

Investigación

Análisis de la producción de lixiviado y biogás bajo condiciones de extracción activa en un relleno sanitario*

Analysis of the Leachate and Biogas Production under Active Extraction Conditions in a Landfill

Recibido: 15 de agosto de 2014 • Aceptado: 1 de diciembre de 2014

Para citar este artículo: C. Zafra y V. Gutiérrez, «Análisis de la producción de lixiviado y biogás bajo condiciones de extracción activa en un relleno sanitario», *Ingenium*, vol. 16, n.º 31, pp. 9-23, mayo, 2015.



Carlos Alfonso Zafra Mejía**
Víctor Hugo Gutiérrez Gil***

Resumen

Durante el proceso de descomposición en un relleno sanitario se producen lixiviados y biogás que interactúan con el ambiente; de esta manera, una inadecuada gestión puede generar un deterioro en la salud pública del área de influencia de la instalación. El objetivo principal de este artículo es evaluar temporalmente la producción de lixiviado y biogás bajo condiciones de extracción activa en un relleno sanitario colombiano. En este sentido, se pretende evaluar el comportamiento temporal a través de pronósticos con los modelos *Corenostós* y *Colombiano de Biogás*. El pronóstico temporal del caudal del lixiviado con el modelo *Corenostós* muestra que la tendencia es similar a la observada en campo. Al respecto, el error absoluto porcentual promedio del pronóstico mensual es del 66,6 %. Por otra parte, los resultados muestran que los errores absolutos porcentuales promedios en los pronósticos anuales del biogás generado son del 49,9 % y 41,3 % en ambos modelos.

* Artículo de investigación, producto derivado del proyecto presentado por los grupos de investigación: Sistemas y Recursos Ambientales Sostenibles-SYRAS y GIIAUD, durante los años 2012 y 2013.

** Ph. D. en Ingeniería Ambiental. Profesor de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. E-mail: czafra@udistrital.edu.co

*** Especialista en Agua y Saneamiento Ambiental. Universidad Manuela Beltrán, Colombia. E-mail: victorhugo8111@gmail.com

Adicionalmente, los resultados muestran que los errores absolutos porcentuales en los pronósticos para la cantidad total de biogás generado durante el período de investigación a través de los modelos *Corenostós* y *Colombiano de Biogás* son del 29 % y 37,9 %, respectivamente. Finalmente, los modelos *Corenostós* y *Colombiano de Biogás* tienden a sobrestimar y subestimar la producción real de biogás respectivamente.

Palabras clave

Lixiviado, residuo sólido, vertedero controlado.

Abstract

During the decomposition process in a landfill it is produced leachate and biogas that interact with the environment; in this way, an inadequate management can generate deterioration in the public health of influence area of the installation. The main objective of this paper is to evaluate temporarily the leachate and biogas production under active extraction conditions in a Colombian landfill. In this sense, it aims to assess the temporal behavior through forecasts with the models *Corenostós* and *Colombian of Biogas*. The temporary forecast of leachate flow with *Corenostós* model shows that the trend is similar to that observed in the field. In this regard, the average absolute percentage error of monthly forecast is 66.6 %. On the other hand, the results show that the annual average absolute percentage errors in the forecasts of the biogas generated are 49.9% and 41.3% in both models. Additionally, the results show that the absolute percentage errors in the predictions for the total amount of biogas generated during the period of investigation through the models *Corenostós* and *Colombian of Biogas* are 29% and 37.9%, respectively. Finally, the models *Corenostós* and *Colombian of Biogas* tend to overestimate and underestimate the real production of biogas respectively.

Keywords

Landfill, leachate, solid waste.

I. I. Introducción

Cuando se disponen residuos sólidos en un relleno sanitario inicia un proceso de descomposición en el que los constituyentes se transforman en agua, gas y materia estable. Durante el proceso de descomposición se producen lixiviados y biogás que interactúan con el ambiente; de esta manera una inadecuada gestión puede generar un deterioro en la salud pública del área de influencia de la instalación [1, 2, 3]. Adicionalmente, en los principales rellenos sanitarios de Colombia no se realiza extracción activa del biogás ni un adecuado control geotécnico, generando un desconocimiento local en el tema que impide pronosticar el comportamiento temporal de la producción de lixiviados y biogás.

A partir de lo anterior, se hace necesario desarrollar investigaciones para evaluar la estabilización biológica y geotécnica asociada con la extracción activa de biogás en este tipo de instalaciones; de esta manera se podrá estudiar el comportamiento temporal de la

estabilización de los residuos sólidos, y la producción de lixiviados y biogás en las zonas de vertido.

Desde un punto de vista teórico, con el tiempo y después de clausurado un relleno sanitario la materia tiende a estabilizarse en volumen y a mineralizarse debido a la baja actividad biológica que se tiene; en este sentido, se dice que un relleno sanitario se encuentra en proceso de estabilización [4, 5, 6]. Por otra parte, el biogás de un relleno sanitario es un producto natural de la descomposición de los residuos orgánicos mediante condiciones aerobias y anaerobias. Las condiciones aerobias ocurren inmediatamente después del vertido de los residuos sólidos debido a la captura del aire atmosférico. Esta fase inicial se caracteriza por poseer una corta duración y por generar un biogás compuesto principalmente por CO_2 . Cuando el oxígeno es consumido, se inicia una degradación anaerobia prolongada con un valor energético significativo: CH_4 (55 %) y CO_2 (45 %) [7, 8, 9].

Desde un punto de vista geotécnico, el ritmo de producción de asentamientos en un relleno sanitario es variable con la edad, presentándose velocidades de asentamiento que disminuyen con el tiempo; no obstante, se mantienen perceptibles durante años hasta que los complejos procesos de descomposición alcancen la etapa de estabilización [5, 6]. De esta manera, se ha planteado que en los rellenos sanitarios con un alto contenido de residuos orgánicos los asentamientos fueron significativos en los primeros diez años [10, 11]. Por lo tanto, los asentamientos modifican la densidad de los residuos y la morfología del relleno sanitario y, consecuentemente, la producción de lixiviado y biogás [12].

