

# Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia<sup>1</sup>

## Landfill biogas emission, a case study: Colombia

## Estimação de biogás do aterro sanitário, caso de estudo: Colômbia

A. Andrade, A. Restrepo y J. E Tibaquirá

Recibido: mayo 12 de 2017 - Aceptado: enero 15 de 2018

**Resumen**— Este artículo presenta la evaluación del modelo colombiano de biogás aprobado por la Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos- US-EPA, evaluado en varias ciudades del país, con el objetivo de estimar el potencial de generación de biogás proveniente de diferentes rellenos sanitarios. Expone las condiciones para implementar el modelo y lo compara con resultados experimentales para el caso del relleno sanitario La Glorita de la ciudad de Pereira. De acuerdo con los resultados, se ofrecen algunas alternativas para su utilización.

**Palabras clave**—Relleno sanitario, biogás, modelo colombiano de biogás, residuos sólidos urbanos.

**Abstract**— This study presents the landfill biogas Colombia model approved by the United States Environmental Protection Agency and applied to Colombian case. The main objective was to estimate the biogas potential generation from Municipal Solid Waste- MSW from different landfills in Colombia. This

paper shows the theoretical results and compared to empirical results obtained from La Glorita Landfill, from Pereira-Colombia. Finally, based on the results, the study presents some choices to use it.

**Keywords**—Biogas, landfill gas Colombian model, municipal solid waste-MSW, Waste to energy-WtE.

**Resumo**— Neste artigo é apresentada a avaliação do modelo Colombiano do biogás aprovado pela Agência de proteção ambiental dos Estados Unidos- US-EPA, e avaliado em algumas cidades do país. O objetivo é estimar o potencial de geração de biogás captado de diferentes aterros sanitários. The estudo apresenta as condições para usar o modelo e compara com resultados experimentais para o caso do aterro La Glorita da cidade Pereira- Colômbia. De acordo com os resultados, se oferecem algumas alternativas para sua utilização.

**Palavras chave**— Aterro sanitário, biogás, modelo colombiano de biogás, resíduos sólidos urbanos.

### I. INTRODUCCIÓN

COLOMBIA está localizada en el noreste de sur América, rodeada por el mar Caribe, el océano Pacífico, Panamá, Venezuela, Ecuador, Perú, y Brasil. Cuenta con un área aproximada de 1,1 millones de kilómetros cuadrados y una población cercana a 48 millones de habitantes, según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE.

Colombia es la cuarta economía de América Latina con una tasa de crecimiento alrededor del 4%; produce café, flores, frutas, esmeraldas, carbón, minerales y petróleo. Sus principales actividades económicas son la producción de combustibles derivados del petróleo, la agricultura, la industria y los servicios. Debido a la variedad de pisos térmicos, algunas condiciones como la temperatura y la pluviosidad dependen de la altitud de cada ciudad respecto al nivel del mar [2]-[3]. La Tabla I muestra la generación de residuos sólidos urbanos-RSU en Colombia en los últimos años. La tasa de crecimiento de RSU está entre el 4 y el 8%, de los cuales entre el 50 y 60% son orgánicos.

<sup>1</sup>Este trabajo es producto del proyecto de investigación “Aprovechamiento energético del biogás obtenido por captación directa del vertedero La Glorita, Pereira- Colombia- código 8-15-4”, vinculado a la Vicerrectoría de Investigación, Innovación y Extensión de la Universidad Tecnológica de Pereira.

A. Andrade, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, email: aaandrade@utp.edu.co.

A. Restrepo, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, email: arestre@utp.edu.co.

J. E Tibaquirá, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia, email: juantiba@utp.edu.co.

**Como citar este artículo:** Andrade, A., Restrepo, A. y Tibaquirá, J. E. Estimación de biogás de relleno sanitario, caso de estudio: Colombia, Entre Ciencia e Ingeniería, vol. 12, no. 23, pp. 40-47, enero - junio, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.31908/19098367.3701>



En Colombia el sistema de disposición final predominante es la técnica de vertido en rellenos sanitarios (también llamados vertederos), con una participación del 81%. En la Fig. 1 se muestran los sistemas de disposición final en Colombia. Aún existe un gran porcentaje en botaderos y otras técnicas no controladas, contrariando las teorías de buenas prácticas en administración, gestión y manejo de RSU [5]-[6].

TABLA I  
CANTIDAD TOTAL DE RSU EN COLOMBIA [4].

| AÑO  | RSU (Ton/día) |
|------|---------------|
| 2010 | 26 537        |
| 2011 | 24 647        |
| 2012 | 26 726        |
| 2013 | 25 054        |
| 2014 | 26 528        |

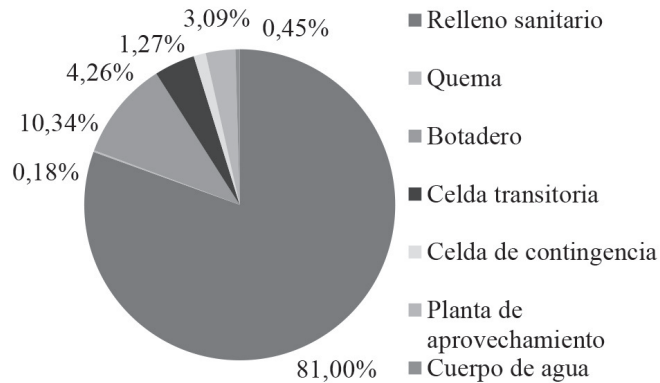


Fig. 1. Sistemas de disposición final en Colombia [4].

