambato. Sector el Tambo. Vía Quero – Cevallos. Tungurahua. 1801334. Ambato, Ecuador. Email: elizabethibarra_che@yahoo.com

Resumen

Los residuos sólidos urbanos presentan un alto problema ambiental debido a los subproductos que se generan de su descomposición como son el biogás y los lixiviados. Ecuador es un país con ingresos medio bajos y se estima que para el 2025 la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) será de 18,041 toneladas/día. Ambato es un cantón ubicado en la provincia de Tungurahua y se caracteriza por ser una zona agropecuario. El presente estudio se enfoca en analizar la disposición de los residuos sólidos urbanos y su generación de biogás en las diferentes zonas del relleno. El Relleno Sanitario del Cantón Ambato recibe 120 toneladas/día de residuos sólidos que poseen el 65% de desechos orgánicos. Este relleno sanitario empezó su operación en el 2006 y posee un sistema de evacuación para el Biogás y los lixiviados. Para esta investigación el relleno se dividió en ocho zonas (A-H). De cada zona se tomaron muestras representativas de suelo del relleno (residuos enterrados) y biogás para realizar ensayos en el laboratorio. En las muestras de suelo del relleno se determinó pH, materia orgánica y humedad. En las muestras de gas se caracterizó y se determinó el contenido de metano. Los resultados de este estudio demuestran que la zona C contiene la mayor cantidad de metano y el suelo del relleno (residuos enterrados) es de carácter básico. Al ser el cantón Ambato una zona agropecuaria, posee una alta cantidad de residuos orgánicos. Para mejorar el aprovechamiento de la generación de metano contenido en el Biogás, el manejo técnico del relleno sanitario es muy importante. Como por ejemplo la compactación del suelo (residuos enterrados), y humedad se debería mejorar en las zonas (C-H).

Palabras clave: Ecuador, biogás, relleno sanitario, metano, materia orgánica.

Introducción

Una problemática mundial que se ha generado por el incremento de la población, migración de zonas urbanas a zonas rurales y por motivo de la revolución industrial ha sido la generación de desechos sólidos no peligrosos (residuos sólidos urbanos). Los cuales resultan en problemas económicos y ambientales (Moya *et al.*, 2017).

Es importante reconocer que los residuos sólidos urbanos (RSU) requieren una adecuada gestión. Usualmente la gestión de los residuos sólidos urbanos está a cargo de los municipios y es uno de los servicios públicos más costosos y complejos de manejar. Especialmente en los países en desarrollo se distribuye del 20% al 50% del presupuesto de los municipios al manejo de los residuos sólidos (Scarlat *et al.*, 2015). La generación de los residuos sólidos está relacionada a la actividad humana. Al no existir una apropiada disposición final de estos se puede llegar a una contaminación de los diferentes ecosistemas como el agua; produciendo afectaciones a la salud de la población. Así como, presentando riesgos extremos respecto al tratamiento, exposición, o manejo inadecuado de los subproductos generados en la descomposición de los RSU. Un mal manejo de los subproducto generados de la descomposición de los RSU como el Biogás puede dar lugar a una explosión en los lugares destinados a la disposición de los residuos sólidos (Santibañez-Aguilar *et al.*, 2015).

En algunos países de Europa se establecen normas y políticas ambientales con el fin de disminuir la generación de residuos sólidos en los domicilios y lugares de trabajo. Los seres humanos se concientizan con la generación de cero residuos y poseer la cultura de reciclar (Scharff, 2014). De

esta manera cooperan con el medio ambiente y se destina la menor cantidad de residuos sólidos a su disposición final.

El residuo se define como cualquier tipo de material que esté generado por la actividad humana y que está destinado a ser desechado. La Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial en la Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos menciona, que todo lo que es generado producto de una actividad y no es de interés ya sea para el hombre u otro organismo vivo y es difícil de reincorporar a los ciclo naturales se denomina residuo (Flechas & González, 2016). Siendo necesario conocer la composición de los residuos sólidos urbanos para planificar cualquier tipo de estrategia nacional para el manejo de los mismos (Hernández-Berriel *et al.*, 2017). Según el banco mundial se proyecta que la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) en América Latina y el Caribe (ALC) incrementaría a 220 millones toneladas/año para el 2025 (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012) donde las viviendas son la fuente principal de generación de RSU (Hernández-Berriel *et al.*, 2017).

La composición principal de los residuos sólidos comprende los residuos orgánicos, papel, metal, plástico, vidrio entre otros (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012). Tabla 1 indica el promedio de composición de los residuos sólidos a nivel mundial, en donde el mayor porcentaje de RSU pertenece a los desechos orgánicos (Flechas & González, 2016).

Tabla 1. Composición Promedio de los residuos sólidos a nivel mundial.

Composición RSU	Cantidad (%)
Orgánico	43.32
Metal	4.02
Papel/Cartón	18.0
Plástico	9.27
Vidrio	4.46
Otros	20.92

Fuente: (Flechas & González, 2016).

Inicialmente el tratamiento de los residuos sólidos urbanos consistía en arrojarlos al suelo o mar de esta manera contaminando las aguas superficiales y subterráneas (García *et al.*, 2018). Posterior a esto, los residuos sólidos eran dispuestos en vertederos a cielo abierto en donde el residuo solido urbano no poseía ningún tipo de separación y este era desalojado en quebradas, generando una pérdida del valor de estos tanto en términos de material y aprovechamiento energético. Al momento de emplear este tipo de método los residuos sólidos no eran ni reciclados ni reusados, ni recuperados para generar energía o uso de la materia prima. Los residuos sólidos producían problemas de salud, mal olor en las comunidades, contaminación ambiental de suelos

y del recurso agua. Adicionalmente en este tipo de vertederos se evidencia actividades de incineración a campo abierto generando gases tóxicos y de efecto invernadero (Greenpeace, 2004) (Flechas & González, 2016).

Estudios de Hornweg y Bhada – Tata (2012) mencionan que a nivel mundial existen diversas formas para la disposición final de los residuos sólidos, el estudio considera los métodos de disposición de residuos de acuerdo con el ingreso del país y pueden encontrarse países de ingresos bajos, ingresos medio-bajo, ingresos medios-altos e ingresos altos. Entre los métodos que se emplean para la disposición de los residuos sólidos se identifican el relleno sanitario, vertedero a cielo abierto, compostaje, reciclaje e incineración. Entre los países que emplean esta forma de disposición de desechos se puede mencionar a Colombia, Argentina, Chile, México, Perú y Honduras. La disposición de los residuos sólidos en algunos casos requiere del reciclado y separación de los RSU en la fuente. Uno de los métodos más utilizados para la disposición de los residuos sólidos urbanos en muchos países es el relleno sanitario ya que tienen un manejo técnico y amigable con el medio ambiente (Yang *et al.*, 2015), pero en los países de ingreso medio-bajo lo que se emplea en mayor proporción es el vertedero de cielo abierto.

