

COMPOSICIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN DOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL

Carlos Alberto GONZÁLEZ RAZO¹ y Otoniel BUENROSTRO DELGADO^{2*}

¹ Estudiante de Doctorado en Ciencias e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, Mexicali, México

² Laboratorio de Residuos Sólidos y Medio Ambiente. Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Av. San Juanito Itzicuaró s/n, Col. San Juanito Itzicuaró. C.P. 58302, Morelia, Michoacán, México

*Autor responsable; otonielb@umich.mx

(Recibido agosto 2011, aceptado enero 2012)

Palabras clave: componentes, confinamiento, estratos, Morelia

RESUMEN

En la actualidad, ha cobrado interés la gestión sustentable de los residuos sólidos porque prevé la disminución de los impactos ambientales, la conservación de los recursos naturales y el aprovechamiento del biogás generado de la descomposición de los residuos como fuente de energía potencial. En este sentido, en México se ha avanzado en la reconversión de tiraderos a cielo abierto a rellenos de tierra controlados y construcción de rellenos sanitarios, cuyas características de operación, tiempo de vertido y la composición de los residuos sólidos, inciden en distintos grados de degradación de éstos y en una producción diferencial de biogás. Esta investigación se realizó en el relleno de tierra clausurado y el relleno sanitario de Morelia, con los objetivos de analizar la composición de los residuos sólidos y de determinar si existen diferencias estadísticas en los dos sitios y el tiempo de confinamiento. Para ello se tomaron muestras de residuos de ambos sitios a diferentes profundidades y se caracterizaron los componentes; posteriormente se aplicó un análisis de varianza y la prueba de Tukey a los datos del análisis de composición. Los resultados de los análisis de composición y estadísticos muestran diferencia estadística entre los estratos y los sitios, por lo que se concluye que la composición de los residuos sólidos confinados en los dos sitios es diferente. Estos datos son importantes a tomar en cuenta para la estimación del biogás generado en los sitios de disposición de residuos sólidos.

Key words: components, confinement, strata, Morelia

ABSTRACT

Sustainable solid waste management has gained a great of interest at the present time, because it endows with the reduction of environmental impacts, the conservation of natural resources and the utilization of biogas generated from the decomposition of wastes as a source of potential energy. In order to achieve this sustainability, in Mexico there has been a substantive progress in the closure of the open dumps and the construction of landfills, whose operation, age and composition of wastes, determines a variation in the degradation of wastes and a differential production of biogas. This research was carried out in the closed dump and the landfill of Morelia, in order to

analyze the composition of solid wastes and to determine if there are statistical differences between both sites and the time of confinement of solid wastes. To achieve this, waste samples were taken at different depths and characterized the components; an analysis of variance and Tukey test were applied to data from the analysis of composition. Results of composition and statistical tests show differences between strata and sites. These findings are relevant to take into account for the calculation of biogas in dumps and landfills.

INTRODUCCIÓN

La gestión sustentable de los residuos sólidos es una de las metas que buscan los tomadores de decisiones, ya que además de disminuir impactos ambientales, prevé efectuar un aprovechamiento de la energía potencial del biogás que se produce de la descomposición de los residuos (Hernández y Durán 2006, Scharff y Jacobs 2006). En México, continúan predominando para la disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU), los rellenos de tierra controlados (RTC), que resultan de la reconversión de los tiraderos a cielo abierto, y en menor proporción los rellenos sanitarios (RESA) (INEGI, 2009); estos últimos que se construyen de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-083-ECOL.1996 (SEMARNAT, 1996).

La descomposición anaerobia de los residuos orgánicos en estos sitios genera biogás que tiene serias implicaciones en el efecto invernadero (IPCC 2007, USEPA 2002), pero que también es una fuente de energía potencial (Gendebien *et al.* 1992). No obstante, en estos sitios se han depositado los residuos a diferentes periodos de tiempo, por lo que es de esperar que el tiempo de confinamiento, la composición, el tipo de relleno sanitario y la edad de los residuos (Wang-Yao *et al.* 2004, Yilmaz *et al.* 2003, USEPA 2005), entre otras variables, incidan en una producción diferencial de biogás, derivado de las distintas fases de degradación de los residuos sólidos (Chiemchaisri *et al.* 2007, IPCC 2006, Tchobanoglous *et al.* 1993). De lo anterior, resulta importante profundizar en el conocimiento del efecto de estas variables que permitan una mayor precisión en la toma de decisiones con respecto al aprovechamiento del biogás como fuente de energía potencial (Scharff y Jacobs 2006). El objetivo de esta investigación fue comparar la composición de los residuos sólidos confinados en el tiradero clausurado y el relleno sanitario de Morelia, Michoacán. Los objetivos específicos fueron analizar la composición de los residuos confinados en los dos sitios y determinar estadísticamente si existen diferencias significativas en la composición, con respecto al sitio y al tiempo de confinamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del sitio de estudio y muestreo de RSU