Los RSU en Colombia están compuestos en su mayoría por residuos orgánicos provenientes de alimentos y podas. La caracterización de los RSU se muestra en la Fig. 2 [3]. La política para la gestión de los residuos sólidos tiene su fundamento en la Constitución Política de Colombia, la Ley 99 de 1993 y la Ley 142 de 1994, siendo reglamentadas por los decretos 1713 de 2002, el 2820 de 2010 y las Resoluciones del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial 1045 de 2003, 838 de 2005, 1390 de septiembre 27 de 2005, modificada por la resolución 1684 de 2008, y esta por la 1529 de 2010. [3]- [7].

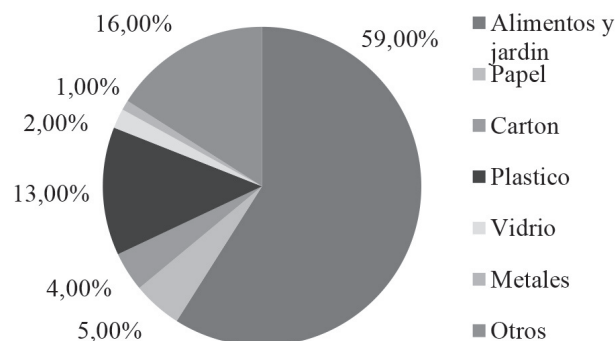


Fig. 2. Caracterización RSU [3].

La caracterización elemental de los RSU es presentada por Laura Meraz y Richard Niessen, la cual se observa en la Tabla II [8].

TABLA II  
COMPOSICIÓN ELEMENTAL RSU COLOMBIA [8]

| Residuo   | %H <sub>2</sub> O | % C  | %H  | %O   | %N  | %S  | %ASH |
|-----------|-------------------|------|-----|------|-----|-----|------|
| Alimentos | 70,0              | 48,0 | 6,4 | 37,6 | 2,6 | 0,4 | 5,0  |
| Papel     | 6,0               | 43,5 | 6,0 | 44,0 | 0,3 | 0,2 | 6,0  |
| Plástico  | 2,0               | 60,0 | 7,2 | 22,8 | 0,0 | 0,0 | 10,0 |
| Textiles  | 10,0              | 55,0 | 6,6 | 31,2 | 4,6 | 0,2 | 2,5  |
| Maderas   | 20,0              | 49,5 | 6,0 | 42,7 | 0,2 | 0,1 | 1,5  |
| Podas     | 60,0              | 47,8 | 6,0 | 38,0 | 3,4 | 0,3 | 4,5  |

## II. ESTIMACIÓN TEÓRICA DE BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO

El biogás es un gas combustible que se genera por la descomposición microbológica de la materia orgánica en un proceso natural que tiene lugar en un entorno húmedo y anaeróbico. A este proceso de descomposición se le denomina digestión anaeróbica [9]. En cada una de las etapas de descomposición anaeróbica actúan distintas bacterias, estas transforman la materia orgánica en diferentes compuestos como azúcares, ácidos grasos, ácido acético, hasta llegar a un producto final como el metano [10].

La digestión anaeróbica convierte los compuestos complejos en compuestos simples, dando como resultado final la liberación de una mezcla de gases. La tabla III muestra la composición promedio de biogás de relleno sanitario [10].

TABLA III  
COMPOSICIÓN QUÍMICA PROMEDIO DEL BIOGÁS [10].

| Componente                    | Composición promedio (%) |
|-------------------------------|--------------------------|
| Metano ( $CH_4$ )             | 50                       |
| Dióxido de carbono ( $CO_2$ ) | 40                       |
| Nitrógeno ( $N_2$ )           | 5                        |
| Ácido sulfúrico ( $H_2S$ )    | <1                       |
| Otros                         | 2700 ppm                 |

En algunos rellenos sanitarios modernos se captura y utiliza el biogás de vertedero, un recurso de energía renovable, para producir calor o electricidad [11]-[12]. El potencial estimado de emisiones de gas metano en los vertederos a nivel mundial se muestra en la Tabla IV [11]. En el año 2010, alrededor de mil vertederos capturaban biogás de vertedero en todo el mundo, la mayoría de ellos se encuentran en los Estados Unidos, Alemania y Reino Unido [13]-[14].

TABLA IV  
EMISIONES DE METANO A NIVEL MUNDIAL [11].

| Continente             | Residuos<br>(10 <sup>6</sup> t/año) | Emisiones CH <sub>4</sub><br>(10 <sup>9</sup> kg/año) | Emisiones CH <sub>4</sub><br>(10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> N/año) |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| África                 | 78                                  | 1,7                                                   | 106                                                                 |
| Asia                   | 390                                 | 5,2                                                   | 325                                                                 |
| Europa                 | 230                                 | 6,2                                                   | 388                                                                 |
| América                | 390                                 | 20                                                    | 1250                                                                |
| Australia y<br>Oceanía | 14                                  | 0,5                                                   | 31                                                                  |
| Total                  | 1102                                | 34                                                    | 2125                                                                |

Los estudios teóricos y experimentales indican que la biodegradación anaeróbica completa de los RSU genera cerca de 200 Nm<sup>3</sup> de metano por tonelada seca de biomasa contenida. Sin embargo, la tasa de generación de metano reportada en los reactores anaeróbicos industriales oscila entre 40 a 80 Nm<sup>3</sup> por tonelada de residuos orgánicos [10]-[15].

#### A. Modelo Colombiano de biogás

El Modelo está basado en una ecuación de degradación de primer orden. Este modelo requiere que el usuario ingrese datos específicos tales como el año de apertura, año de clausura, índices de disposición anual, ubicación del sitio y seleccionar algunas opciones referentes a las condiciones del relleno sanitario.

