

ESTIMACIÓN DE LAS CONSTANTES k Y L_0 DE LA TASA DE GENERACIÓN DE BIOGÁS EN SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL EN BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Quetzalli AGUILAR-VIRGEN^{1,2*}, Sara OJEDA-BENÍTEZ¹,
Paul TABOADA-GONZÁLEZ^{1,2} y Margarito QUINTERO-NÚÑEZ¹

¹ Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California. Calle de la Normal s/n, Insurgentes Este, Mexicali, Baja California, México, C.P. 21280

² Instituto Tecnológico de Culiacán. Juan de Dios Bátiz 310 Pte. Col. Guadalupe, Culiacán, Sinaloa, México, C.P. 80220

*Autora responsable; qaguilarv@gmail.com

(Recibido agosto 2011, aceptado noviembre 2011)

Palabras clave: energías renovables, metano, residuos sólidos urbanos, vertederos

RESUMEN

En las comunidades de Baja California, México, existen diferencias en las características propias de los sitios que impiden generalizar los parámetros para predecir la generación de biogás. Con el objetivo de proyectar con mayor precisión la generación de biogás, en esta investigación se determinó el índice de generación de metano (k) y el potencial de generación de metano (L_0) en cuatro comunidades, dos urbanas (Mexicali y Ensenada) y dos rurales (San Quintín y Vicente Guerrero) de Baja California, México. Se realizaron estudios de caracterización de residuos, se utilizaron como base algunas constantes del Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0, y se siguieron los lineamientos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Los resultados muestran que el 64 % de los residuos generados son orgánicos, lo cual influye en el valor de los parámetros k y L_0 . Los valores de los parámetros promedio obtenidos en los cuatro sitios de estudio son similares a los rangos establecidos por el IPCC y el World Bank Group (WBG) ($k = 0.0404$ por año y $L_0 = 73.645$ m³/t de residuo). En algunos modelos los parámetros k y L_0 ya están preestablecidos, sin embargo, se sabe que la determinación de estos parámetros *in situ* otorga una mayor certidumbre a la estimación de la generación de biogás.

Key words: renewable energy, methane, municipal solid waste, landfills

ABSTRACT

In the communities of Baja California, Mexico, there are differences in the characteristics of the sites that prevent generalizing the parameters to predict the generation of biogas. In order to project more accurately the generation of biogas, in this study was determined the methane generation rate (k) and methane generation potential (L_0) in four communities, two urban (Mexicali and Ensenada) and two rural (San Quintin and Vicente Guerrero) in Baja California, Mexico. Waste characterization studies were carried out, some constants of the Version 2.0 of Mexican Model of Biogas were used as baseline, and the guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

were followed. The results show that 64 % of waste generated is organic, which affects the value of the parameters k and L_0 . The average parameter values obtained in four study sites are similar to the ranges established by IPCC and World Bank Group (WBG) ($k = 0.0404$ per year and $L_0 = 73\,645$ m³/t of waste). On some models the parameters k and L_0 are preset, however, it is known that the determination of these parameters *in situ* gives greater certainty to the estimated biogas generation.

INTRODUCCIÓN

La estimación de las emisiones de biogás en los sitios de disposición final (SDF) ha sido analizada por diversos investigadores (Kumar *et al.* 2004, WBG 2004, ETEISA 2006, Garg *et al.* 2006, IPCC 2006, LFG Consult 2007, Machado *et al.* 2009, SCS Engineers 2009), principalmente para conocer su potencial como fuente renovable de energía y mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero. Como resultado se han generado diversos modelos para predecir la generación de biogás, tales como: Método IPCC (IPCC 2006, Chiemchaisri y Visvanathan 2008, Machado *et al.* 2009), modelo de la EPA Modelo de Degradación de Primer Orden (Garg *et al.* 2006, Machado *et al.* 2009), Modelo LandGEM (Scharff y Jacobs 2006, Chiemchaisri y Visvanathan 2008) y Modelo Mexicano de Biogás (SCS Engineers 2009).

Entre los modelos generados, el Modelo de Degradación de Primer Orden es reconocido como el método más utilizado. Este se basa en dos parámetros fundamentales, L_0 (potencial de generación de metano) y k (índice de generación de metano) (Garg *et al.* 2006, Machado *et al.* 2009). El valor de L_0 está en función de la composición de los residuos, y el valor de k depende de parámetros específicos del sitio, tales como el contenido de humedad, temperatura, composición de residuos, potencial de reducción de oxidación, alcalinidad y pH, densidad de la basura y el tamaño de las partículas (Garg *et al.* 2006, SCS Engineers 2009). Aunque este modelo provee automáticamente valores para L_0 y k (SCS Engineers 2009), se considera que la determinación de dichos valores *in situ* proporciona una menor incertidumbre en las proyecciones.