Este estudio se efectuó en el relleno de tierra clausurado (RTC) y en el relleno sanitario (RESA) de Morelia, Michoacán. Los dos sitios se encuentran ubicados al oeste de la ciudad, en la región centro occidente de México (Israde *et al.* 2005). El RTC tuvo un periodo de vida a partir de 1984, de 24 años y se confinaron los residuos en cuatro secciones distintas (cuadrantes). El RESA inició la recepción de residuos en diciembre de 2007. Cada cuadrante se diferencia por el tiempo de confinamiento de los residuos, por lo cual se numeraron en orden progresivo de acuerdo a su antigüedad en el sitio. Los cuadrantes I al IV se localizan en el RTC y el V en el RESA (**Fig. 1**).

Se seleccionaron aleatoriamente 21 puntos de muestreo (pozos), distribuidos en los cinco cuadrantes. En cada pozo se tomaron muestras de RSU de tres estratos distintos, a cada metro de profundidad, a partir de la superficie.



Fig. 1. Sitios de disposición de RSU en Morelia Michoacán (Fuente: GOOGLE EARTH. <http://earth.google.es/thanks.html>. Accesado: 12/09/2010.)

CUADRO I. PRINCIPALES SUBPRODUCTOS CARACTERIZADOS DE LAS MUESTRAS DE RESIDUOS SÓLIDOS DE LOS CINCO SITIOS DE LA ZONA DE ESTUDIO (% PESO FRESCO)

Principales subproductos	Cuadrante				
	1	2	3	4	5
Materia orgánica	54.164	66.127	60.994	61.456	68.234
Loza y cerámica	4.499	0.363	0.263	0.900	0.101
Material de construcción	2.562	2.886	1.374	0.102	0.769
Material ferroso	1.041	0.101	0.061	1.799	0.020
Pañal desechable (80 %)	6.365	8.040	8.650	1.783	12.284
Bolsa de película	12.768	9.647	8.731	7.360	5.483
Plástico rígido	6.290	4.480	4.628	2.862	5.624
Vidrio	4.145	3.613	5.032	2.862	1.275
Piedras	4.999	1.998	4.911	11.082	2.509
Otros	3.166	2.745	5.356	9.793	3.702

Análisis de las muestras en laboratorio

Se tomó un kilogramo de muestra de RSU por cada estrato y se efectuó una selección manual y una cuantificación de subproductos, con base en una variante de la Norma de Clasificación NTRS-5, propuesta por la SEDUE e incluida en la Norma Oficial Mexicana NOM-AA-22-1985 (SECOFI 1984). Estos se pesaron en balanzas de precisión y los pesos de cada subproducto se anotaron en el formato de clasificación antes expuesto.

Los subproductos encontrados en las muestras de los residuos se reagruparon en tres rubros: materia orgánica, que incluyó los subproductos de residuo fino, residuo de jardinería, residuos alimenticios, cartón, cuero, fibra dura vegetal, hueso, madera, papel, papel higiénico, heces fecales, trapo, vísceras, cabello así como el 20 % del material con el que se fabrican los pañales; la materia inorgánica que incluye todos los demás subproductos encontrados en las muestras analizadas, y por último, el rubro de tierra y piedras por encontrarse en proporciones significativas dentro de la corriente de residuos.

Análisis estadístico de los datos

Los datos de campo y de laboratorio se ordenaron por estrato, pozo y cuadrante. Estos se capturaron para conformar una base de datos y efectuar un análisis de varianza (Anova) utilizando el programa estadístico JMP, Versión 6.0 (JMP 2006), con la finalidad de conocer si existían diferencias estadísticamente significativas por estrato y cuadrante. Aquellos que presentaron diferencia se sometieron a una prueba de Tukey con JMP para conocer entre cuales variables se presentaba esta condición. Los datos se trabajaron de la siguiente forma:

Anova entre estratos por cuadrante

Se realizó un Anova para conocer si existían diferencias estadísticamente significativas, respecto a la composición de los RSU entre los tres estratos de cada cuadrante.