El modelo provee automáticamente valores para el índice de generación de metano ( $k$ ) y la generación Colombia potencial de metano ( $LRR_0$ ) para cada uno de los 33 departamentos en Colombia, estima la eficiencia de captura con base en las respuestas proveídas [16]. El modelo se presenta en la ecuación (1).

$$Q_{LFG} = \sum_{t=1}^n \sum_{j=0,1}^1 2kL_0 \left[ \frac{M_i}{10} \right] (e^{-kt_{ij}}) (MCF)(F) \quad (1)$$

Donde:

$Q_{LFG}$ : Flujo de biogás máximo esperado (m<sup>3</sup>/año);

$i$ : Incremento en tiempo de 1 año;

$n$ : (año del cálculo)-(año inicial de disposición de residuos);

$j$ : Incremento de tiempo en 0.1 años;

$k$ : Índice de generación de metano (1/año);

$L_0$ : Generación potencial de metano (m<sup>3</sup>/Mg);

$M_i$ : Masa de residuos dispuestos en el año  $i$  (Mg);

$t_{ij}$ : Edad de la sección  $j$  de la masa  $M_i$  en el año  $i$ ;

$MCF$ : Factor de corrección de metano;

$F$ : Factor de ajuste por incendios.

Los valores de  $k$  y  $L_0$  se desarrollaron usando datos específicos de clima, caracterización de residuos y prácticas de disposición de residuos de Colombia, y estima el efecto de estas condiciones en las cantidades e índices de generación de biogás. También se evaluó la información de

recuperación de biogás actual en dos rellenos sanitarios en Colombia, para ayudarnos en la selección de los valores de  $k$  y  $L_0$ . El Modelo fue desarrollado con el objetivo de proveer proyecciones de generación y recuperación de biogás más exactas y conservadoras. Otros modelos evaluados durante el proceso de desarrollo incluyen: El Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 y el Modelo de Residuos 2006 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). El Modelo también incorpora la estructura del Modelo IPCC con algunas revisiones para que refleje de mejor forma las condiciones del clima y condiciones de los sitios en Colombia.

El modelo colombiano de biogás estima el índice de generación de biogás para cada año usando la ecuación de degradación de primer grado, la cual fue modificada por US EPA en el Modelo LandGEM versión 3.02 en el 2005. El modelo aplica ecuaciones separadas para calcular la generación de cada uno de los cuatro grupos de residuos orgánicos agrupados de acuerdo con su índice de degradación.

El modelo utiliza información para proyectar los índices de humedad para cada una de las 5 regiones climáticas, basado en la precipitación anual media en Colombia. Estas son:

- Seco (precipitación <500 mm/año).
- Moderadamente seco (precipitación 500-999 mm/año).
- Moderadamente húmedo (precipitación 1000-1499 mm/año).
- Húmedo (precipitación 1500-1999 mm/año),
- Excesivamente Húmedo (precipitación > 2000 mm/año).

La generación de biogás total para todos los residuos se calcula como la suma de las cantidades de generación de biogás de cada una de las cuatro categorías de residuos. Los resultados presentados de la Fig.3 a la Fig.6, muestran la evaluación del modelo colombiano de biogás aplicado a algunos rellenos sanitarios del país.

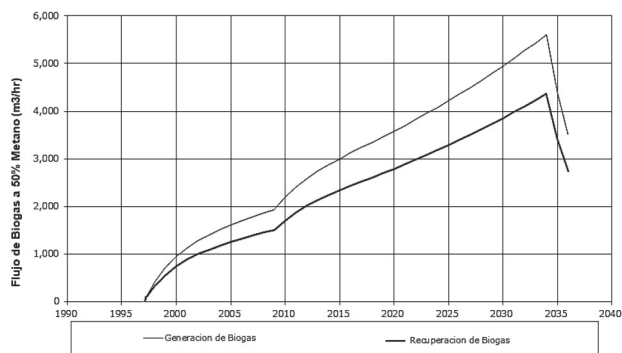


Fig. 3. Generación de biogás relleno sanitario La Gloria, Pereira, Colombia.

### III. ESTIMACIÓN EXPERIMENTAL DE BIOGÁS DE RELLENO SANITARIO

Conocer la composición del biogás captado del vertedero es de gran utilidad, ya que el biogás es una mezcla de gases constituida fundamentalmente por gas metano y dióxido de carbono, el cual disminuye el poder calorífico del biogás. Las variables a medir son:

- Poder Calorífico Inferior (PCI) del biogás, a partir del contenido en metano.

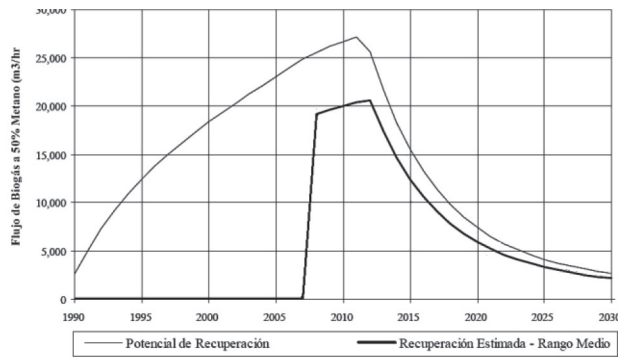


Fig. 4. Generación de biogás relleno sanitario Doña Juana, Bogotá, Colombia [16].