En el ámbito colombiano existen comercialmente varios modelos matemáticos incorporados en programas informáticos; entre los más reconocidos se encuentran los modelos *Corenostós* y *Colombiano de Biogás*. El primer modelo involucra principalmente las siguientes variables para el pronóstico mensual de la producción de lixiviado y biogás en un relleno sanitario de tipo doméstico: cantidad de residuos e incrementos mensuales (Ton), composición física (%) y química (C,H,O,N y S) de los residuos, grado y tiempo de descomposición, vida útil del relleno sanitario, condiciones climatológicas, y características de las coberturas para los residuos dispuestos [13]. Finalmente, este modelo ha sido utilizado ampliamente en ambientes académicos y para el pronóstico en rellenos sanitarios nacionales como el de *Navarro* en la ciudad de Cali.

Por otro lado, el segundo modelo fue desarrollado por *S.C.S. Engineers* bajo un contrato con el programa *Landfill Methane Outreach* (LMOP) de la U.S.EPA. El modelo fue desarrollado exclusivamente con el objetivo de proveer proyecciones de generación y recuperación de biogás más exactas y conservadoras. Otros modelos evaluados durante el proceso de desarrollo incluyeron el modelo *Mexicano de Biogás Versión 2.0* y el modelo de *Residuos 2006 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático* (IPCC). De esta manera, el modelo también incorpora la estructura del *Modelo IPCC* con algunas revisiones para que refleje de mejor manera las condiciones climáticas de Colombia [14]. Finalmente, el modelo requiere de la incorporación de datos específicos tales como el año de apertura, año de clausura, índices de disposición anual, ubicación del sitio (climatología), e incluir las condiciones físicas pasadas y presentes del sitio de disposición final.

Por lo tanto, a nivel nacional e internacional la modelización de la cantidad y calidad del lixiviado y biogás generado en un relleno sanitario se ha fundamentado principalmente en tres factores: (i) composición y edad del residuo vertido, (ii) diseño y operación del relleno sanitario, y (iii) condiciones climáticas de la zona, específicamente de precipitación y temperatura [15, 16, 17].

El objetivo principal de este artículo es presentar una evaluación temporal de la producción de lixiviado y biogás bajo condiciones de extracción activa en un relleno sanitario colombiano. Se pretende realizar un pronóstico y análisis de la producción de biogás y lixiviado con los modelos *Corenostós* y *Colombiano de Biogás* para establecer un escenario de comparación con los datos obtenidos en campo.

II. II. Materiales y métodos

A. Descripción del área de estudio

La zona de disposición final de residuos sólidos urbanos en estudio se encuentra dentro del Relleno Sanitario Doña Juana (40°29'50,59" N; 74°08'43,28" O). La instalación está localizada en jurisdicción de las localidades de Usme y Ciudad Bolívar de la ciudad de Bogotá, D. C., en predios ubicados sobre la margen izquierda de la hoya hidrográfica del río Tunjuelo; sirve a una población cercana a los siete millones de habitantes y cuenta con un área de 472 hectáreas, de las cuales 219 están destinadas para el depósito de residuos sólidos [18].

La zona de investigación estuvo en operación durante cerca de ocho meses, tuvo un área de 2,98 hectáreas y recibió 465.808 toneladas de residuos sólidos urbanos de tipo doméstico. La elevación media de la zona de investigación es de 2.920 m.s.n.m., posee una precipitación promedio anual de 655 mm y una temperatura media anual de 12 °C. La zona posee un clima templado húmedo de verano seco según la clasificación de *Koeppen*, es decir, es un clima subtropical con escasas lluvias.

Por otra parte, la zona de vertido estuvo en fase de adecuación a partir del 2008/04/17; posteriormente, el 2008/09/08 se inició la disposición secuencial de los residuos sólidos urbanos (ver figura 1), culminando la fase de disposición el 2009/05/02. Por último, se construyó la cobertura final y se instaló la instrumentación para el control geotécnico de la zona de disposición; características que serán descritas a continuación.



Figura 1. Fotografía de la zona de vertido en investigación

B. Sistema de muestreo

Recopilación de la información

Se consolidó toda la información generada por el operador de la zona de estudio, la interventoría, la entidad contratante, y consultando la documentación de la autoridad ambiental regional, en este caso, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). En esta etapa se recopilaron los datos básicos del proyecto, la ubicación de la zona, los criterios de diseño, y el manual de operación con los componentes de adecuación, operación, cierre y clausura de la zona de vertido.

Caracterización de residuos sólidos

Los datos de caracterización se obtuvieron de los informes mensuales del operador y la interventoría del proyecto; de esta manera, se determinó la cantidad de residuos sólidos vertidos mes a mes en la zona de estudio durante el periodo de investigación (2008/09/10-2012/06/30). Adicionalmente, se determinó la proporción (%) de constituyentes de los residuos sólidos dispuestos: (i) materia orgánica, (ii) madera, (iii) metales, (iv) minerales, (v) papel y cartón, (vi) plástico y caucho, (vii) textiles, y (viii) vidrio; lo anterior, a partir del promedio mensual y anual de la caracterización realizada por el operador del proyecto.

Lixiviado

El caudal (diario) y la caracterización (mensual) del lixiviado generado en la zona de investigación se tomaron de la información reportada por el operador durante el período comprendido entre el 2008/09/10 y 2012/06/30. En este sentido, en la caracterización del lixiviado se incluyeron los siguientes parámetros: (i) DQO, (ii) DBO₅, (iii) sólidos suspendidos totales (SST), y (iv) pH. Lo anterior, con el objeto de evaluar temporalmente las características del lixiviado y biogás generado por la zona de vertido y, por lo tanto, el grado de mineralización de los residuos sólidos dispuestos [10]; en este caso, bajo condiciones de extracción activa de biogás.

Biogás

La información de la producción y calidad del biogás generado se obtuvo de los reportes diarios de la empresa operadora de la zona de vertido. Posteriormente, esta información fue agregada para obtener valores promedio mensuales. Finalmente, en la caracterización del biogás se incluyeron los siguientes parámetros: (i) CH₄ y (ii) CO₂; la producción de biogás se reportó en volumen por unidad de tiempo bajo condiciones normales de presión y temperatura (Nm³/h).