Anova entre cuadrantes

Posteriormente las muestras se trabajaron por cuadrante para observar posibles diferencias en los cinco considerados. La prueba de Tukey se realizó para conocer cuáles eran los cuadrantes con la diferencia estadística.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN**Caracterización de las muestras de residuos sólidos**

La caracterización de las muestras, dio un total de 33 subproductos encontrados, siendo predominantes los residuos de comida, de jardín y residuo fino no identificable. El **cuadro I** presenta los principales subproductos encontrados.

La reagrupación de todos los subproductos encontrados en las tres categorías consideradas se analizaron por estrato y cuadrante. Los **cuadros II y III** muestran los promedios de cada una de las tres categorías consideradas respectivamente.

CUADRO II. COMPOSICIÓN PROMEDIO DE RSU POR ESTRATO (% PESO HÚMEDO)

Estrato	M. orgánica	M. inorgánica	Tierra/piedras	Total
1	62.2	32.7	5.1	100
2	67.7	28.1	4.2	100
3	68.4	26.7	4.9	100

CUADRO III. COMPOSICIÓN PROMEDIO DE RSU POR CUADRANTE (% PESO HÚMEDO)

Cuadrante	M. orgánica	M. inorgánica	Tierra/piedras	Total
I	54.16	40.84	5	100
II	66.13	31.88	2	100
III	60.99	34.10	4.91	100
IV	61.46	27.56	11.08	100
V	68.26	29.26	2.51	100

Análisis estadístico de los datos*Anova entre estratos por cuadrante*

A continuación se presentan los resultados del Anova entre estratos por cuadrante (**Cuadro IV**).

El cuadro anterior muestra diferencia estadística ($P < 0.005$) entre estratos con respecto a la materia orgánica en los cuadrantes III, IV y V. En el caso del cuadrante III, la prueba de Tukey señala una diferencia entre los tres estratos. Para el cuadrante IV y V es el estrato 1 el que presenta la diferencia con respecto al 2 y 3. Esta diferencia fortalece la aserción de que el estado de degradación de la materia orgánica, la cual está influenciada por el tiempo de confinamiento de los residuos sólidos es la que marca la diferencia entre los estratos y cuadrantes de los dos sitios de estudio. Los cuadrantes III y IV pertenecen al RTC, con una antigüedad promedio de cinco años; el cuadrante V, se localiza en el RESA, con una antigüedad de confinamiento al momento de realizar el muestreo, también de cinco años. No obstante, la prueba de Tukey demuestra que la diferencia está marcada por los estratos, que indican la disposición vertical de los residuos sólidos dentro de la celda de confinamiento. Los residuos del estrato 1 (más superficiales), son los de más reciente disposición. No obstante, la diferencia entre RTC y el RESA, es que en el primero, el estrato 1 tiene una antigüedad de cinco años y en el último, el estrato 1, tenía una antigüedad promedio de un año, al momento de realizar el muestreo. También es

importante considerar la influencia de otros factores en la degradación de la materia orgánica, entre los más importantes están la composición química de ésta (Godley *et al.* 2003), la humedad (Korfiatis *et al.* 1984), temperatura (Kalyuzhnyi *et al.* 2003), así como la compactación de los residuos (Hossain *et al.* 2003) y el tipo de cobertura utilizado (Márquez y Watson 2003).

Respecto a la materia inorgánica la diferencia estadística ($P < 0.005$) se observa entre el cuadrante II y V. La prueba de Tukey aplicada para cada uno de ellos, muestra una diferencia estadísticamente significativa entre el estrato 1 ($P < 0.005$) con respecto al 2 y 3 que presentan similitud estadística entre ellos. Esta diferencia en la proporción de la materia inorgánica está marcada por la predominancia de la materia orgánica en el cuadrante V, de más reciente confinamiento, como se explicó en el párrafo anterior. Sin embargo, es importante considerar también que la menor proporción de residuos inorgánicos obedece a una menor cantidad de estos en la corriente de los residuos sólidos dispuestos, derivada de un incremento en los niveles de separación de reciclables y que ha sido reportada previamente (González *et al.* 2011).

En el caso del rubro de tierra/piedras también existe una diferencia estadística ($P < 0.005$) en los cuadrantes III y IV. La prueba de Tukey arroja para el cuadrante III una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$) entre el estrato 2 con respecto al 1 y 3. En el caso del cuadrante IV se presenta una diferencia estadística entre los tres estratos.

Anova entre cuadrantes

El **cuadro V** muestra los resultados del Anova entre cuadrantes resaltando una diferencia estadísticamente significativa ($P < 0.05$).