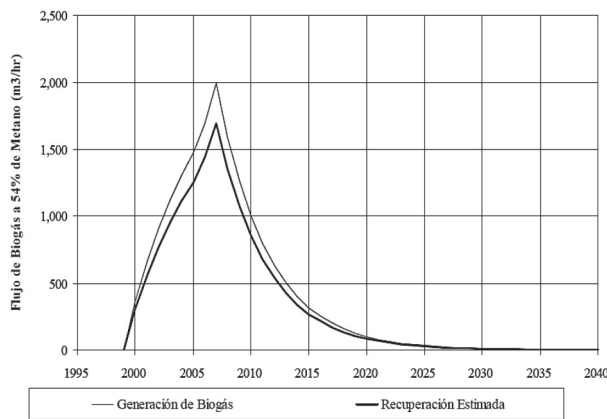


Fig. 5. Generación de biogás relleno sanitario Don Juanito, Villavicencio, Colombia [17].

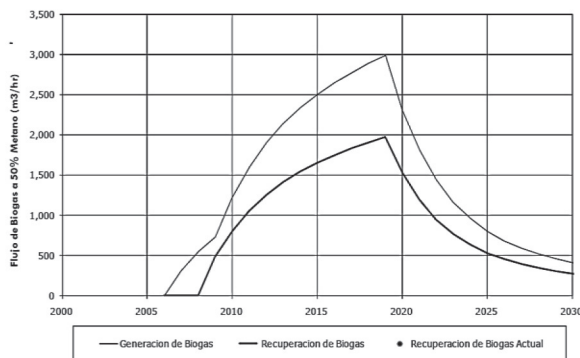


Fig. 6. Generación de biogás relleno sanitario Antanas, Pasto, Colombia [18].

- Entrada de aire en el vertedero al someter los pozos a presiones relativas negativas.
- Nivel de humedad en el biogás.
- Presencia de compuestos corrosivos.
- Presencia de compuestos tóxicos para la salud.

Dada la composición heterogénea de los RSU, la distribución de RSU en el relleno sanitario, la colonización de microorganismos, la presencia de lixiviados y otras variables, la composición del biogás varía de un punto a otro en el relleno. Por eso, es necesario realizar análisis de muestras en distintos puntos del relleno sanitario, durante un periodo de tiempo considerable para evitar errores inducidos en la toma de datos. Los equipos portátiles de

análisis determinan las concentraciones de metano, dióxido de carbono y oxígeno (obteniéndose el nivel de nitrógeno por diferencia).

Normalmente tienen una precisión de  $\pm 1\%$  volumen de gas seco. La técnica empleada por los equipos portátiles para la medición de las trazas de gases, es la técnica de los rayos infrarrojos ya que el metano y el dióxido de carbono son gases que absorben la luz infrarroja.

Para la detección de oxígeno, normalmente se utilizan detectores que aprovechan sus propiedades paramagnéticas. Finalmente, el nitrógeno se calcula por la diferencia estequiométrica. Para comparar las mediciones de campo con las del laboratorio, la técnica más utilizada es la cromatografía gaseosa.

#### IV. RESULTADOS MEDICIONES LA GLORITA

En las zonas de disposición de los RSU, las chimeneas se conforman con una parte central de tubería PVC de 4 pulgadas de diámetro, perforadas y rodeadas con piedras retenidas con malla de acero, similar a la que se presenta en la Fig. 7 [17].

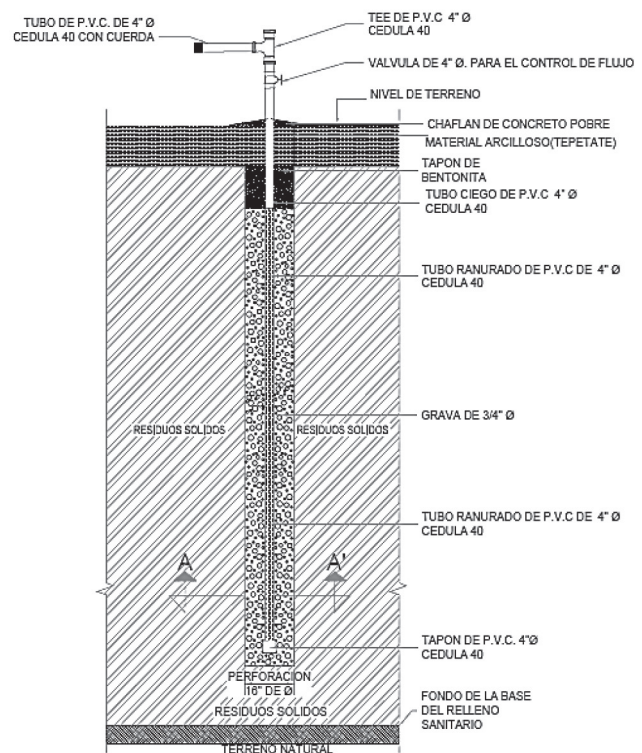


Fig. 7. Pozo de extracción de biogás de vertedero [17].

Las mediciones fueron realizadas por la empresa SINGEP S.A.S como contratistas de la empresa ATESA de Occidente S.A.E.S.P, encargada de operar el relleno sanitario La Glorita de la ciudad de Pereira. Además de las mediciones en las chimeneas de extracción de biogás, se realizó la medición del límite de explosividad de metano en sitios abiertos como el taller, el área administrativa y el punto de encuentro. La Fig. 8. muestra la fotografía del pozo de captación de biogás.

El instrumento utilizado fue un analizador de gases tipo GEM5000, como se aprecia en la Fig. 9. Las mediciones se realizaron en cada pozo durante 30 segundos o, en su defecto, el tiempo que tardara el instrumento hasta que estabilizara la medición. Los tiempos de medición del caudal de biogás fueron hasta de 3 minutos, para lo cual se utilizó tubing flexible equipado con filtros de agua para atrapar el material particulado al interior del pozo. [19]

Para las mediciones del flujo de biogás, se usó un velocímetro de aire marca VelociCheck Modelo 8330, el cual mide la velocidad y temperatura del aire. La Fig. 10 presenta el resumen de emisiones de biogás del relleno sanitario La Glorita de la ciudad de Pereira, Colombia [19].