Las particularidades de cada comunidad en Baja California, México constituyen un impedimento para la estimación de la generación de biogás en los diferentes SDF considerando los valores preestablecidos, ya que se pueden subestimar o sobreestimar. Por ello y con la finalidad de estimar con mayor precisión el potencial de generación de biogás en los SDF en dos comunidades urbanas (Mexicali y Ensenada)

y dos comunidades rurales (San Quintín y Vicente Guerrero) de Baja California, México, el objetivo de esta investigación fue determinar los dos parámetros fundamentales (k y L_0).

Zona de estudio

Mexicali (MXL) es la capital de Baja California y se ubica al noroeste de México en $+32^{\circ}39'$, $-115^{\circ}28'$. Presenta un clima cálido-seco con muy poca precipitación anual. Alcanza temperaturas desde -5°C en el invierno hasta 50°C a la sombra en el verano, con una precipitación promedio anual de 132 mm. La ciudad de Ensenada (ENS) se localiza en $+31^{\circ}52'$, $-116^{\circ}36'$. La precipitación promedio anual histórica es de 250 mm, con un clima mediterráneo, temperatura templada la mayor parte del tiempo y lluvias principalmente en invierno. Las comunidades de San Quintín (SQ) y Vicente Guerrero (VG) se ubican a 195 km y 170 km hacia el sur de ENS. La precipitación total anual en la región oscila entre los 100 y 200 mm, con una temperatura media anual de 16.61°C y lluvias principalmente en diciembre y enero.

METODOLOGÍA

Caracterización de residuos

Los estudios se realizaron en 2009 en MXL (en invierno, primavera y verano), ENS, SQ y VG (en invierno y verano). La duración de cada estudio obedece a las características propias de cada sitio, a la disponibilidad de recursos y a los objetivos buscados, entre otros. Así, existen estudios que reportan una duración desde una semana (Zeng *et al.* 2005, Gidaracos *et al.* 2006, Gómez *et al.* 2008), hasta meses (Ojeda-Benítez *et al.* 2003, Batool y Chuadry 2008, Karousakis y Birol 2008). En este estudio, el análisis de residuos en cada periodo estacional fue de tres días en MXL y cinco días consecutivos (en cada comunidad) en ENS, SQ y VG.

Las muestras analizadas en cada sitio se tomaron de los residuos depositados por los camiones recolectores municipales en los SDF. Debido a que la recolección se realiza una vez por semana en cada

ruta, se consideró que las muestras eran representativas de la generación de una semana.

El tamaño adecuado para las muestras no es estandarizado. La norma mexicana NMX-AA-015-1985 (SECOFI 1985) indica un peso mayor a los 50 kg. Por su parte, Tchobanoglous *et al.* (1994) han indicado que las muestras tomadas de 90 kg no varían significativamente de las tomadas en muestreos de hasta 770 kg, obtenidos de la misma carga de residuos. Otros autores (Chung y Poon 2001, Zeng *et al.* 2005, Gidaracos *et al.* 2006) mencionan que las muestras tomadas para análisis pueden ser de entre 90 y 180 kg. En este estudio, por la disponibilidad de infraestructura, se consideraron muestras de aproximadamente 450 kg/día en MXL, de 260 kg/día en ENS y de 100 kg/día en SQ y VG.

Los residuos de las muestras se clasificaron, pesaron, registraron y agruparon en 14 categorías de acuerdo con lo propuesto por SCS Engineers (SCS Engineers 2009).

Índice de generación de metano (k)

Para cada una de las cinco regiones climáticas de México, el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 tiene asignado valores de k para las cuatro categorías de degradación de residuos: muy rápida (DR), moderadamente rápida (DMR), moderadamente lenta (DML), y muy lenta (DL). Estos varían con base en la precipitación promedio anual en el clima de la región donde está ubicado el relleno sanitario (RESA), tipo de residuo y clima (SCS Engineers 2009). Los valores correspondientes a la región climática donde se realizó el estudio (Región 5: Noroeste e Interior Norte) son: DR $k=0.10$, DMR $k=0.05$, DML $k=0.20$, DL $k=0.10$. Para determinar estos valores *in situ*, se realizó una modificación a los valores que proporciona dicho modelo con el porcentaje de los residuos que son catalogados dentro de cada categoría de residuos (ver Ecuación 1).

$$k_{ponderada} = \sum_{i=1}^9 (\%r_i \times vp) \quad (1)$$

donde $\%r_i$ es el porcentaje de residuos en cada categoría y vp es valor de k predeterminado por el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0 en cada una de las categorías de degradación.