Con respecto al ANOVA para la materia orgánica e inorgánica se presenta una similitud estadística con respecto a sus medias en los cuadrantes I, III y IV. Los cuadrantes II y V son similares en cuanto a composición, aunque se esperaba que fueran estadísticamente

CUADRO IV. RESULTADOS DEL ANOVA DE LOS PARÁMETROS PARA LOS ESTRATOS 1, 2, Y 3 POR CUADRANTE

Cuadrante	Estratos	Nparm	DF	Prob> F		
				M. orgánica	M. inorgánica	Tierra/piedras
I	1, 2, 3	2	2	0.2163	0.8739	0.3033
II	1, 2, 3	2	2	0.4121	0.0082	0.9071
III	1, 2, 3	2	2	0.0202	0.327	0.0007
IV	1, 2, 3	2	2	<.0001	0.4873	0.0399
V	1, 2, 3	2	2	0.0006	0.0003	0.6643

CUADRO V. RESULTADOS DEL ANOVA DE LOS PARÁMETROS POR CUADRANTE

Fuente	Nparm	GL	Suma de cuadros	Valor de F	Prob> F
M. Orgánica	4	4	11595045	22.5221	<.0001
M. Inorgánica	4	4	3633986.2	17.2523	<.0001
Tierra/Piedras	4	4	70610298	18.2006	<.0001

diferentes ya que el tiempo de confinamiento de los residuos es distinto. De tal manera encontramos dos agrupaciones entre cuadrantes los I, III, IV y el II, V, y los cuales presentan diferencia estadística entre ellos. La caracterización de los residuos sólidos determinó proporciones mayores de materia orgánica en los cuadrantes más recientes (**Cuadro I**). Además durante la separación manual de los componentes de los residuos, se observó que los residuos orgánicos de los estratos más profundos y de cuadrantes más antiguos se encontraban en un estado de descomposición mayor. El Anova dio una diferencia estadísticamente significativa entre los cuadrantes IV y V, lo cual confirma las diferencias de la composición observadas durante la caracterización de los residuos sólidos. No obstante, es importante considerar que los resultados obtenidos también pueden depender de otros factores como la cantidad y composición de los residuos que se depositaron en los cuadrantes, así como a las labores de clausura del RTC que implicó la remoción y emparejamiento de las celdas, lo cual modificó la distribución original de los residuos sólidos en los estratos más superficiales.

Sobre los cálculos de la prueba para la variable tierra/piedras existe una diferencia estadísticamente significativa entre los cuadrantes II, IV y V ($P < 0.05$), mientras que los cuadrantes I y III no presentan diferencia. No existe un patrón homogéneo sobre disposición lo que hace suponer que la mayor parte de este tipo de residuos no fue generado en la corriente de RSU, sino que fueron utilizados como material de cobertura en la etapa de clausura del sitio.

Aunque el estudio de la producción de metano no fue el objeto de este estudio, las mediciones efectuadas durante un año (González *et al.* 2011), mostraron una variación en la generación del metano, la cual sugiere una influencia de factores estacionales. Durante las primeras cinco semanas (correspondientes a los meses de mayo y junio) se observó una producción entre el 35 y 45 %; durante las próximas 16 semanas (meses de julio y agosto, estación de lluvias), la producción registró una tendencia a incrementarse. A partir de la semana 21, la producción tiende a declinar con la disminución de la precipitación.

La comparación de la generación de metano entre cuadrantes determinó una menor generación en los cuadrantes I y IV, sugiere también la influencia del tiempo de confinamiento de los residuos sólidos, y por ende, de la fase de degradación en que se encuentran los residuos. Para el caso del cuadrante I, que es el más antiguo, es de esperar que después de 20 años una gran proporción de la fracción orgánica ya fue degradada. Caso contrario, del cuadrante IV, que es el de más reciente disposición, por lo que la fase metanogénica aún no ha alcanzando su nivel máximo. Los análisis estadísticos efectuados en el estudio de González *et al.* (2011) demuestran una heterogeneidad en la composición de los residuos sólidos dentro del mismo sitio. Asimismo que la composición y degradabilidad de la fracción orgánica de los residuos influye sobre las emisiones de biogás, y en particular del metano, ya que se determinaron porcentajes distintos entre los diferentes cuadrantes.

CONCLUSIONES

Se observaron diferencias en la cantidad de materia orgánica, siendo mayor en el RESA, con respecto al RTC.

El contenido de materia orgánica mostró una relación inversamente proporcional con el tiempo de confinamiento de los residuos sólidos en cada uno de los cuadrantes de los sitios de estudio.

La caracterización de los residuos sólidos permitió observar un mayor grado de descomposición de la materia orgánica en los cuadrantes de mayor tiempo de confinamiento.