La disposición de los residuos sólidos urbanos mediante un relleno sanitario es un método de gestión/manejo de RSU adecuado, más amigable con el medio ambiente y más económico respecto a otro método de disposición de residuos sólidos (Amini, Reinhart, & Niskanen, 2013). Una dificultad que se presenta en los rellenos sanitarios es la ubicación del mismo ya que se debe analizar aspectos sociales, ambientales y técnicos (Alavi *et al.*, 2013). El objetivo del relleno sanitario es disminuir la contaminación producida en los vertederos de cielo abierto. Se diseñan con una depresión en el terreno que es cubierto con una membrana de polietileno, en la parte inferior se cubre de arcilla. Posee un sistema de recolección de lixiviados y gases. Al momento de disponer los residuos sólidos se coloca una cobertura de tierra compactada con el fin de que no se acumulen las aguas lluvias (Flechas & González, 2016). La operación de un relleno sanitario consiste en mantener un registro de la cantidad diaria de los residuos que ingresan al relleno, una pre clasificación de los desechos, compactación de los residuos con material de cobertura, monitoreo del agua empleada en el relleno, monitoreo de lixiviados generados, ventilación y evacuación de los gases con un posible aprovechamiento energético del biogás generado (Hornweg & Bhada-Tata, 2012).

Como se ha mencionado los rellenos sanitarios tienen dos contaminantes ambientales muy importantes que son el gas generado (biogás) y el líquido generado (lixiviado). Al degradarse los desechos a través de una digestión anaeróbica los RSU producen el biogás, que se caracteriza por poseer un gas de efecto invernadero denominado metano (CH_4) que tiende a formarse cuando en los RSU existe una mayor cantidad de desechos orgánicos (Chassaigne & Pinto, 2017). Adicionalmente, el biogás posee dióxido de carbono (CO_2), gases tóxicos entre otros. La descomposición de los residuos sólidos urbanos en un relleno sanitario incluye algunos procesos

bioquímicos que influyen en la degradación de los residuos sólidos para la formación de biogás. Este proceso de degradación de los residuos sólidos urbanos (RSU) comprende 5 fases continuas entre fases aeróbicas y anaeróbicas. La primera fase aeróbica ocurre después que los RSU son dispuestos en el relleno sanitario, es una fase de corta duración en donde se produce la generación de CO₂. Posterior a esto se evidencia que el oxígeno disminuye y se presenta la fase anaeróbica generando un gas típicamente de 40-60% de metano, 35-50% de dióxido de carbono con elementos trazas de otros gases (Dace *et al.*, 2015). Por lo tanto, el ritmo de producción de biogás en un relleno sanitario es variable dependiendo de la edad del relleno, presentado velocidades menores cuando el relleno sanitario es más antiguo (Mejía & Gil, 2015). Otro de los contaminantes que generan un problema ambiental, es la generación de lixiviados. Este producto que proviene de la descomposición de los RSU se dispone en los cuerpos de agua cercanos. En algunos casos el líquido generado no posee tratamiento. Los lixiviados son altamente tóxicos y contienen materiales como el plomo, cadmio, níquel, arsénico entre otros metales que afectan a la salud del ser humano (Flechas & González, 2016).

La disposición de los residuos sólidos es un problema ambiental a nivel mundial que requiere de atención ya que uno de los gases generados es el metano y los lixiviados poseen concentraciones de metales pesados no aptos para el ser humano. Cuando la plata, arsénico, cadmio, cromo superan las concentración de 0.10 ppm, 0.01ppm, 5 ppm y 0.1ppm respectivamente presentan toxicidad en el ser humano como: cáncer, degradación de la célula en sus procesos bioquímicos y dificultad al respirar en las personas (Dixit, Ruchita *et al.*, 2015). Los gases que se generan por la disposición producen contaminación ambiental afectando a las vías respiratorias. La disposición de los residuos sólidos probablemente presenta la presencia de roedores que inciden en la calidad de vida de las comunidades aledañas. Es por esto el interés del presente estudio en analizar la disposición de los residuos sólidos urbanos en el cantón Ambato, ubicado en Ecuador. País de ingresos medios bajos según estudios de Hornweg -Perinaz (2012) en donde se estima que la generación de residuos sólidos para el año 2025 será de 18,041 toneladas/día (Hornweg & Bhada-Tata, 2012).

En el Ecuador durante los años de 1980 a 2000 el crecimiento económico dependía del petróleo y remesas de migrantes. Según los estudios de Soliz (2015) en este periodo, en el Ecuador se generó una problemática frente a los residuos sólidos y los primeros vertederos a cielo abierto se reportaron en Guayaquil (1974), en Quito (1977) y en Cuenca (1980) hasta estas fechas no existía una lógica de acumulación, ni los desechos eran preocupación del Estado. Posterior a esta problemática de generación de residuos sólidos existe en el país una campaña sobre bote la basura en su lugar. En los años 2010-2012 numerosos municipios cerraron sus vertederos y empezaron proyectos tecnificados de disposición de residuos sólidos (RSU). Es así como la gestión de residuos sólidos es competencia de los gobiernos autónomos descentralizado (GADs) y el ministerio del Ambiente (MAE) (Soliz, 2015). El país se caracteriza por poseer zonas agropecuarias, lo cual permite el origen de residuos sólidos urbanos con contenido de materia

orgánica del 71.4 por ciento (Windows *et al.*, 2019) el no poseer un manejo técnico adecuado contribuían a la contaminación ambiental.

Es importante recalcar que el Ecuador a través del ministerio del ambiente, en abril del 2010 crea el Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (PNGIDS) con el fin de disminuir la contaminación ambiental, eliminar los botaderos y emplear un método tecnificado de disposición de los residuos sólidos. El programa PNGIDS ha beneficiado a 15 GADs con la entrega de geomembrana. Financiado a 47 GADs con el estudio de Gestión Integral de Desechos Sólidos. Existe trabajo por realizar, ya que en el territorio nacional ecuatoriano existen 221GADs (Ambiente, 2017) en donde los dirigentes políticos en su gestión tienen un componente de conciencia ambiental.

Ejemplos de tratamientos de residuos sólidos y aprovechamiento del biogás se han realizado en las ciudades Guayaquil, Cuenca y Quito. En el caso de Guayaquil se menciona que el 58,68% de los residuos representan desechos orgánicos (Lindao & Quisnancela, 2015) lo que permite el aprovechamiento energético del biogás en el relleno sanitario. En Cuenca se propone el aprovechamiento del biogás generado en el relleno sanitario y de esta manera cooperar con el 1% al 2.5% de la energía de Cuenca empleando al biogás como energía renovable (Barragán *et al.*, 2016). En el relleno sanitario El Inga de Quito se transporta el biogás a dos motos generadores que funcionan con el ciclo otto con una capacidad de 40MW al día (Zúñiga *et al.*, 2015).