Control geotécnico

La información geotécnica se obtuvo a partir de los registros mensuales del operador de la zona de vertido. Al respecto, se utilizaron los datos recolectados por los equipos de instrumentación geotécnica (piezómetros) y topográfica (inclinómetros); lo anterior, para evaluar el comportamiento de la masa de residuos y estabilidad del dique de contención. De esta manera, la zona de investigación contó con nueve piezómetros de tipo hilo vibrátil;

los piezómetros se utilizaron con el objeto de evaluar, a diferentes profundidades, cambios de presión súbitos, presencia de bolsas de gas y niveles colgados de lixiviado. Finalmente, en el análisis de estabilidad de la masa de residuos sólidos se utilizó el factor de relación de presión de poros (R_u); es decir, valores cercanos a 1,0 sugirieron condiciones de menor estabilidad en la zona de vertido [19].

C. Análisis de la información

Pronósticos del biogás y lixiviado

Una vez recopilada y analizada la información de los residuos sólidos, el lixiviado y biogás: (i) cantidad de residuos vertidos (Ton/mes), (ii) composición porcentual de los constituyentes del flujo de residuos, (iii) caudal diario y mensual de lixiviado, (iv) caracterización mensual del lixiviado (DQO, DBO_5 , SST y pH), (v) producción y composición horaria de biogás (CH_4 y CO_2), y (iv) parámetros piezométricos y topográficos; se procedió a evaluar temporalmente la producción de lixiviado y biogás, y a realizar el pronóstico de su producción mensual mediante los modelos *Corenostós* [13] y *Colombiano de Biogás* [14] con el objeto de establecer un escenario de comparación con los datos obtenidos en campo. Finalmente, se determinaron los errores absolutos porcentuales promedios para los pronósticos realizados.

III. Resultados y discusión

Este apartado inicia con una descripción de la cantidad y composición porcentual (mensual) de los residuos sólidos urbanos vertidos en el área de estudio. Posteriormente, se presenta una evaluación temporal (mensual) de la producción real de lixiviado y biogás y, finalmente, se exhibe un escenario de comparación entre los pronósticos obtenidos mediante los modelos seleccionados y los datos reales de producción de lixiviado y biogás registrados en campo.

A. Cantidad de residuos sólidos vertidos

La tabla 1 presenta la información correspondiente a las cantidades vertidas durante el período de investigación del relleno sanitario. En este sentido, se depositaron 246.591 toneladas en el año 2008 y 219.216 toneladas en el año 2009.

Tabla 1. Cantidad vertida de residuos

Mes	Toneladas (mes)	Toneladas (año)
Sep.-08	20.219	
Oct.-08	77.526	246.591
Nov.-08	75.206	
Dic.-08	73.639	
Ene.-09	71.354	
Feb.-09	42.090	
Mar.-09	60.289	219.216
Abr.-09	45.035	
May.-09	448	
Total	465.808	465.807

B. Porcentaje de constituyentes de los residuos sólidos vertidos

El conocimiento del porcentaje de los constituyentes de los residuos sólidos es fundamental para evaluar la producción de biogás. En este sentido, la determinación de la proporción orgánica en el flujo de residuos de una localidad es fundamental. Por ejemplo, los derivados de la madera (papel y cartón) son residuos de lenta degradación debido a que presentan en su composición química moléculas orgánicas no solubles en el agua [9]. Por otro lado, los restos de comida, podas y de jardinería forman el grupo de residuos orgánicos de rápida degradación, ya que cuentan con un alto contenido de humedad y su vertido en grandes cantidades en los vertederos jóvenes puede retrasar la formación de metano [10]; ello es debido al descenso del pH que produce la alta actividad microbiana inicial, superada esta fase, la producción de biogás se recupera con fuerza [20].

El operador del relleno sanitario realizó la caracterización mensual de los residuos vertidos; con esta información se determinaron los promedios anuales durante el período de investigación (ver tabla 2). Como se pudo observar, la materia orgánica disminuyó en un 5,8 % con respecto a la composición interanual de los residuos vertidos; es decir, entre los años 2008 (78,4 %) y 2009 (72,6 %). Lo anterior, probablemente debido a los cambios en los hábitos de la población. Adicionalmente, se observó durante el período de investigación un aumento de las fracciones correspondientes a plástico y caucho, y vidrio (ver tabla 2). De esta manera, probablemente se sugiere una variación en el comportamiento temporal del caudal de lixiviado y el volumen de biogás generado durante el período de investigación.

Tabla 2. Composición de los residuos vertidos

Material	Año	
	2008	2009
Materia orgánica	78,4 %	72,6 %
Madera	0,88 %	1,34 %
Metales	1,15 %	0,70 %
Minerales	0,00 %	0,10 %
Papel y cartón	6,80 %	6,42 %
Plástico y caucho	8,7 %	14,8 %
Textil	2,75 %	2,19 %
Vidrio	1,41 %	2,25 %
Total	100 %	100 %

C. Producción de lixiviado

La información de la producción de lixiviado (caudal) en la zona de investigación correspondió al período comprendido entre el 2008/09/10 y 2012/06/30 (ver figura 2). Esta información temporal fue la que se utilizó para establecer un escenario de comparación con respecto de los pronósticos realizados por el modelo seleccionado en el presente estudio: *Corenostós*; como se expuso en la introducción del presente manuscrito.

Los resultados sugirieron un comportamiento temporal típico en la producción de lixiviados; es decir, se registraron mayores caudales durante el período de disposición de residuos sólidos en la zona de vertido (i.e. hasta el 2009/05/02). Al respecto, el caudal máximo registrado fue de 8935 m³/mes (3,45 l/s; para el 2009/04). Posteriormente, se observó una disminución de los caudales probablemente asociada con el inicio de la construcción de la cobertura final de la zona de vertido (i.e., desde el 2009/06/01). Por lo tanto, los resultados sugirieron que el caudal promedio de lixiviado durante la época de vertido de residuos fue 6,3 veces superior con respecto de la época posterior a la construcción de la cobertura final de la zona de vertido en estudio.