Potencial de generación de metano (L_0)

Se siguieron los lineamientos marcados en las directrices del IPCC (2006) para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, en los cuales se menciona que si se cuenta con información del sitio se puede estimar L_0 empleando la Ecuación 2.

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times \frac{16}{12} \quad (2)$$

Donde L_0 es el potencial de generación, MCF es el factor de corrección para el metano, DOC es el carbono orgánico degradable (fracción), DOC_F es la fracción de carbono orgánico degradable asimilado, F es la fracción de CH_4 en el biogás y 16/12 es la constante estequiométrica.

La descripción de cada elemento que interviene en la Ecuación 2 se enuncia a continuación:

MCF (Factor de corrección de metano). Este es un ajuste de la estimación de la generación de biogás en el Modelo que toma en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos. El MCF varía dependiendo de la profundidad de los residuos y el tipo de RESA como lo definen las prácticas de manejo. El **cuadro I** resume los valores de MCF aplicados por el modelo (Kumar *et al.* 2004, IPCC 2006, SCS Engineers 2009). Para ello se realizaron entrevistas con el gerente de los SDF y observaciones *in situ*.

CUADRO I. FACTORES DE CORRECCIÓN DE METANO (MCF)

Manejo del sitio	Profundidad < 5m	Profundidad \geq 5m
Sin manejo	0.4	0.8
Con manejo	0.8	1.0
Semi aeróbico	0.4	0.5
Condición desconocida	0.4	0.8

DOC (Carbono orgánico degradable). El contenido de DOC esta expresado en la Ecuación 3, este es esencial para el cálculo de la generación de metano, depende de la composición de los residuos y varia de ciudad en ciudad (Kumar *et al.* 2004).

$$DOC = 0.40(A) + 0.17(B) + 0.15(C) + 0.30(D) \quad (3)$$

donde A es el % de los residuos que corresponde al papel, cartón y los textiles, B es el % de los residuos que corresponde a los desechos de jardín y de los parques u otros desechos orgánicos putrescibles (excluidos los alimentos), C es el % de los residuos que corresponde a los restos de alimentos, y D es el % de los residuos que corresponde a madera y paja.

DOC_F (Fracción de carbono orgánico degradable asimilado). Esta es una porción de DOC que es convertida en biogás (ver Ecuación 4). El valor predeterminado utilizado por el IPCC (2002) es de 0.77. La estimación con base en el modelo teórico

que varía sólo con la temperatura en la zona anaerobia del RESA (IPCC 2002, Kumar *et al.* 2004).

$$\text{DOC}_F = 0.14T + 0.28 \quad (4)$$

donde T es la temperatura en °C.

F (Fracción de CH₄ en el biogás). La fracción de metano en el biogás se asume en un 0.5, debido a que el biogás se compone principalmente en un 50 % de metano y un 50 % de bióxido de carbono con menos del 1 % de otros constituyentes trazos (IPCC 2002, 2006, Kumar *et al.* 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de residuos

En el **cuadro II** se muestra la composición de los residuos sólidos domésticos (RSD) de las comunidades estudiadas. Se puede apreciar que el porcentaje de componentes orgánicos promedio total de las comunidades estudiadas es de aproximadamente 64 % y el de los componentes inorgánicos es de 36 %. ENS presenta el mayor porcentaje de residuos orgánicos con 68.57 %, posteriormente MXL con 66.43 % y por último las dos comunidades rurales SQ y VG con 62.42 % y 58.15 % respectivamente.