El presente estudio tiene como objetivo analizar la disposición de los desechos sólidos, que consiste en revisar el manejo técnico del relleno sanitario de la ciudad de Ambato, gestión del municipio, determinar las propiedades físicas y químicas de muestras de suelo (desechos enterrados) y caracterización del biogás generado en el relleno sanitario del Cantón Ambato ubicado en Ecuador. Una de las características que tiene el relleno sanitario de Ambato es que la mayor parte de sus residuos sólidos representan desechos orgánicos (65%) como se observa en la Tabla 2.

Tabla 2. Composición de los desechos sólidos del Relleno Sanitario de Ambato.

Composición de desecho sólido no peligroso	Porcentaje que representa (%)
Residuos Orgánicos	65
Papel – cartón	15
Plástico	9
Vidrio	3
Maderas – árboles	5
Metales	3

Fuente: (López Fabara, 2011).

El cantón Ambato se dedica a la agricultura y a la venta de productos agrícolas en mercados. Por este motivo, los desechos orgánicos provienen de mercados, residuos de la agricultura, desechos de los domicilios en cuanto a la preparación de los alimentos. Dando como resultado una ventaja para la acumulación de desechos orgánicos. Estos datos fueron recolectados por el departamento de gestión de residuos sólidos del GADs de Ambato. La ventaja que tiene el alto contenido de materia orgánica es el aprovechamiento energético. Este aprovechamiento existe cuando el porcentaje de metano está en el intervalo del 40 al 60% (Dace *et al.*, 2015).

Materiales y Métodos

Relleno Sanitario

El Relleno Sanitario seleccionado se ubica en el cantón Ambato, vía Píllaro a 170 km al sur de la ciudad de Quito a 78° 37' 1" de longitud con relación al Meridiano de Greenwich a 1° 13' 28" de latitud sur con relación a la Línea Equinoccial, a 2,577.067 metros sobre el nivel del mar (Figura 1). El sector presenta una temperatura de 19°C y precipitación de 32%. El relleno sanitario comenzó a funcionar en el año 2006 y diariamente recibe 210 toneladas/día de residuos sólidos urbanos.

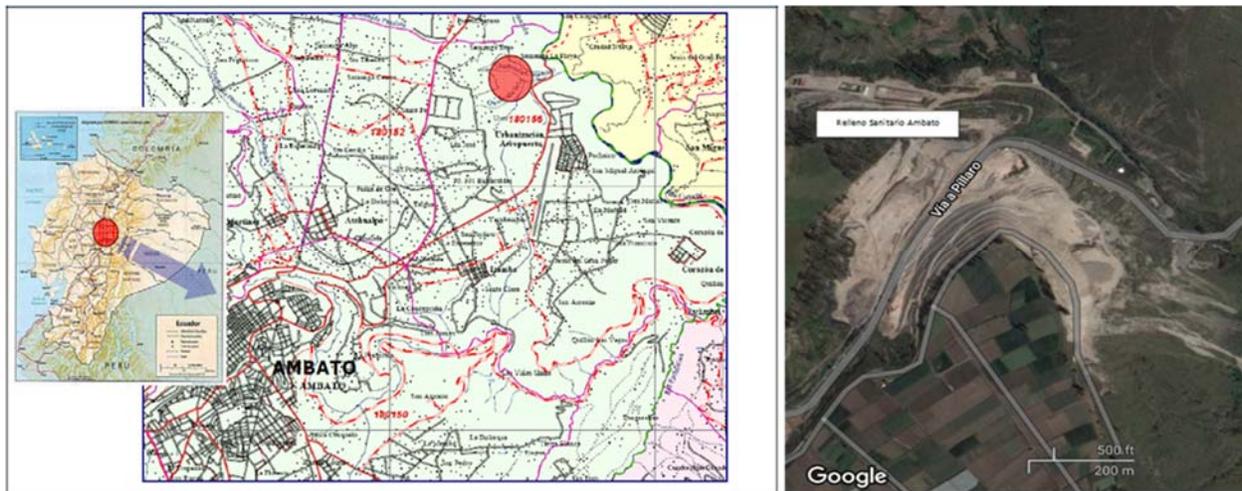


Figura 1. Ubicación del Relleno Sanitario de Ambato.

Para realizar el estudio, el relleno sanitario se dividió en ocho zonas asignadas con letras mayúsculas de la A – H como se observa en la figura 2a. El mecanismo de disposición de los residuos sólidos del relleno sanitario es mecanizado y tiene drenes para la evacuación del biogás y lixiviados. El proceso de disposición de los residuos sólidos en el relleno sanitario comienza con el pesaje de los desechos, disposición de los desechos en las trincheras, confinación y compactación de los desechos con tierra y evacuación del gas y lixiviados generados por la

descomposición de los desechos en las zonas de descarga. En la Figura 2 (a) se describe el diseño del relleno sanitario del cantón Ambato cuya estructura es espina de pescado, posee los drenes de evacuación de lixiviados y las chimeneas para la evacuación de biogás. Figura 2b representa la forma de la chimenea de venteo y combustión del biogás las cuales fueron etiquetadas para la evaluación de la producción de biogás. En el transcurso del día las chimeneas del relleno sanitario del cantón Ambato permanecían encendidas, de esta manera el metano, un gas contaminante que tiene la capacidad de absorber 21 veces más calor en la atmósfera que el dióxido de carbono (Chassaigne & Pinto, 2017), mediante la reacción de combustión se transforma a dióxido de carbono.