Adicionalmente, se observó en la presente investigación que el caudal promedio de lixiviado tendió a disminuir temporalmente hacia una condición de equilibrio o estabilización entre 0,07-0,30 l/s (ver figura 2). Lo anterior, probablemente asociado con el desarrollo de la fase de maduración en el relleno sanitario de estudio; es decir, alcanzada a los 35 meses del inicio de la operación. Al respecto, Merz y Stone [22] reportaron resultados similares para un periodo de tiempo de 48 meses desde el llenado de la celda. De esta manera, durante el periodo de estabilización del caudal de lixiviado los investigadores asociaron el aporte de caudal con la precipitación antes que con la descomposición de los residuos sólidos vertidos.

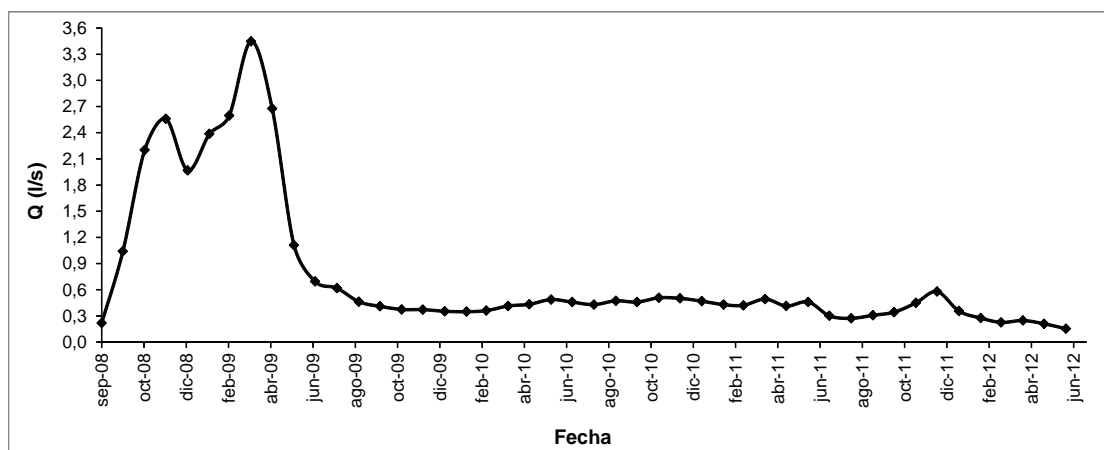


Figura 2. Caudal promedio mensual de lixiviado

Por último, se debe tener en cuenta que existieron incrementos en el caudal del lixiviado producto del régimen de precipitación en el área de investigación (tendencia bimodal); es decir, los períodos de tiempo que registraron una mayor precipitación fueron los siguientes: (i) entre marzo y junio, y (ii) entre septiembre y diciembre. Por ejemplo, después de la construcción de la cobertura final del relleno sanitario (i.e., desde el 2009/06/01), el caudal de lixiviado durante los periodos de aumento de la precipitación fue en promedio 1,10 veces superior con respecto de la época de disminución de la precipitación (i.e., en tiempo seco).

D. Pronóstico de generación de lixiviado

Se realizó el pronóstico del caudal de lixiviados con el modelo *Corenostós*. La escala temporal utilizada para la modelización fue mensual; lo anterior, a partir de sus opciones de

simulación. Es importante mencionar, que el modelo fue programado por el desarrollador para una escala mínima de simulación de 60 meses; en nuestro caso el relleno sanitario estuvo en operación durante ocho meses (ver figura 3).

Los resultados mostraron que el caudal máximo de lixiviado registrado en campo fue de 8935 m³/mes, y el pronosticado con el modelo *Corenostós* fue de 8319 m³/mes. De esta manera, existió un error absoluto porcentual en el pronóstico del 7,4 % (subestimación). Adicionalmente, se observó un desfase temporal de cuatro meses en la ocurrencia del caudal máximo de lixiviado; es decir, el caudal máximo real se registró durante el mes de abril mientras que el pronosticado ocurrió en el mes de agosto.

Finalmente, la figura 3 presenta el escenario de comparación entre el caudal real observado y el pronóstico del modelo. Como se pudo observar, la tendencia temporal del pronóstico fue similar a los registros de caudal observados en campo. Los resultados mostraron que el error absoluto porcentual promedio del pronóstico mensual del caudal del lixiviado fue del 66,6 %. Adicionalmente, el 85 % de los pronósticos fueron inferiores al valor real observado.