Fig. 8. Fotografía de un pozo de biogás de relleno sanitario.



Fig. 9. Equipo utilizado para la medición del biogás [19].

En la Fig. 11 se presentan los resultados de la simulación de dispersión del biogás. Para realizar esta modelación se tomaron los resultados obtenidos en cada una de las chimeneas y los datos de georreferenciación de las mismas, utilizando el software Surfer10®, el cual interpola utilizando el método de Krigeaje. Se obtuvieron los mapas de isoplethas (líneas de igual concentración). [19]

Para un correcto análisis de los mapas, es importante explicar que los colores rojo y negro obedecen a las zonas de mayores concentraciones, mientras que el color verde corresponde a las zonas de menores concentraciones. El área más oscura, ubicada en la parte inferior derecha de la Fig. 11, corresponde al vaso 6. Dado que en este punto se está

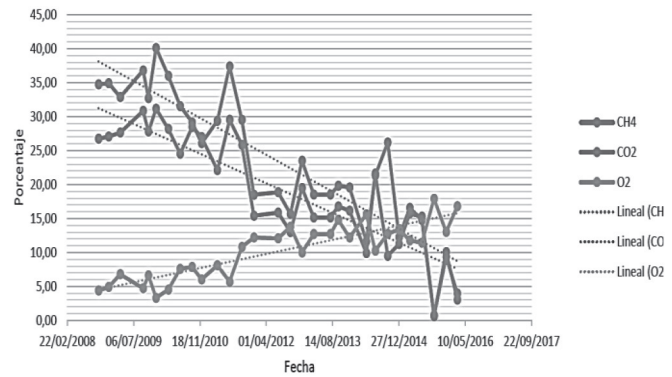


Fig. 10. Resumen emisiones vaso 6, relleno La Glorita [19].

realizando la disposición de los residuos, se reporta el mayor porcentaje promedio de  $\text{CH}_4$ . Esto se considera normal. El vaso 5 está ubicado en la parte inferior derecha de la Fig. 11 y el color oscuro se explica por un solo ducto que presentó emisiones altas. [19]

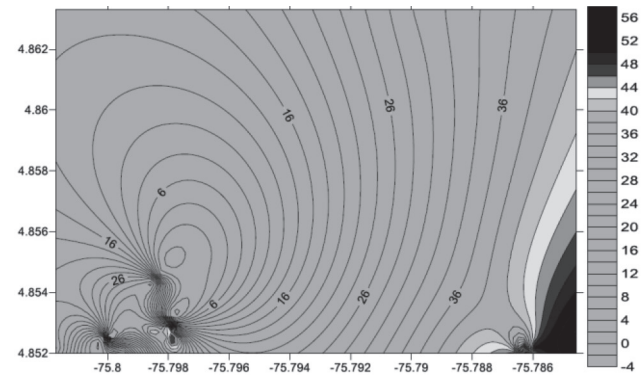


Fig. 11. Resultados simulación de dispersión de biogás relleno sanitario La Glorita [19].

La Fig. 12 muestra la cantidad de oxígeno presente en la celda 6; esto se debe a que la celda 6 todavía no está clausurada y no se ha aislado del medio ambiente. La presencia del oxígeno en esta zona propicia la degradación aeróbica de la materia generando composta y por ello se nota la ausencia de biogás en esta zona de la celda.

Los resultados promedio de las mediciones se presentan en la tabla V[19].

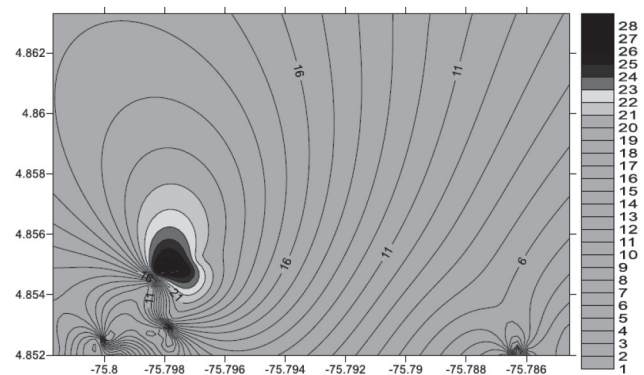


Fig. 12. Resultados simulación de dispersión de oxígeno relleno sanitario La Glorita [19].

TABLA V  
CONDICIONES FAVORABLES CAPTURA DE BIOGÁS [19].

| Especie          | Media (%) | Ideal (filtrado) (%) |
|------------------|-----------|----------------------|
| CH <sub>4</sub>  | 53,7      | >90                  |
| CO <sub>2</sub>  | 41,7      | <5                   |
| O <sub>2</sub>   | 4,4       | <1                   |
| CO               | 0,03      | <0,1                 |
| H <sub>2</sub> S | 0,0004    | <0,1                 |

#### V. DETERMINACIÓN DEL PODER CALORÍFICO DEL BIOGÁS CAPTADO

Según los resultados obtenidos experimentalmente presentados en la Tabla V, se procede a calcular el poder calorífico mediante balance estequiométrico y el cálculo de las entalpías de combustión presentado en la ecuación (2).

$$\begin{aligned}\Delta H_c &= \bar{h}_{f,R} - \bar{h}_{f,P} = PCI \\ &= \sum_{j=1}^m n_{j,R} \cdot \bar{h}_{f,Rj}^o \\ &\quad - \sum_{j=1}^m n_{j,P} \cdot \bar{h}_{f,Pj}^o\end{aligned}\quad (2)$$

La simulación de combustión se realizó usando el software GASEQ, la condición usada fue temperatura de llama adiabática a presión constante. La temperatura de los gases de entrada fue de 300 K y la presión 1 atm. Los resultados de la simulación se muestran en la Tabla VI.