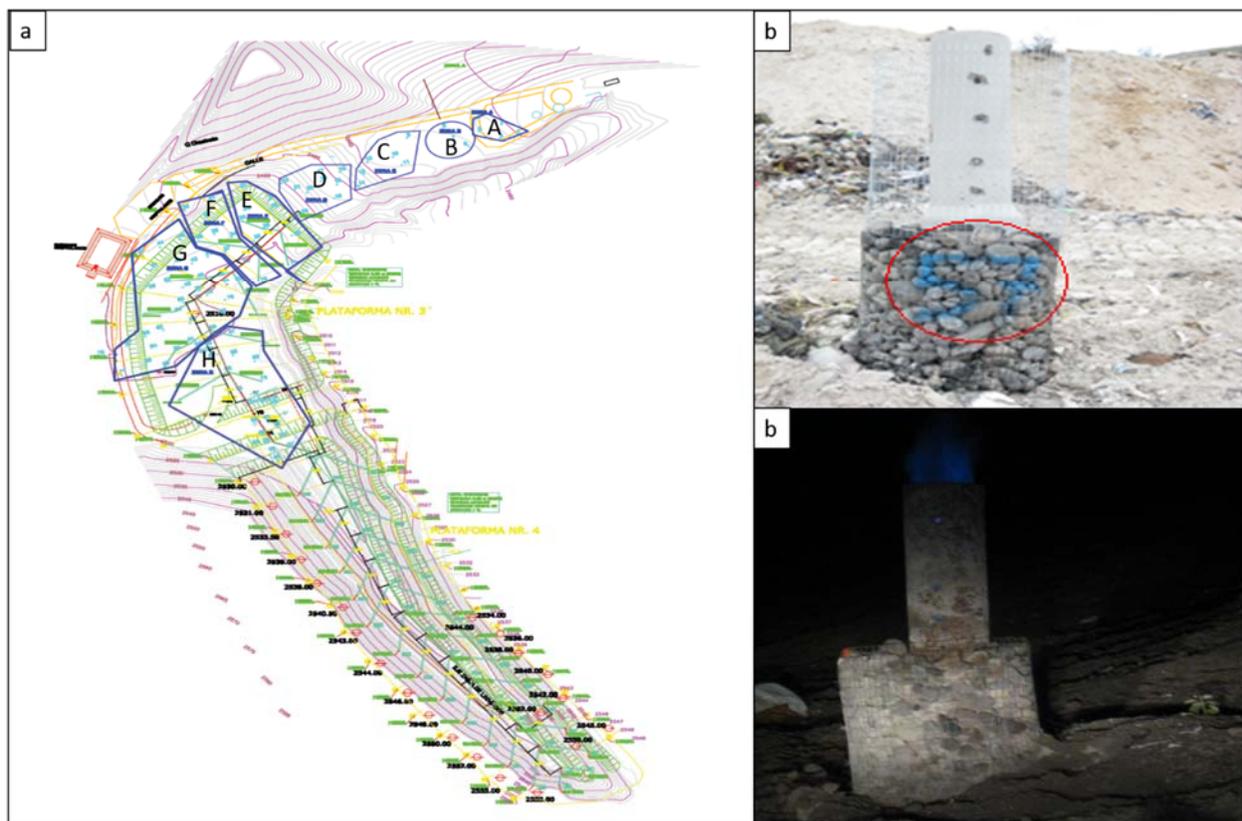


Figura 2. Estructuras a) Relleno Sanitario de Ambato (zonas A-H) b) Chimenea para extracción de biogás.

Recolección de muestras de suelo (residuos enterrados)

Se recolectó muestras de suelo (residuos enterrados) de las zonas marcadas y representativas en el relleno sanitario mediante el método técnico del Instituto Colombiano de Normas Técnicas (Icontec), denominado cuarteo para lo cual se realizó una circunferencia alrededor de las chimeneas y se seleccionó las dos cuartas partes opuestas de las circunferencias, se introdujo el

barreno a unos 60 cm de profundidad, se homogeneizó la muestra de suelo, se seleccionó 1000 kg de muestra de suelo por cada zona, se etiquetó, almacenó y se llevó al laboratorio para su tratamiento. Las muestras de suelo fueron trituradas y tamizadas empleando tamices de Tyler de 2mm para sus análisis. Se recolectaron 80 muestras de suelos de las zonas A-H.

Análisis de muestras de suelo

Las muestras de suelo preparadas se utilizaron para determinar pH, materia orgánica, temperatura y humedad en donde cada análisis se realizó por triplicado. En la determinación de pH se empleó el pH metro (HACH). Se pesó 20 g de suelo, se adicionó 20ml de agua destilada, se agitó y se procedió a medir el pH de todas las muestras. El análisis se realizó por triplicado que consiste en analizar las muestras por tres veces.

Para determinar materia orgánica se empleó el método Walkely y Black (1934) que determinándose la materia orgánica total de las muestras de suelo mediante la Ecuación (1). Se considera que un suelo superficial que tiene buenas condiciones para el desarrollo vegetal se caracteriza por poseer hasta 5% en volumen de materia orgánica. Este valor permite una buena generación de cobertura vegetal (Blaya & García, 2003).

$$\%Materia\ Orgánica = \frac{(V_D - V_S N F_S) 0.003 \times 100 \times 1.72}{0.77 P} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$F_S = \frac{20}{V_b} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

V_D = Volumen de $K_2Cr_2O_7$ 1N empleado ($V_D = 10$ ml) ($F = 1$)

V_S = Volumen de $(SO_4)_2Fe(NH_4)_2$ que no ha reaccionado con el suelo

N = Normalidad de $(SO_4)_2Fe(NH_4)_2$ ($N_S = 0.5$ N)

F_S = Factor de disolución de $(SO_4)_2Fe(NH_4)_2$

P = Peso de la muestra

0,003 = Peso miliequivalente del carbono. Equivale al cociente entre 12/4000

1.72 = Constante de conversión de carbono en materia orgánica sobre hipótesis de que la materia orgánica contiene 58% de carbono en la generalidad de suelos encontrados en el país.

0.77 = Constante de conversión de materia orgánica oxidable en materia orgánica total.

V_b = Volumen promedio de valoración de la sal de Morh

La humedad se determinó mediante la diferencia de pesos de la masa de crisoles que se dejaron en la estufa a una temperatura de 110 °C hasta que el peso del crisol permaneció constante. El porcentaje de humedad de las muestras de suelo se determinó empleando la Ecuación (3).

$$\%Humedad = \frac{(W_{1(tierra)} - (W_{2(tierra+crisol)} - W_{(crisol\ tarado)}))}{W_{1(tierra)}} \times 100 \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

$W_{1tierra}$ = Peso de la tierra sin secar

$W_{2(tierra+crisol)}$ = Peso de la tierra con el crisol

W_{*1} = Peso de la tierra seca

Biogás

Para recolectar el Biogás, las chimeneas se envolvieron completamente y se colocó un cabezal metálico que permitió la captura del biogás en fundas Tedlar utilizando una bomba de vacío. En el caso de las chimeneas que se encontraban encendidas, se procedió a pagarlas y esperar un momento que el flujo de biogás se estabilice. Se recolectó muestra de biogás en la mañana y en la noche de cada una de las 97 chimeneas que representan a las zonas A-H. Las muestras fueron etiquetadas, almacenadas y transportadas a los laboratorios. El análisis de biogás se realizó mediante cromatografía (cromatógrafo Agilent 7890 A) y empleando el método INEN ISO 6975. Los resultados de caracterización del biogás, porcentaje de metano se compararon con el porcentaje de metano del relleno sanitario las iguanas y metano standard.

En las ocho zonas del relleno sanitario se encontraron 97 chimeneas distribuidas en distintas partes. Cabe recalcar que las chimeneas se construyen de tal forma como se incrementa el volumen los desechos en los taludes en el relleno sanitario. Por ejemplo, la primera zona A del relleno sanitario se encuentran cinco chimeneas y es la zona más antigua.

El poder calorífico es una variable importante ya que mide el contenido energético por unidad de masa o unidad volumen (Cala *et al.*, 2013). Se determinó el poder calorífico en relación con el porcentaje de metano empleando la Ecuación (4),

$$PCI_{muestra} = \% \text{Metano} \times PCI_{\text{metano}}$$

Ecuación (4)

Donde:

PCI_{metano} es 882.81 BTU/pe³

%Metano es la cantidad de metano que se determina en las muestras de biogás.