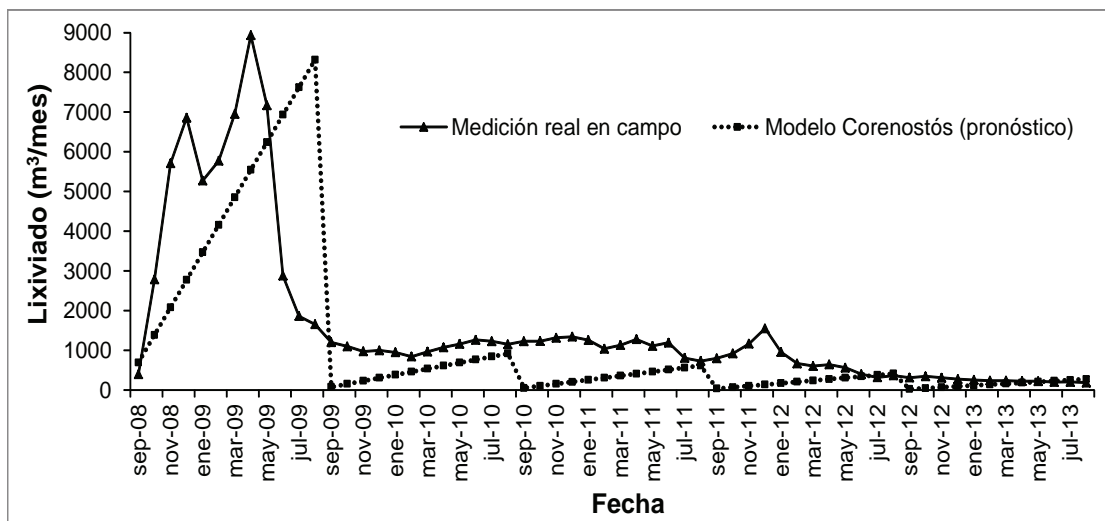


Figura 3. Pronóstico versus producción real de lixiviado

E. Calidad del lixiviado generado

El análisis de la calidad del lixiviado generado en la zona de vertido se realizó mensualmente, entre el 2008/09/10 y 2012/06/30. Los resultados evidenciaron que las mayores concentraciones se presentaron durante la etapa de disposición y los tres meses siguientes desde la clausura de la zona de vertido; es decir, hasta agosto del año 2009 (ver figura 4). Al respecto, las concentraciones máximas mensuales de DQO, DBO₅ y SST fueron 93.226 mg/l, 66.900 mg/l y 2010 mg/l, respectivamente. Por otro lado, se observaron bajas magnitudes en el pH (4,7-5,8) hasta el mes de junio del año 2009. A partir de lo anterior, los resultados sugirieron que durante los primeros siete meses de operación probablemente ocurrieron las fases de ajuste inicial, transición y ácida, a partir de lo reportado por Tchobanoglous et al. [10].

Posteriormente, desde el mes de septiembre del año 2009 se observó una disminución constante hasta alcanzar una reducción promedio entre el 95-99 % en la concentración de los siguientes parámetros: DQO, DBO₅ y SST (ver figura 4). Por otro lado, el pH a medida que fue transcurriendo el tiempo cambió de ácido (4,7) a básico (8,8); lo anterior, probablemente debido a las reacciones químicas internas en la masa de residuos sólidos.

Por lo tanto, los resultados sugieren que la variación en la composición del lixiviado probablemente está asociada con la composición de los residuos sólidos vertidos (materia orgánica promedio: 75 %; ver tabla 2) y la edad del relleno sanitario (36 meses); es decir, un lixiviado joven se caracteriza por una alta relación entre la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y la demanda química de oxígeno (DQO) [10]. En la presente investigación las relaciones durante esta etapa estuvieron entre 0,31-1,80, y se registraron durante los primeros 22 meses de evaluación. Al respecto, es importante mencionar que el relleno sanitario tuvo una vida útil de ocho meses. Finalmente, durante este periodo de tiempo se registraron elevadas cargas orgánicas; para el caso de la DBO₅ entre 1.400-66.900 mg/l (ver figura 4).

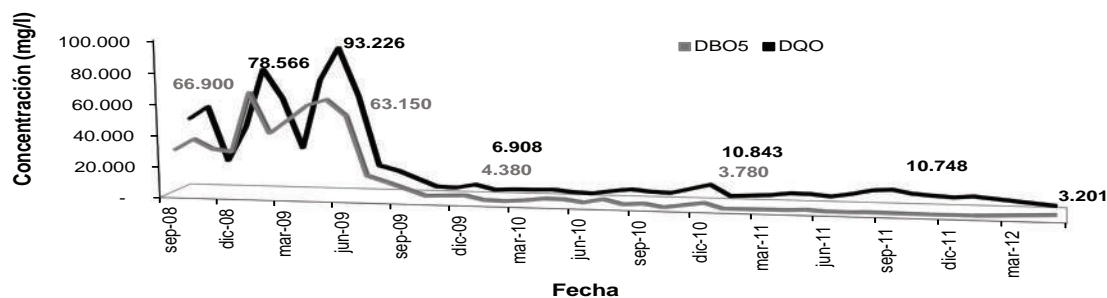


Figura 4. Variación temporal de la concentración de DQO y DBO5 en el lixiviado

Por otro lado, el lixiviado maduro se caracteriza por una baja relación entre la demanda bioquímica de oxígeno (DBO5) y la demanda química de oxígeno (DQO) [10]; es decir, en la presente investigación las relaciones durante esta etapa estuvieron entre 0,05-0,23. Las anteriores relaciones se registraron desde el mes 23 hasta el horizonte temporal de evaluación (i.e., el mes 36). Martín [20] y Critto et al. [21] reportaron tendencias similares en sus investigaciones. Finalmente, durante este periodo de tiempo las cargas orgánicas tendieron a disminuir; para el caso de la DBO5 las magnitudes estuvieron entre 314-3780 mg/l.

F. Producción de biogás

La preparación para la extracción activa del biogás en la zona de investigación se inició en el mes de octubre de 2009, con la construcción y conexión de ocho chimeneas perimetrales apoyadas sobre la superficie de los taludes laterales del relleno sanitario (i.e., inclinadas), y trece chimeneas verticales para los cabezales de los pozos; las chimeneas se localizaron en los vértices de una retícula de 45 m X 45 m, en promedio. Por lo tanto, la densidad superficial para el sistema de extracción activa de biogás fue de 1420 m2 por chimenea. Adicionalmente, las chimeneas fueron construidas en malla para gavión del tipo triple torsión (1 m X 1 m; roca de Ø = 0,20 m). Finalmente, en el mes de noviembre del año 2009 se terminó la construcción de la red principal y secundaria (PVC; Ø = 6") para la captación y conducción del biogás de la zona de vertido.

La figura 5 presenta la producción horaria de biogás desde el mes de octubre de 2009 hasta el mes de octubre del año 2012. Es importante mencionar, que a partir del mes de noviembre de 2009 se contó con todas las conexiones y accesorios necesarios para la extracción activa del biogás de las 21 chimeneas del área de vertido. Por lo tanto, se observó que la mayores producciones horarias se presentaron entre los meses de diciembre de 2009 (1.783,6 Nm³/h) y julio de 2010 (1.816,4 Nm³/h). Posteriormente, la producción tendió a disminuir constantemente desde el mes de agosto de 2010 hasta llegar a una producción horaria de 347,51 Nm³/h en octubre de 2012. Es decir, se experimentó una reducción del 80,9 % con respecto de la producción promedio horaria del periodo de máxima generación de biogás; lo anterior ocurrió en un periodo de 27 meses con extracción activa de biogás. Adicionalmente, se pudo observar que la tendencia fue similar a la observada para el caudal de lixiviado generado en la zona de investigación (ver figura 4).