TABLA VI  
RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE COMBUSTIÓN DE BIOGÁS DEL RELLENO SANITARIO LA GLORITA

| Reactantes                  |       | Productos        |       |
|-----------------------------|-------|------------------|-------|
| Especie                     | Moles | Especie          | Moles |
| CH <sub>4</sub>             | 0,54  | N <sub>2</sub>   | 4,54  |
| CO <sub>2</sub>             | 0,42  | H <sub>2</sub> O | 1,07  |
| O <sub>2</sub>              | 0,044 | CO <sub>2</sub>  | 0,95  |
| CO                          | 0,003 | CO <sub>2</sub>  | 0,006 |
| H <sub>2</sub> S            | 0,0   | O <sub>2</sub>   | 0,183 |
| Air                         | 5,83  | NO               | 0,017 |
| Coeficiente estequiométrico |       | 0,85             |       |

Reduciendo la expresión a lo presentado en la ecuación (3).

$$\begin{aligned}PCI &= \left[ 0,54\bar{h}_{f,CH_4}^o + 0,421\bar{h}_{f,CO_2}^o + 0,003\bar{h}_{f,CO}^o \right] \\ &\quad - \left[ 0,95\bar{h}_{f,CO_2}^o + 1,07\bar{h}_{f,H_2O}^o \right. \\ &\quad \left. + 0,006\bar{h}_{f,CO}^o \right]\end{aligned}$$

Resolviendo la ecuación 3, se obtiene el PCI.

$$PCI = 428,2015 \left[ \frac{MJ}{kmol} \right]$$

$$PCI = 15,86 \left[ \frac{MJ}{kg} \right]$$

La temperatura de llama adiabática ( $T_{ad}$ ) es:

$$T_{ad} = 1972,7 [K]$$

Siguiendo la metodología planteada por [17] mediante filtración y purificación de metano al 90%, como se presenta en la Tabla V (ideal), y utilizando las mismas condiciones de simulación planteadas para la simulación anterior, se recalcula el poder calorífico del combustible. Se asume un contenido de humedad en el biogás equivalente a 5%. El poder calorífico del biogás filtrado y enriquecido es:

$$PCI = 40,85 \left[ \frac{MJ}{kg} \right]$$

Calculando nuevamente la temperatura de llama adiabática en el caso donde el biogás es refinado y enriquecido, se obtiene que:

$$T_{ad} = 2053,1 [K]$$

Como se observa, utilizando la metodología presentada por [20] se puede obtener un aumento significativo del poder calorífico.

#### VI. APLICACIONES DEL BIOGÁS CAPTADO DEL RELLENO SANITARIO LA GLORITA

De acuerdo con la calidad del biogás purificado, se puede utilizar como gas combustible principalmente en:

##### A. Combustible de PCI mediano (aprox. 50% metano)

Es utilizado directamente (o con bajo grado de purificación y filtrado) en usos comerciales e industriales. Las aplicaciones van desde calentadores de agua, hornos, calderas, invernaderos, secadores de agregados y evaporación de lixiviados, siendo esta última técnica una alternativa para el tratamiento de aguas residuales, con reducción de costos.

##### B. Combustible enriquecido- PCI alto (90 a 99% de metano)

Siguiendo los procesos de purificación y filtrado, el biogás es purificado con concentraciones de metano superiores al 90%, el cual puede ser utilizado como alternativa al gas natural. Las alternativas de utilización van desde aplicaciones residenciales, industriales y transporte, hasta la generación de electricidad mediante la implementación en motogeneradores, para después ser suministrada a la red eléctrica. También puede ser utilizado en turbinas y microturbinas de gas y ciclos de potencia térmica en ciclos combinados. En general, el biogás captado del relleno sanitario puede ser utilizado según su uso en:

##### Uso directo

- Calderas
- Térmico y cogeneración
- Evaporación de lixiviados, secado de lodos.

##### Generación de electricidad

- Aplicaciones de motogeneradores (MCI)
- Turbinas de Gas
- Ciclo Brayton

- Micro Turbinas
- Cofiring
- Combustible de alimentación ciclo Rankine.

#### Combustible enriquecido

- Inyección gasoductos
- Combustible para vehículos de transporte.

En esta investigación, se seleccionó profundizar en aplicaciones de motogeneradores para generación de electricidad mediante motores reciprocantes de combustión interna. El diagrama de flujo del proyecto diseñado se muestra en la Fig. 13.

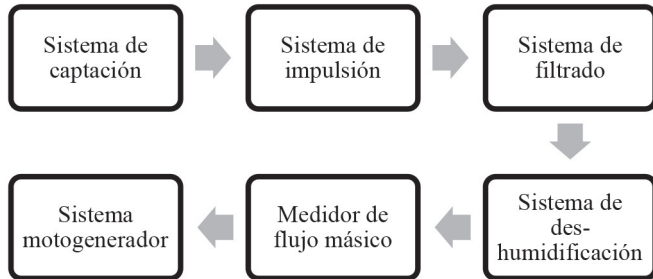


Fig. 13. Diagrama de flujo para el aprovechamiento de biogás en motogeneradores.