Los resultados de los análisis estadísticos de las muestras de residuos sólidos confirman una diferencia estadísticamente significativa de los contenidos de materia orgánica e inorgánica entre estratos y cuadrantes de los dos sitios de estudio.

El contenido menor de materia inorgánica observado en el RESA, indica además, que la proporción de estos componentes ha disminuido en la corriente de los residuos sólidos que se confinan en este sitio, con respecto a los residuos confinados en el RTC.

Los resultados indican que el tiempo de confinamiento incide en la composición de los residuos sólidos de los dos sitios de estudio, lo cual es importante considerar en estudios sobre generación del biogás generado de la descomposición de los residuos sólidos.

REFERENCIAS

- Chiemchaisri C., Chiemchaisri W., Kumar S. y Hettiaratchi J.P.A. (2007). Solid waste characteristics and their relationship to gas production in tropical landfill. *Environ Monit Assess.* 135, 41-48.
- Hernández G. y Durán C. (2006). Productividad de biogás en un relleno sanitario clausurado. *Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica.* 1, 1-15.
- INEGI (2009). Base de datos de disposición de residuos en México. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/rutinas/ept.asp> 25/08/2010.
- IPCC (2006). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme (H. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara y K. Tanabe Eds.). Vol. 5. Waste IGES, Japón.
- IPCC (2007). Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (R.K. Pachauri y A. Reisinger Eds.). IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.
- Gendebien A., Constant M., Ledrut-Damanet E., Nyns H., Willumsen J., Butson R., Fabry G. y Ferrero G.L (1992). Landfill gas from environment to energy. Commission of the European Communities, Luxembourg.
- Godley A.R., Lewin K., Graham A. y Smith R. Environment agency review of methods for determining organic waste biodegradability for landfill and municipal waste diversion. Proc. 8th European Biosolids and Organic Residuals Conference. Wakefield, UK, 23-26 Nov. 2003. Vol. 2.
- González C., Buenrostro O., Márquez L., Hernández C., Moreno E. and Robles, F. (2011). Effect of solid wastes composition and confinement time on methane production in a dump. *J. Environ. Protec.* 2, 1310-1316.
- Hossain M. S, Gabr M. A, Asce F. y Barlaz M. A. (2003). Relationship of compressibility parameters to municipal solid waste decomposition. *J Geotechnviron.* 129, 151-1158.
- Israde I., Buenrostro O. y Carrillo A. (2005). Geological characterization and environmental implications of the placement of the Morelia landfill, Michoacan, Central Mexico. *J. Air Waste Manage.* 55, 755-764.
- JMP 6.0. SAS Institute Inc. (2006). www.jmp.com/software/jmp6.
- Kalyuzhny S., Gladchenko M. y Epov E. (2003). Combined anaerobic-aerobic treatment of landfill leachates under mesophilic, submesophilic and psychrophilic conditions. *Water Sci. Technol.* 48, 311-318.
- Korfiatis G.P., Demetracopoulus A.C., Bourodimos E. y Nawy E.G. (1984). Moisture transport in a solid waste column. *J. Environ. Eng.* 110, 780-796.
- Márquez L. y Watson-Craik I. (2003). Effect of intermediate soil cover on municipal solid waste decomposition. *Water Sci. Technol.* 48, 245-248.
- Scharff H. y Jacobs J. (2006). Applying guidance for methane emission estimation for landfills. *Waste Manage.* 26, 417-429.
- Tchobanoglous G.T.H. y Vigil S. (1993). *Integrated solid waste management. Engineering principles and management Issues.* Mc. Graw-Hill. Singapore. 684-704.
- SECOFI (1984). Norma Mexicana NMX-AA-022-1985. Selección y cuantificación de subproductos. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Dirección General de Normas, México.
- SEMARNAT (1996). Norma Oficial Mexicana NOM-083-ECOL.1996. Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Diario Oficial de la Federación. 20 de octubre de 2004.
- Wang-Yao K., Towprayoon S. y Jaroenpoj S. (2004). Estimation of landfill gas production using pumping test. The Joint International Conference on Sustainable Energy and Environment (SEE). HuaHin, Thailand, 1-3 December, 2004.
- USEPA (2002). Inventory of US greenhouse gas emissions and sinks: 1990-2000, Report Number EPA430/R-02/003 [NTIS PB2003-102522], United States. Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- USEPA (2005). EPA-600/R-05/072. First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills. United States Environmental Protection Agency. June 2005.
- Yilmaz A. y Atalay F. (2003). Modeling of the anaerobic decomposition of solid waste. *Energ Source.* 25, 1063-1072.