Resultados

Para la realización del presente estudio se seleccionó el relleno sanitario verificándose que el relleno cumpla con las especificaciones técnicas de funcionamiento para ser denominado relleno sanitario (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012). El relleno sanitario seleccionado fue el del Cantón Ambato, que tiene la forma de espina de pescado. La base del relleno está asentada en una cobertura en su inferior con geomembrana posee drenes para la evacuación del lixiviado y chimeneas para el venteo y quema del biogás. En el relleno sanitario se distribuyeron ocho zonas de muestreo (ver Figura 2) para la toma de muestras de suelo (residuos enterrados) y biogás; constatando las zonas de operación y cierre.

El manejo de la disposición final de los residuos sólidos en el relleno sanitario del cantón Ambato empieza con el pesaje de los desechos que ingresan al relleno, seguido por los procesos de mecanizado, compactación y disposición de los residuos sólidos urbanos (RSU). Por ejemplo, la zona A empezó en el año 2006 siendo la zona más antigua del relleno; posee 5 chimeneas, características específicas como suelo negro, ramas, forraje y vegetación, zona que se encuentra

en etapa de cierre ya que no se dispone residuos sólidos urbanos en esta sección, como se observa en la Tabla 3. Otra zona característica que se encuentra presente desde el año 2008 es la zona C, siendo una zona donde se evidencia material vegetativo en crecimiento y es una de las zonas que el suelo presenta una buena compactación.

La maquinaria compactadora (tractor tipo topador) pasa por las zonas varias veces. En la zona C se observa un grosor de los desechos y tierra de unos 40 cm y la compactadora pasa a mayor velocidad. En esta zona el contenido de oxígeno es inferior comparado con las zonas (A, B, D, E, F, G). Las chimeneas en todo el relleno sanitario se encuentran encendida permitiendo una mejor generación, evacuación del biogás, venteo y quema del mismo. En las zonas G, H se observa que la maquinaria compactadora pasa pocas veces y a baja velocidad. El material de cobertura (tierra) no es mezclado adecuadamente. Los resultados de este estudio permiten establecer que la edad de relleno es una variable de análisis de la vida de un relleno sanitario. Ya que las zonas A, B son zonas que requieren un cierre técnico; las zonas C, D, E, F son zonas que se encuentran en su etapa de digestión anaeróbica ya que no reciben RSU; y las zonas de operación G,H reciben RSU y se disponen a enterrar.

El mecanismo de disposición de los RSU consiste en el pesaje de los residuos, se distribuyen en la zona de mezcla con tierra (material de cobertura) y finalmente se compacta (Flechas & González, 2016). Un tanquero pasa diariamente en las diferentes zonas del relleno para mejorar la compactación y humedad del suelo del relleno. En el análisis de la disposición de los residuos sólidos se caracterizó las ocho zonas que contempla el relleno sanitario como se observa en la Tabla 3. Los residuos dispuestos en la zona G y H poseen una previa clasificación de los residuos sólidos urbanos que consiste en separar los plásticos, metales y cartón.

En este estudio se analizó las condiciones de disposición de desechos sólidos, que consiste en revisar el mecanismo que emplea el relleno sanitario del cantón Ambato para la disposición de los residuos sólidos y finalmente determinar si se puede mejorar la producción de biogás mejorando la disposición de los residuos.

La descomposición de los residuos sólidos urbanos enterrados consiste en varias fases que permiten la producción de biogás. A este proceso de descomposición se conoce como etapas metanogénicas en las que se producen varios gases, como el Metano (CH_4) (Köfalusi & Aguilar, 2006).

Para que la generación de metano sea representativa en la producción de biogás, el metano debe encontrarse en un 55%. El pH óptimo del suelo (residuos enterrados), debe estar alrededor de 7 para mantener las reacciones metanogénicas y de esta manera permitir una mejor producción de metano (Farquhar & Rovers, 1973). Cuando el pH se encuentra en 5.5 la generación de metano disminuye ya que existe otro consorcio de bacterias que toleran crecer en esa zona (Corrales *et*

al., 2015). En el presente estudio los resultados del pH oscilan de 6 a 10 en las diferentes zonas del relleno como se observa en la Figura 3.

Tabla 3. Características del Suelo del Relleno Sanitario.

Zonas	Características	Años residuo compactado
A	Suelo negro, presencia de ramas, forraje y algunos restos metálicos. Es la zona más antigua del relleno y cierre del relleno. Se localizan 5 chimeneas.	Trece años
B	Suelo de color chocolate con presencia de ramas, forraje. Zona más antigua del relleno, y cierre del relleno se encuentran 3 chimeneas.	Doce años
C	Suelo color negro con presencia de ramas, forraje, material pétreo y restos de llantas. Se localizan 6 chimeneas.	Once años
D	Suelo de color café oscuro con presencia de plásticos, cauchos, basura para descomposición, zona joven del relleno sanitario. Se encuentra un total de 9 chimeneas.	Diez años
E	Suelo de color gris, zona joven del relleno sanitario. Se localizan 9 chimeneas en el relleno sanitario.	Nueve años
F	Suelo de color café obscuro, zona joven del relleno; sobresalen los desechos sólidos urbanos. Se localizan 9 chimeneas.	Ocho años
G	Suelo de color café claro, presencia de plástico, materiales de vidrio, telas zona de compactación. Zona de trabajo del relleno sanitario, sobresalen los desechos sólidos urbanos. Se localizan un total de 34 chimeneas.	Siete años
H	Suelo de color gris, con presencia de materia pétreo, plásticos, restos de basura, zona de descarga de los residuos sólidos. Se localizan un total de 22 chimeneas.	Seis años

Las condiciones de materia orgánica en los residuos enterrados son importantes; un buen suelo debe poseer hasta el 5% de materia orgánica para que se representativo en la vegetación. Otra variable que se considera en el estudio es la humedad del suelo ya que para mejorar la producción de metano (Farquhar & Rovers, 1973), suelos húmedos activan a las bacterias para tener una mejor producción de metano y las temperaturas deben oscilar entre 35 – 50 °C (Köfalusi & Aguilar, 2006).