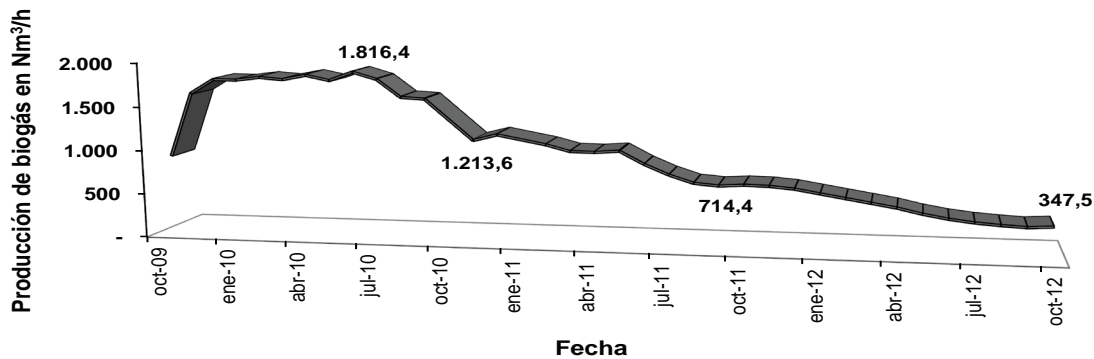


Figura 5. Producción real de biogás

G. Calidad del biogás generado

La figura 6 presenta la composición porcentual en volumen (CH₄ y CO₂) del biogás generado en la zona de vertido entre los meses de octubre de 2009 y octubre de 2012. Los resultados mostraron que desde el inicio de la extracción activa del biogás la composición porcentual en volumen de CH₄ y CO₂ se ha mantenido constante; es decir, entre 49-54 % y 37-39 %, respectivamente. Es importante mencionar, que la extracción activa del biogás inició a los seis meses de cerrada la celda y que la evaluación en la presente investigación se realizó durante 40 meses. Merz y Stone [22] reportaron resultados similares; los investigadores encontraron que el porcentaje en volumen de metano en el biogás después de un período de 24 meses de cerrada la celda fue del 48 %.

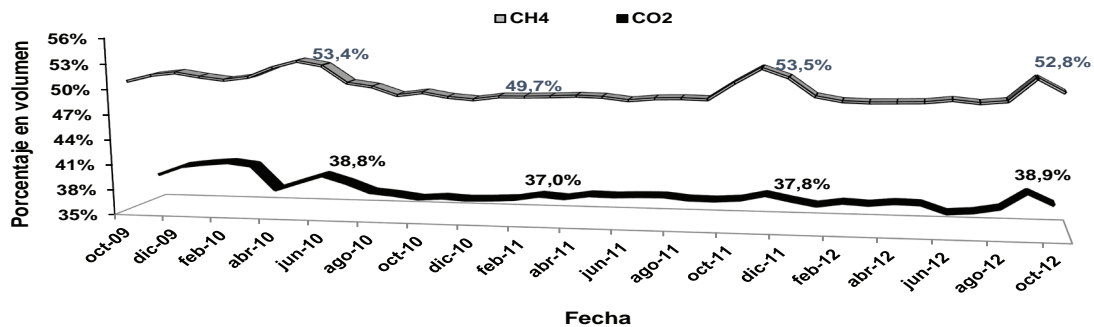


Figura 6. Porcentaje de CH₄ y CO₂ en el biogás generado

Igualmente, Monreal [23] reportó que la composición porcentual en volumen del biogás en los rellenos sanitarios chilenos se mantuvo dentro de los rangos del 50-54 % para el metano y del 45-48% para el dióxido de carbono. Asimismo, se ha reportado que las proporciones habituales para el CH₄ y CO₂ en el biogás recuperado en un relleno sanitario estuvieron entre el 40-60 % [10, 20]. De esta manera, se sustentaron los resultados obtenidos en la presente investigación.

H. Control geotécnico

En la zona de investigación se instalaron nueve piezómetros de tipo hilo vibrátil. Los piezómetros se utilizaron con el objeto de evaluar, a diferentes profundidades, cambios súbitos de presión, presencia de bolsas de gas, y niveles colgados de lixiviado. Adicionalmente, en el análisis de estabilidad de la masa de residuos se utilizó el factor de relación de presión de poros (Ru). En este sentido, se aceptó que existieron condiciones de menor estabilidad cuando se obtuvieron valores de Ru cercanos a 1,0 [19, 24, 25]; es decir, bajo estas condiciones se asumió que la estabilidad dependió exclusivamente de los diques de contención y la cohesión de los residuos. La figura 7 presenta los valores promedio mensuales para Ru durante el período de investigación (2009/06/01-2013/10/01).

Los resultados mostraron que durante el periodo comprendido entre octubre de 2009 y abril de 2010, la magnitud del factor Ru tendió a disminuir (0,20); lo anterior, probablemente asociado al inicio de las operaciones de extracción activa del biogás (ver figuras 5 y 7). Por otro lado, los aumentos en la magnitud del factor Ru probablemente estuvieron asociados con la ejecución de actividades de construcción, el transporte de residuos por parte de los vehículos de recogida urbana, u operaciones de maquinaria pesada sobre la zona de investigación. No obstante, los valores promedio obtenidos se encontraron por debajo del límite sugerido para Ru (i.e., de 1,0), indicando de esta manera que la zona de investigación no presentó riesgo por estabilidad.