Para el sistema de purificación se propone usar un banco de pruebas a escala, diseñado por los autores en convenio con la Universidad Federal de Santa Catarina- Brasil, el cual consisten en usar por lo menos dos filtros de carbono activado y dos filtros de óxido ferroso, con el fin de limpiar las impurezas presentes en el biogás y evitar posibles daños en el sistema motogenerador. Este banco de purificación es una alternativa de bajo costo en comparación con la metodología propuesta por [20]. La Fig. 14 muestra el diseño en CAD propuesto.

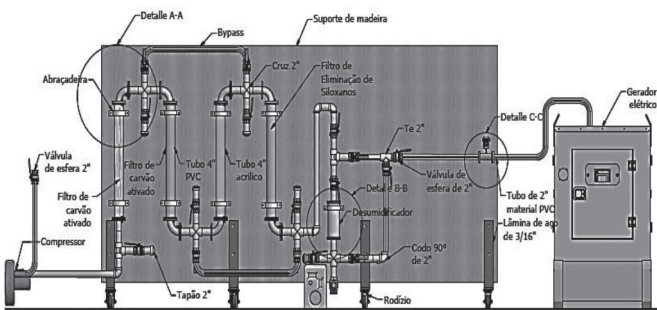


Fig. 14. Diseño en CAD del sistema de purificación y filtrado de biogás de relleno sanitario.

La potencia eléctrica fue estimada mediante la ecuación:

Donde

$$AE = CLB \cdot LHV \cdot \frac{1}{HR} \cdot (1 - PL) \cdot AF \quad (8)$$

AE: Electricidad anual generada (kWh)

CLB: Volumen de biogás captado del relleno sanitario (m³/año)

LHV: Poder calorífico inferior del biogás captado (MJ/m³)

HR: Cantidad de calor utilizado por el motor de combustión interna para generar un kilovatio hora de electricidad, los rangos están entre 9,5 y 12,5 (MJ/kWh)

PL: Carga parásita: cantidad de electricidad utilizada por el compresor y otros elementos empleados en el sistema de generación, normalmente están entre 0,04 a 0,08.

AF: Eficiencia del motor, normalmente se asume entre 0,92 y 0,96, de acuerdo con el equipo seleccionado y el mantenimiento.

## VII. CONCLUSIONES

A partir de la revisión bibliográfica y el estado del arte, se concluye que los modelos ampliamente utilizados son el modelo US-EPA y el del *Intergovernmental Panel on Climate Change* IPCC. Se seleccionó el modelo colombiano de biogás, el cual está aprobado por la US-EPA, y en su funcionamiento permite tener en cuenta diferentes regiones del país, en las cuales varían los pisos térmicos y los niveles de pluviosidad. Los resultados obtenidos indican que el biogás generado en el relleno sanitario La Glorita es ,

5500  $\left[\frac{m^3}{hora}\right]$ , proyectando una eficiencia de recuperación del 77% equivalente a 4235  $\left[\frac{m^3}{hora}\right]$  máximos hasta el año 2033.

Los modelos teóricos evaluados fueron comparados con mediciones experimentales realizadas en el relleno sanitario, arrojando como resultado una generación de biogás significativa en las celdas 5 y 6. Según los resultados obtenidos, la celda 6 es la que mayor proporción de metano actualmente genera, ya que es la que se encuentra activa. Esto tiene sentido si se analiza que la mayor proporción de residuos orgánicos provienen de alimentos en descomposición, los cuales son rápidamente degradables.

La tasa de generación de biogás en las demás celdas es mucho menor en comparación con la celda 6, porque fueron cerradas hace mucho tiempo y los pozos de captación de biogás se dejaron abiertos a la atmósfera, lo que implica que el biogás generado migró rápidamente a la atmósfera, aumentando la problemática del calentamiento global. En general, las medidas de la celda 6 indican que el biogás allí generado tiene una composición de 53,75% metano y 41,79 dióxido de carbono, valores aproximados a lo que reporta la literatura.

La estimación del poder calorífico del biogás proveniente del relleno sanitario La Glorita se calculó mediante las correlaciones de Boie, Wilson y Laura Meratz, ya que el contenido de carbono no proviene de residuos orgánicos sino del dióxido de carbono, el cual no contribuye de ninguna forma como gas combustible. Por tal razón, se procedió a realizar equilibrio químico utilizando el software GASEQ y despejando las entalpías de los reactantes y los productos, dando como resultado un poder calorífico inferior de 15,86  $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$  (sin purificar) y 40,85  $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$  con el biogás refinado según [17] teniendo en cuenta un exceso de aire del 15%. Asimismo, los resultados arrojan una capacidad máxima instalada de 60 000 MWh/año, respectivamente.

Según los resultados obtenidos, se concluye que

Colombia tiene el potencial para generar electricidad como energía renovable a partir del biogás captado de relleno sanitario.

Para futuras investigaciones, se propone comparar las mediciones de potencia eléctrica generada en moto generadores de combustión interna alimentados por biogás, usando como combustible de referencia el gas natural o el gas propano. También se propone investigar aplicaciones del biogás de relleno sanitario en motores de combustión interna para aplicaciones de transporte masivo.