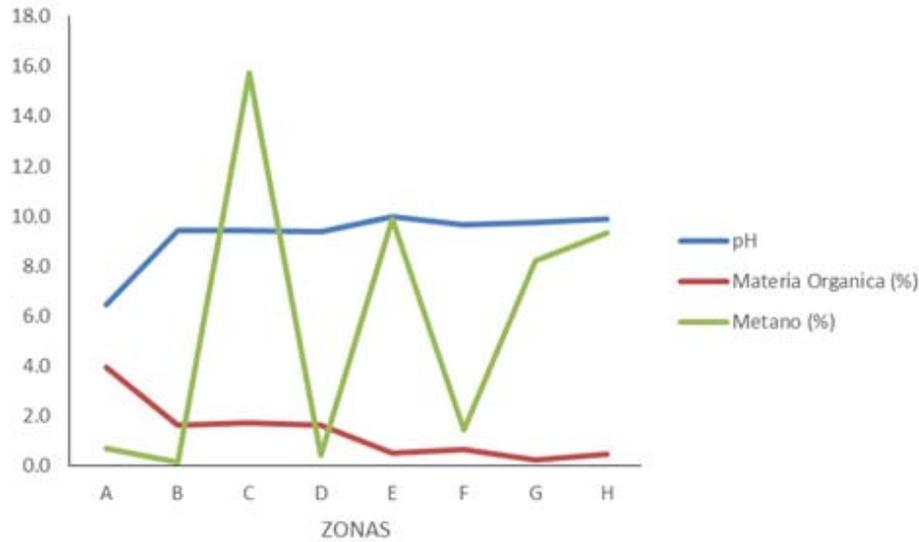


Figura 3. Valor de pH, Materia Orgánica (%) y Metano (%) en diferentes zonas.

La humedad de los residuos enterrados es baja ya que oscila entre 10 – 19%, como se observa en la figura 4. La figura 4 muestra los resultados del análisis de la humedad de los suelos (residuos enterrados) en las diferentes zonas del relleno sanitario del cantón Ambato, considerando que la temperatura tienen incidencia en la digestión anaeróbica (Aguilera, 2016).

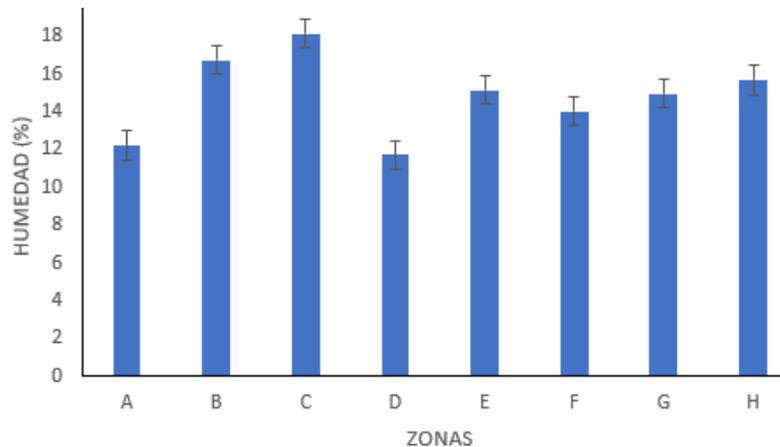


Figura 4. Relación de la humedad del suelo.

La zona C posee mejor humedad de 18.5%, las muestras de suelo (residuos enterrados) fueron recolectadas a 60 centímetros. La zona C, se caracteriza por tener once años de vida en el relleno sanitario, posee un suelo de color negro, no hay vegetación y se observa que los residuos urbanos se encuentran en degradación.

La humedad del suelo puede ser alterada por las condiciones ambientales (lluvia) y el tanquero de agua, que es un mecanismo de regar agua a través de un carro en todas las zonas del relleno sanitario.

Para realizarlo se recolecto muestras de suelo a una misma hora, identificando que en las ocho zonas del relleno la humedad oscila del 10 al 20 por ciento. Ambato es un cantón con una temperatura de 19°C y la temperatura de las muestras de suelo recolectadas no superaban los 15°C.

El conocimiento de la composición de los residuos urbanos es importante para reconocer los diferentes componentes que se presentan en los desechos. Por ejemplo, para una buena producción de metano debe existir un alto porcentaje de residuos orgánicos. En este estudio se realizó el análisis de materia orgánica en todo el relleno sanitario. Considerando que la materia orgánica se produce por la degradación de los residuos enterrados, las muestras de suelo (desechos enterrados) permitieron determinar la materia orgánica en las ocho zonas del relleno.

La figura 5 representa la fracción orgánica presente en el suelo del relleno. La Zona A es la más antigua y posee 4% de materia orgánica. Esta zona se caracteriza por poseer material vegetativo y es una zona de cierre. Se evidencia que las zonas B, C, D, E, F, G, H tienen bajo contenido de materia orgánica en el suelo ya que sus desechos todavía no son degradados.

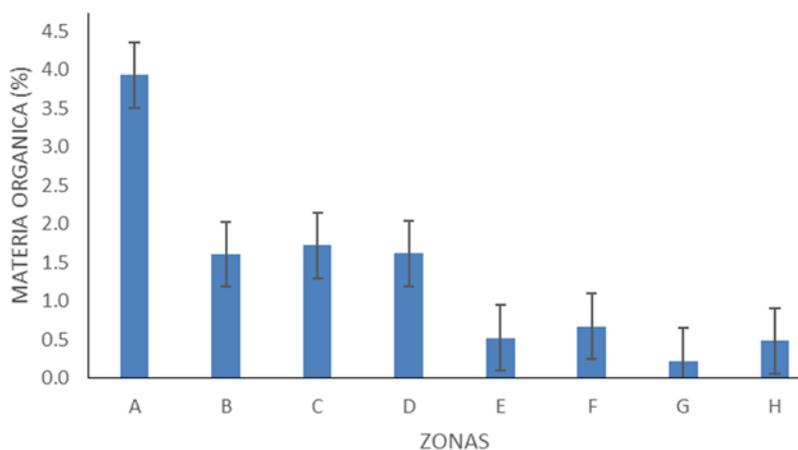


Figura 5. Valor de Materia Orgánica.

En el análisis de la generación de biogás, las muestras fueron recolectadas de las ocho zonas. Se colocó un cabezal en las chimeneas. Se esperó que el biogás se confine, se succione el gas a través de una bomba de vacío y se almacenó en fundas Tedlar. Mediante cromatografía se determinó la composición del biogás. Para estandarizar el método se empleó un biogás cilindro estándar EPA que permitió calibrar los cromatógrafos. El contenido de este biogás representa 55.69 % a CH₄, y 40.11% CO₂.