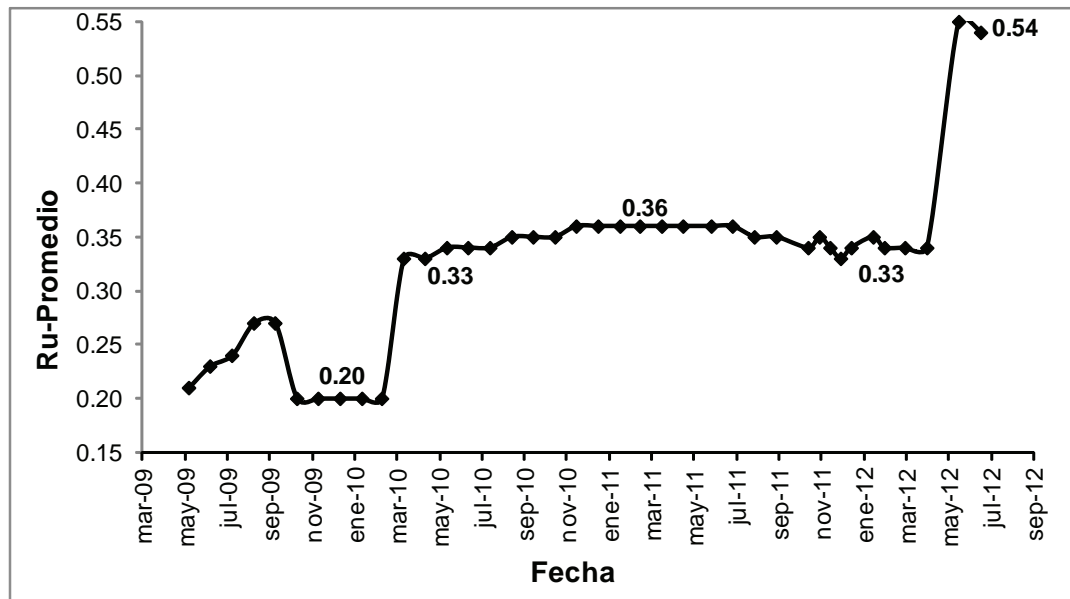


Figura 7. Promedio mensual para el parámetro Ru

I. Pronóstico de generación de biogás

La tabla 3 presenta los resultados obtenidos de los pronósticos anuales de biogás generado, y el porcentaje de error con respecto a la cantidad real de biogás extraído. En este sentido, los resultados mostraron que los errores absolutos porcentuales promedios en los pronósticos anuales fueron del 49,9 % y 41,3 % para los modelos *Corenostós* y *Colombiano de Biogás*, respectivamente. Por otra parte, los resultados muestran que los errores absolutos porcentuales en los pronósticos para la cantidad total de biogás generado durante el período de investigación a través de los modelos fueron del 29 % y 37,9 %, respectivamente.

Por otro lado, el modelo *Corenostós* tendió a sobreestimar la producción real de biogás; es decir, en promedio el 75 % de los pronósticos anuales durante el período de investigación estuvieron por encima de la cantidad real extraída de biogás en la zona de investigación. Con respecto al modelo *Colombiano de Biogás*, los resultados mostraron que se tendió a subestimar la producción real de biogás; es decir, en promedio el 75 % de los pronósticos anuales estuvieron por debajo de la cantidad real extraída de biogás. Por último, los máximos errores absolutos en los pronósticos anuales de la generación de biogás fueron del 64,2 % y 64,8 % para los modelos, respectivamente.

Tabla 3. Pronóstico anual de generación de

Año	Corenostós Nm3/h	Colombiano de biogás Nm3/h	Real Nm3/h	Corenostós Error absoluto (%)	Colombiano de biogás Error absoluto (%)
2009	951	504	1.430	33,5	64,8
2010	2.735	874	1.666	64,2	47,5
2011	1.347	739	865	55,7	14,6
2012	663	626	453	46,4	38,2
Total	5.696	2.743	4.414	29,0	37,9
Error promedio anual				49,9	41,3

IV. Conclusiones

Los resultados sugieren una tendencia normal en la producción del lixiviado. Es decir, se registran mayores caudales durante el período de disposición de residuos sólidos en la zona de investigación (i.e. hasta el 2008/05/02). Posteriormente, se observa una disminución del caudal del lixiviado probablemente asociada con la finalización de las operaciones de disposición de residuos y el inicio de la construcción de la cobertura final de la zona de vertido (i.e. desde el 2009/06/01). Adicionalmente, se observa una influencia del régimen de precipitación en el comportamiento temporal del caudal de lixiviado; con un incremento promedio del caudal de lixiviado del 10 % durante los periodos de aumento de la precipitación.

Igualmente, los resultados obtenidos muestran una tendencia típica en la evolución temporal de la composición del lixiviado. En este sentido, los resultados evidencian

que en los primeros 22 meses de operación del relleno sanitario las relaciones DBO_5/DQO se encuentran entre 0,31 y 1,80 (i.e., un relleno sanitario joven). Posteriormente, hasta el final del periodo de investigación (36 meses), las relaciones evidencian un comportamiento para un relleno sanitario maduro (DBO_5/DQO : 0,05-0,23). Lo anterior, bajo condiciones de extracción activa del biogás.

El pronóstico del caudal del lixiviado con el modelo *Corenostós* muestra que la tendencia es similar a la observada en campo. En este sentido, los resultados muestran que el error absoluto porcentual promedio del pronóstico mensual es del 67 %, y que el 85 % de los pronósticos son inferiores al valor real observado (subestimación).

Con respecto a la evolución temporal del biogás generado, los resultados sugieren una tendencia similar a la registrada para el lixiviado. Es decir, una mayor producción de biogás durante el período de disposición de residuos sólidos en la zona de investigación (8 meses); no obstante, la máxima producción de biogás se registra un año después de construida la cobertura final. Por otro lado, los resultados muestran con respecto a la composición del biogás que entre el 49-54 % y 37-39 % del volumen corresponde a CH_4 y CO_2 , respectivamente.

Los resultados evidencian que los errores absolutos porcentuales promedios en los pronósticos anuales del biogás generado son del 49,9 y 41,3 % para cada modelo respectivamente. Adicionalmente, los resultados muestran que los errores absolutos porcentuales en los pronósticos para la cantidad total de biogás generado durante el período de investigación a través de los modelos son del 29 % y 37,9 %, respectivamente. Finalmente, en la presente investigación los modelos *Corenostós* y *Colombiano de Biogás* tienden a sobrestimar y subestimar la producción real de biogás bajo condiciones de extracción activa, respectivamente.

Adicionalmente, la investigación permite ampliar el conocimiento local acerca de la evolución temporal de la producción de biogás y lixiviado bajo condiciones de extracción activa en un relleno sanitario. De esta manera, es de utilidad para los organismos públicos y privados involucrados en la gestión de la salud pública, es decir, de vigilar y controlar la operación en rellenos sanitarios, y de diseñar e implementar prácticas de control para la contaminación en este tipo de instalaciones. Por lo tanto, el presente manuscrito representa un documento de apoyo para visualizar opciones en la toma de decisiones para la gestión del lixiviado y biogás generado en vertederos controlados.

V. Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo brindado por la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos (UAESP), PROACTIVA Doña Juana S.A. E.S.P., Biogás Doña Juana S.A. E.S.P., HVM CONCOL, CGR Doña Juana S.A. E.S.P., y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

VI. Referencias

- [1] C. A. Zafra, F. A. Mendoza, and P. A. Montoya, «A Methodology for landfill Location Using Geographic Information Systems: a Colombian Regional Case», *Ingeniería e Investigación*, Vol. 32, pp. 64-70, Apr. 2012.
- [2] C. Grima-Olmedo, Á. Ramírez-Gómez, R. Alcalde-Cartagena, «Energetic Performance of Landfill and Digester Biogas in a Domestic Cooker», *Applied Energy*, Vol. 134, pp. 301-308, Dec. 2014.
- [3] G. D. Bella, D. D. Trapani, G. Mannina, G. Viviani, «Modeling of Perched Leachate Zone Formation in Municipal Solid Waste Landfills», *Waste Management*, Vol. 32, pp. 456-462, Mar. 2012.
- [4] C. H. Hettiarachchi, J. N. Meegoda, J. Tavantzis, and P. Hettiaratchi, «Numerical Model to Predict Settlements Coupled with Landfill Gas Pressure in Bioreactor Landfills», *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 139, pp. 514-522, Jan. 2007.
- [5] G. F. Simões, and C. A. Catapreta, «Monitoring and Modeling of long-term Settlements of an Experimental Landfill in Brazil», *Waste Management*, Vol. 33, pp. 420-430, Feb. 2013.
- [6] G. L. S. Babu, S. K. Chouksey, K. R. Reddy, «Approach for the use of MSW settlement predictions in the assessment of landfill capacity based on reliability analysis», *Waste Management*, Vol. 33, pp. 2029-2034, Oct. 2013.
- [7] R. E. Sims, «Sustainable energy future for New Zealand», *Renewable Energy*, Vol. 9, pp. 1049-1054, Jan. 1996.
- [8] R. L. Meraz, A. M. Vidales, and A. A. Domínguez, «Fractal-like kinetics equation to calculate landfill methane production», *Fuel*, Vol. 83, pp. 73-80, Jan. 2004.
- [9] N. Miroslav, R. Therrien, R. Lefebvre, and P. Gélinas, «Gas production and migration in landfill and geological materials», *Journal of Contaminant Hydrology*, Vol. 52, pp. 187-211, Nov. 2001.
- [10] G. Tchobanoglous, H. Theissen, and R. Eliassen, *Desechos slidos. Principios de ingeniería y administración*, Mérida (Venezuela): CIDIAT, 1982, 542 p.
- [11] C. H. Hettiarachchi, J. N. Meegoda, J. Tavantzis, P. Hettiaratchi, «Numerical model to predict settlements coupled with landfill gas pressure in bioreactor landfills», *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 139, pp. 514-522, Jan. 2007.
- [12] M. El-Fadel, R. Khoury, «Modeling settlement in MSW landfills: a critical review», *Critical Review in Environmental Science and Technology*, Vol. 30, pp. 327-361. Jun. 2000.
- [13] H. Collazos, *Diseño y operación de rellenos sanitarios*, Bogotá, D.C. (Colombia): Escuela Colombiana de Ingeniería, 2005, 233 p.
- [14] G. A. Stege, *Manual del usuario. Modelo Colombiano de Biogás*, Washington D.C. (USA): Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA), 2009, 31 p.
- [15] A. F. Al-Yaqout, M. F. Hamoda, «Evaluation of landfill leachate in arid climate-a case study», *Environmental International*, Vol. 26, pp. 593-600, Aug. 2003.
- [16] J. Fellner, P. H. Brunner, «Modeling of leachate generation from MSW landfills by a 2-dimensional 2-domain approach», *Waste Management*, Vol. 30, pp. 2084-2095, Nov. 2010.
- [17] A. Camba, S. González-García, A. Bala, P. Fullana-i-Palmer, M. T. Moreira, G. Feijoo, «Modeling the leachate flow and aggregated emissions from municipal waste landfills under life cycle thinking in the Oceanic region of the Iberian Peninsula», *Journal of Cleaner Production*, Vol. 67, pp. 98-106, Mar. 2014.
- [18] K. M. Noguera, y J. T. Olivero, «Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano», *Revista Academia Colombiana de Ciencias*, Vol. 34, pp. 347-356, Sep. 2010.
- [19] D. K. Wall, and C. Zeiss, «Municipal Landfill Biodegradation and Settlement», *Journal of Environmental Engineering*, Vol. 121, pp. 214-224, Mar. 1995.
- [20] S. Martín, *Producción y Recuperación del Biogás en Vertederos Controlados de Residuos Sólidos Urbanos: Análisis de Variables y Modelización*, Oviedo (España): Universidad de Oviedo, 1997, 220 p.
- [21] A. Critto, C. Carlon, and A. Marcomini, «Characterization of contaminated soil and groundwater surrounding an illegal landfill (S. Giuliano, Venice, Italy) by principal component analysis and kriging», *Environmental Pollution*, Vol. 122, pp. 235-244, Apr. 2003.
- [22] R.C. Merz, and R. Stone, *Special Studies of a Sanitary Landfill*, Washington, D.C.: U.S. Department of Health, Education, and Welfare, 1970, 51 p.
- [23] J. Monreal, *La Recuperación de Biogás en Rellenos Sanitarios en Santiago de Chile*, Santiago de Chile (Chile): Siglo XXI, 1999, 12 p.
- [24] M. El-Fadel, S. Shazbak, E. Saliby, J. Leckie, «Comparative assessment of settlement models for municipal solid waste landfill applications», *Waste Management & Research*, Vol. 17, pp. 347-368, May. 1999.
- [25] R. M. Koerner, and T. Y. Soong, «Leachate in landfills: the stability issues», *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 18, pp. 293-309, Oct. 2000.