## REFERENCIAS

- [1] Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE, «Estudios Postcensales 7. Proyecciones nacionales y departamentales de población 2005-2020,» Marzo 2010. [En línea]. Available: [https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepo-bla06\\_20/7Proyecciones\\_poblacion.pdf](https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/proyepo-bla06_20/7Proyecciones_poblacion.pdf). [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [2] Mundial, B. «World Bank- GDP growth (annual %),» [En línea]. Available: <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?locations=CO>. [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [3] Sarmiento, M. C. C. «D WASTE- Waste Management for everyone,» 24 Octubre 2012. [En línea]. Available: <http://www.d-waste.com/new-infographics/item/114-solid-waste-management-in-colombia.html>. [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [4] Super Intendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, «Disposición final de residuos sólidos,» 12, 2015. [En línea]. Available: <http://www.superservicios.gov.co/content/download/10760/88380>. [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [5] Qin, W. P. et al., «Waste-to-Energy (WTE) network synthesis for Municipal Solid Waste (MSW),» *Energy Conversion and Management*, vol. 85, n° 0196-8904, pp. 866-874, 2015.
- [6] Arafat, H. A. et al., «Environmental performance and energy recovery potential of five processes for municipal solid waste treatment,» *Journal of Cleaner Production*, vol. 105, n° 0959-6526, pp. 233-240, 2015.
- [7] Noguera, K. M. y Olivero, J. T. «Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano,» *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 34 (132), n° ISSN 0370-3908, pp. 347-356, 2010.
- [8] Meraz, L. et al., «A thermochemical concept-based equation to estimate waste combustion enthalpy from elemental composition,» *Fuel*, vol. 82, n° 0016-2361/03/\$, p. 1499-1507, 2003.
- [9] González, S. M., Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: análisis de variables y modelización, Tesis Doctoral- Universidad de Oviedo, Gijón, España, 1997.
- [10] Themelis, N. J. y Ulloa, P. A. «Methane generation in landfills,» *Renewable Energy*, vol. 32, n° 0960-1481, p. 1243-1257, August 2007.
- [11] N. Bolan, N. et al., «Landfills as a biorefinery to produce biomass and capture biogas,» *Bioresource Technology*, vol. 135, n° 0960-8524, p. 578-587, 2013.
- [12] Bidart, C. et al., «Municipal solid waste and production of substitute natural gas and electricity as energy alternatives,» *Applied Thermal Engineering*, vol. 51, n° 1359-4311, pp. 1107-1115, 2012.
- [13] Singh, R. y et al., «An overview for exploring the possibilities of energy generation from municipal solid waste (MSW) in Indian scenario,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, n° 1364-0321, p. 4797- 4808, 2012.
- [14] Willumsen, H., «Energy recovery from landfill gas in Denmark and worldwide,» In *Międzynarodowego Seminarium-International Workshop for Utilization of Landfill Gas for Energy Production*, 2001. [En línea]. Available: [http://www.lei.lt/\\_img/\\_up/File/atvir/Opet/pdf/Wil-lumsen.pdf](http://www.lei.lt/_img/_up/File/atvir/Opet/pdf/Wil-lumsen.pdf). [Último acceso: 1 Marzo 2017].
- [15] Zamorano, M. et al., «Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, n° 1364-0321, p. 909-922, 2007.
- [16] SCS. ENGINEERS, «Informe de evaluación, relleno sanitario Doña Juana Colombia» US-EPA, Washington DC, 2007.
- [17] Estudios y Técnicas especializadas en ingeniería S.A de C.V «Estudio de pre-factibilidad para el aprovechamiento del biogás generado en el relleno sanitario Don Juanito Municipio de Villavicencio, Colombia» México D.F, 2006.
- [18] Ludwig, V. et al., «User's Manual Colombian Landfill Gas Version 1.0» Environmental Protection Agency-EPA, Washington DC, 2010.
- [19] SIGEP S.A.S «Informe de calidad del biogás relleno sanitario La Gloria, Primer trimestre de 2016. Monitoreo calidad del biogás del relleno sanitario La Gloria, Municipio de Pereira» ATESA S.A.E.S.P, Pereira, 2016.
- [20] Souza, J. y Schaeffer, L. «Sistema de Compresión de Biogás y Biometano» *Información Tecnológica*, vol. 24, n° doi: 10.4067/S0718-07642013000600002, p. 3-8, 2013.



**Ángel Andrés Andrade Morales.** Nació en Armenia, Quindío, el 21 de julio de 1989. Ingeniero Mecánico y Magister en Ingeniería Mecánica graduado por la Universidad Tecnológica de Pereira. Docente hora cátedra y profesional del Laboratorio de Ensayos para Equipos Acondicionadores de Aire- LPEA. Es investigador del grupo Gestión Energética –GENERGETICA. Sus intereses incluyen las ciencias térmicas, *waste to energy* y eficiencia energética.



**Juan Esteban Tibaquirá.** Nació en Bogotá, Cundinamarca, el 10 de enero de 1975. Ingeniero Mecánico, Magister en Ingeniería Mecánica graduado por la Universidad de los Andes y Philosophy Doctor en Ingeniería Mecánica graduado por la Universidad Estatal de Arizona, Estados Unidos. Actualmente es Decano de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira, profesor titular e investigador asociado reconocido por Colciencias. Tiene gran

experiencia en el ámbito académico e industrial y sus intereses incluyen los sistemas térmicos y los microfluidos.



**Álvaro Hernán Restrepo Victoria.** Nació en Buga, Valle del Cauca, el 31 de mayo de 1973. Ingeniero Mecánico graduado de la Universidad Autónoma de Occidente – Cali. Magister en Ingeniería Mecánica graduado de la Universidad de los Andes – Bogotá, y Doctor en Ingeniería Mecánica, área de concentración ciencias térmicas graduado por la Universidad Federal de Santa Catarina -Brasil. Actualmente es profesor titular de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica de Pereira y director

del grupo de investigación GENERGETICA. Es director del Laboratorio para Ensayos de Equipos Acondicionadores de Aire - LPEA e investigador Junior reconocido por Colciencias. Tiene amplia experiencia en el sector académico e industrial y sus intereses incluyen análisis exergético de procesos y exergoambiental lo que incluye LCA, uso racional y eficiente de energía.