Los resultados de la caracterización del biogás del relleno sanitario del cantón Ambato se compararon con el relleno sanitario de Guayaquil. En el caso del relleno sanitario de Guayaquil el biogás posee 54% al 70% de metano (Pancho- Echeverría, 2015). Los resultados del relleno sanitario de Ambato demuestran que el biogás posee en promedio 5.31% de metano. Esta comparación permitió establecer que la temperatura y humedad incide en la producción de metano ya que la temperatura en Guayaquil oscila en los 24°C y poseen una humedad alta caso contrario a lo que se evidencia en Ambato que es una zona fría. En el caso de Guayaquil se llevan a cabo proyectos de captación de biogás y disminución de la carga contaminante ambiental del metano (Atlas, 2015)

La caracterización del biogás recolectado en el relleno sanitario del cantón Ambato, posee gases como metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), nitrógeno (N₂), oxígeno y otros gases (H₂, NH₃, H₂S). Las muestras recolectadas reflejan un alto contenido de oxígeno (O₂). Las chimeneas fueron selladas de tal manera que el aire no ingrese a las muestras. Pero la cantidad de oxígeno presente se debe al proceso degradativo de los residuos sólidos urbanos prevaleciendo la fase aeróbica en la descomposición. La zona que contiene mayor concentración de metano es la zona C, se caracteriza por poseer ocho años, presenta una mejor compactación ya que la maquina compactadora pasa varias veces y a altas velocidades en el terreno. Los resultados de la caracterización de biogás en las diferentes zonas del relleno sanitario se reflejan en la Tabla 4.

Tabla 4. Composición del Biogás del Relleno Sanitario de Ambato.

Zonas	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	CO (%)	N ₂ (%), O ₂ (%)	% Otros Gases (H ₂ , NH ₃ , H ₂ S)
A	0.7	0.8	1.1	25.2	0.0
B	0.2	0.3	0.4	0.0	0.0
C	15.7	14.5	0.0	62.1	0.3
D	0.4	1.1	0.0	90.8	7.8
E	9.9	8.2	0.6	40.6	0.0
F	1.5	6.2	2.8	41.9	5.8
G	8.2	6.8	0.3	41.0	0.7
H	9.3	10.0	2.1	50.6	4.8

En cuanto al poder calorífico, el biogás puede ser empleado como combustible, en la zona C el poder calorífico es de 14,000 (BTU/m³) pero mejorando la disposición y captación del biogás puede existir un aprovechamiento energético, figura 6 señala el poder calorífico de las diferentes zonas del relleno sanitario del Cantón Ambato.

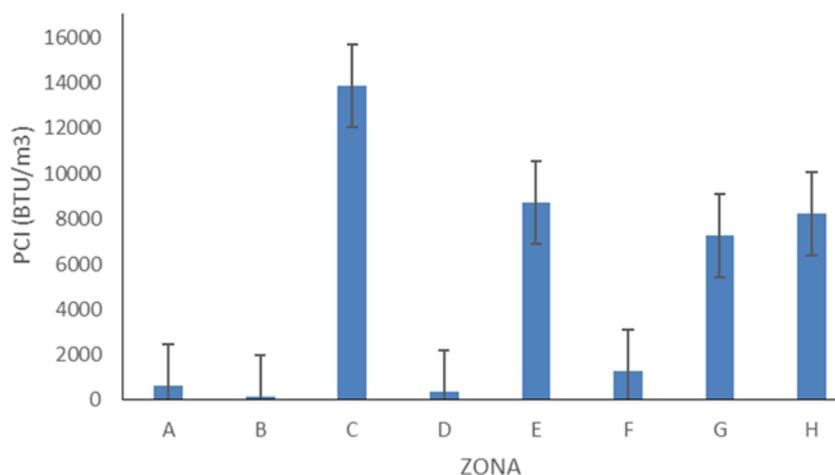


Figura 6. Poder Calorífico del Metano (PCI_{muestra}).

Finalmente, un análisis del estudio realizado sobre la disposición final de los RSU y generación de metano señala que las zonas A, B son las antiguas del relleno en el cual se presenta 8 chimeneas para la evacuación de biogás. El suelo presenta vegetación con contenido de materia orgánica (desechos enterrados de 4% y 1.5%), el contenido de metano es bajo (0.7% y 0.2%) y por ende, el poder calorífico es bajo, pH de 6 y 9 respectivamente y su humedad de 12 y 16%.

En las zonas C, D, E, F se ubican 33 chimeneas para la evacuación del biogás el suelo (desechos enterrados) con un biorreactor por lo que la digestión anaeróbica se encuentra en proceso. El contenido de metano en estas zonas es de 15.7%, 0.4%, 9.9%, 1.5% respectivamente (poder calorífico representativo), pH básico, el contenido de materia orgánica en los residuos enterrados es del 1.5%, y la humedad esta sobre el 10%.

Las zonas G, H son las zonas de trabajo en donde se entierra los desechos con material de cobertura se encuentran 56 chimeneas El contenido de metano de 8.2% y 9.3% respectivamente, el poder calorífico es de 7000 BTU/m³, la materia orgánica presente en los desechos enterrados es de 0.5%, la humedad del suelo del 15%, y posee un pH básico.

Conclusiones

El presente trabajo de investigación analiza la disposición de los residuos sólidos y generación de biogás en el relleno sanitario del Cantón de Ambato ubicado en Ecuador. El relleno sanitario del cantón Ambato posee un método tecnificado que se basa en cubrir la base del relleno con geomembrana, posee drenes para la evacuación del biogás y lixiviados, una zona de pesaje de los RSU, material de cobertura y maquinaria apropiada para la compactación de los residuos sólidos.

La composición de los RSU del cantón Ambato presenta una alta cantidad de desechos orgánicos (65%). La temperatura y humedad ambiental es constante en todo el relleno sanitario, cuya temperatura ambiente es de 19 °C y humedad del 97%. La caracterización promedia del Biogás del relleno de Ambato fue comparada con un biogás estándar y un biogás del relleno sanitario de Guayaquil (Las Iguanas), lo que permite concluir que la temperatura de digestión de los desechos debe ser considerada para el aprovechamiento del metano.

Guayaquil es una ciudad localizada en la costa a una temperatura de 24°C, y la cantidad de metano es del 54% al 70%. Las muestras fueron recolectadas al medio día ya que los valores de la mañana y noche, no fueron representativos. En las ocho zonas del relleno sanitario se realizaron los análisis y se concluye que:

- En las zonas A, B se recomienda plantear un programa de cierre técnico ya que posee vegetación en el área y los residuos ya culminan su proceso de degradación;
- En la zona C, D, E, F se recomienda ir mejorando la compactación y humedad del terreno, realizar un estudio de los microorganismos presentes en la descomposición de los residuos enterrados para priorizar la inoculación de microorganismo que cooperen en las reacciones metanogénicas e incrementar la temperatura de descomposición de los residuos enterrados;
- En la zonas G, H se recomienda mejorar el manejo técnico de los residuos para aprovechar al máximo la descomposición de los residuos, mejorar la compactación (pasar la compactadora sobre los desechos enterrados mayor cantidad de veces), humedecer el suelo e inocular microorganismos que permitan incrementar la producción de metano, mantener la temperatura del terreno en 30°C, y finalmente, evacuar el biogás y aprovecharlo energéticamente.

Adicionalmente se recomienda realizar estudios que permitan la inoculación de microorganismos psicotrofos, mesófilos, termotrofos o termófilos que mejoren las reacciones metanogénicas, además de adecuar de mejor manera la compactación del relleno y continuar con estudios sobre las condiciones de adaptación de los microorganismos y mejoramiento de aprovechamiento de biogás con fines energéticos.

Agradecimientos

La presente investigación agradece al Municipio de Ambato por permitir realizar el estudio y a todo su personal que coopera en la ejecución y desarrollo del relleno sanitario. Al laboratorio del Beaterio y refinería de esmeraldas por las facilidades de los laboratorios para realizar los experimentos y a la Facultad de Ingeniería Química por la asesoría en el estudio. Al relleno Sanitario Las Iguanas de Guayaquil por su apoyo en la ejecución del estudio.

Referencias bibliográficas

- Aguilera, E. A. R. (2016) Producción de biogas a partir de Biomasa. *Revista Científica de FAREM-Esteli*, (17), 11–22.
- Alavi, N., Goudarzi, G., Babaei, A. A., Jaafarzadeh, N., Hosseinzadeh, M. (2013). Municipal solid waste landfill site selection with geographic information systems and analytical hierarchy process: a case study in Mahshahr County, Iran. *Waste Management & Research*, **31**(1), 98–105.
- Ambiente, M. D. (2017) Programa PNGIDS Ecuador. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.ec/programa-pngids-ecuador/>
- Amini, H. R., Reinhart, D. R., Niskanen, A. (2013) Comparison of first-order-decay modeled and actual field measured municipal solid waste landfill methane data. *Waste Management*, **33**(12), 2720–2728.
- D-Weste (2013) *Waste Atlas Report 2013*, Environmental Consultant Ltd., 44 pp. ISSN: 2241 – 2484. Disponible en: <http://www.atlas.d-waste.com/Documents/WASTE%20ATLAS%202013%20REPORT.pdf>
- Barragán, E. A., Arias, P. D., Terrados, J. (2016). Fomento del metabolismo energético circular mediante generación eléctrica proveniente de rellenos sanitarios: estudio de caso, Cuenca, Ecuador. *Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología*, (16), 36–42.
- Blaya, S. N., García, G. N. (2003). *Química agrícola: el suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal*. Mundi-Prensa Libros.
- Cala, O. M., Meriño, L., Kafarov, V., Saavedra, J. (2013). Efecto de la composición del gas de refinería sobre las características del proceso de combustión. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, **12**(23), 101–112.
- Chassaigne, G., Pinto, G. (2017). Determinación de parámetros referenciales de CO₂ y CH₄, en relleno sanitario la paraguaita. *Revista Agrollania de Ciencia y Tecnología*, **6**, 103–107.
- Corrales, L. C., Romero, D. M. A., Macías, J. A. B., Vargas, A. M. C. (2015) Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta. *Nova*, **13**(24), 55–82.
- Dace, E., Blumberga, D., Kuplais, G., Bozko, L., Khabdullina, Z., Khabdullin, A. (2015) Optimization of landfill gas use in municipal solid waste landfills in Latvia. *Energy Procedia*, **72**, 293–299.
- Dixit, R., Malaviya, D., Pandiyan, K., Singh, U.B., Sahu, A., Shukla, R., Singh, B.P., Rai, J.P., Sharma, P.K., Lade, H., Paul, D. (2015) Bioremediation of Heavy Metals from Soil and Aquatic Environment: An Overview of Principles and Criteria of Fundamental Processes. *Sustainability*. doi: <https://doi.org/10.3390/su7022189>
- Farquhar, G. J., Rovers, F. A. (1973) Gas production during refuse decomposition. *Water, Air, and Soil Pollution*, **2**(4), 483–495.
- Flechas, S. H., González, L. R. C. (2016). Reflexiones sobre la importancia económica y ambiental del manejo de residuos en el siglo XXI. *Revista de Tecnología*, **15**(1), 57–76.
- García, A. I. L., Vargas, J. P., Altabella, J. E., Mendoza, F. J. C. (2018) Evaluación de los cambios en los residuos sólidos urbanos en un vertedero durante el proceso de biodegradación. *Jóvenes En La Ciencia*, **3**, 315–320.
- Greenpeace, A. (2004) Resumen de los impactos ambientales y sobre la salud de los rellenos sanitarios. *Mayo De*.
- Hernández-Berriel, M., Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P., Lima-Morra, R., Eljaiek-Urzola, M., Márquez-Benavides, L., Buenrostro-Delgado, O. (2016) Generación y composición de los residuos sólidos urbanos en América Latina y El Caribe. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, **32**, 11–22.
- Hoornweg, D., Bhada-Tata, P. (2012) What a waste: a global review of solid waste management.
- Köfalusi, G. K., Aguilar, G. E. (2006) Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final. *Gaceta Ecológica*, (79), 39–51.

- Lindao, D., Quisnancela, E. (2015) Aprovechamiento y potencial energético de los desechos sólidos urbanos generados en el cantón Guayaquil. In *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, **10**, 95–101.
- López Fabara, L. D. (2011) Diagnóstico caracterización y propuesta de tratamiento de los lixiviados generados en el relleno sanitario de la ciudad de Ambato, Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/3952>
- Mejía, C. A. Z., Gil, V. H. G. (2015) Análisis de la producción de lixiviado y biogás bajo condiciones de extracción activa. *Ingenium Revista de La Facultad de Ingeniería*, **16**(31), 9–23.
- Orobio, P., Alexis, B. (2014) Producción de metano a partir de la digestión anaerobia de biorresiduos de origen municipal.
- Pancho- Echeverría, F. J. (2015) Optimización del relleno sanitario mediante el aprovechamiento del biogas, en el cantón Guayaquil. Bachelor's thesis, Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial, Ecuador.
- Santibañez-Aguilar, J. E., Martínez-Gómez, J., Ponce-Ortega, J. M., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., González-Campos, J. B., El-Halwagi, M. M. (2015) Optimal planning for the reuse of municipal solid waste considering economic, environmental, and safety objectives. *AIChE Journal*, **61**(6), 1881–1899. doi: <https://doi.org/10.1002/aic.14785>
- Scharff, H. (2014) Landfill reduction experience in The Netherlands. *Waste Management*, **34**(11), 2218–2224. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.05.019>
- Soliz, M. F. (2015). Ecología política y geografía crítica de la basura en el Ecuador. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (17), 4–28.
- Windows, M., Corporation, M., Hori, K., Sakajiri, A. (2019) *Waste Atlas*. Retrieved from: <http://www.atlas.d-waste.com/>
- Yang, L., Chen, Z., Zhang, X., Liu, Y., Xie, Y. (2015) Comparison study of landfill gas emissions from subtropical landfill with various phases: A case study in Wuhan, China. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **65**(8), 980–986.
- Zúñiga, M. E. G., Recalde, M. F. S., Fuentes, J. A. P. (2015) La producción de biogás por degradación de abono orgánico como alternativa de energía en Ecuador. *Revista DELOS Desarrollo Local Sostenible*, **1988**, 5245.