CUADRO II. COMPOSICIÓN DE LOS RSD EN PORCENTAJE (%) DE LOS SITIOS DE ESTUDIO DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Subproductos de los RSD	MXL	ENS	SQ	VG
Comida	7.64	36.20	30.15	26.54
Papel y cartón	21.37	11.36	10.33	8.59
Poda (jardines)	20.48	3.20	4.12	8.48
Madera	1.70	0.35	0.46	0.28
Caucho, piel, huesos y paja	0.14	0.22	0.40	0.46
Textiles	9.70	6.24	8.98	5.78
Papel higiénico	4.30	10.72	7.79	8.03
Otros orgánicos	1.10	0.28	0.17	0.00
Pañales	3.18	5.83	8.93	14.07
Metales	2.95	2.56	2.98	2.33
Construcción y demolición	1.79	0.72	1.47	0.24
Vidrio y cerámica	6.04	4.73	3.41	4.88
Plásticos	15.50	12.34	15.31	14.60
Otros inorgánicos	4.11	5.26	5.48	5.73

Índice de generación de metano (*k*)

Se obtuvo un *k* promedio para Baja California de 0.0404 por año (MXL *k*=0.0307, ENS *k*=0.0482, SQ *k*=0.0420, VG *k*=0.0408). La estimación de estos valores se puede observar en el **cuadro III**. Cabe señalar que los subproductos con categorías de degradación

inerte (metales, construcción y demolición, vidrio y cerámica, plásticos y otros inorgánicos) no fueron manejados en la determinación de *k*.

Los valores de *k* obtenidos se encuentran dentro de los rangos mencionados en otras investigaciones (WBG 2004, ETEISA 2006) y concuerdan con las características de los sitios, principalmente MXL (*k*=0.0307) y ENS (*k*=0.0482), para los cuales, el valor va de 0.02 para sitios secos a 0.07 para sitios húmedos. Los sitios relativamente secos son los que se encuentran localizados en zonas que reciben menos de 500 mm de lluvia al año y los sitios húmedos son los localizados en zonas que reciben más de 1000 mm de lluvia al año (WBG 2004).

Potencial de generación de metano (L₀)

El valor promedio de L₀ para Baja California es de 73.645 m³/t de residuo (**Cuadro IV**). Se sabe que a mayor contenido de celulosa le corresponde un mayor valor de L₀ (SCS Engineers 2009). Sin embargo, en el caso de MXL cuyos RSD presentan el mayor contenido de celulosa, no se puede considerar el mayor valor de L₀ debido a su MCF. En el caso de MXL, SQ y VG, el MCF se consideró igual a 0.8, debido a que el sitio se considera sin manejo, con una profundidad ≥ 5m. Es decir, el sitio tiene parcialmente controlada la colocación de residuos, quema de residuos depositados cada determinado periodo, existen pepenadores en el SDF, y los residuos son cubiertos con tierra en periodos que dependen del volumen depositado. Para ENS, este valor es igual a 1, debido a que el sitio se considera con manejo con una profundidad ≥ 5m. Es decir, el sitio tiene controlada la colocación de los residuos (residuos directos a un área de disposición específica, no hay acceso a pepenadores, y no se han registrado incendios), además los residuos son compactados mecánicamente, y cubiertos diariamente con material arcilloso, producto de la excavación de las celdas.

En México, los estudios realizados para calcular la generación de biogás en RESA no han seguido la misma metodología, ni utilizado el mismo modelo matemático, por lo que es importante estandarizar criterios para poder realizar comparaciones válidas respecto a la evaluación de recuperación de biogás (Aguilar-Virgen *et al.* 2011). Ejemplos de ello son los casos de Ensenada, Chihuahua y Querétaro. En Ensenada en 2006 se realizó un estudio en el antiguo vertedero controlado, utilizándose los datos de la caracterización de residuos de ocho años atrás para ajustar el resultado de los parámetros *k* y L₀, 0.05 por año y 60 m³/t respectivamente (SCS Engineers 2007). En Chihuahua y Querétaro, el ajuste de los valores se

CUADRO III. DETERMINACIÓN DE k EN LOS SITIOS DE ESTUDIO DE BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Subproductos de los RSD	Categoría de degradación	Valor k^a Región 5	Valor de k^b modificado			
			MXL	ENS	SQ	VG
Comida	DR	0.10	0.0076	0.0362	0.0302	0.0265
Papel y cartón	DML	0.02	0.0043	0.0023	0.0021	0.0017
Poda (jardines)	DMR	0.05	0.0102	0.0016	0.0021	0.0042
Madera	DL	0.01	0.0002	0.0000	0.0000	0.0000
Caucho, piel, huesos y paja	DL	0.01	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Textiles	DML	0.02	0.0019	0.0012	0.0018	0.0012
Papel higiénico	DMR	0.05	0.0022	0.0054	0.0039	0.0040
Otros orgánicos	DR	0.10	0.0011	0.0003	0.0002	-
Pañales ^c	DR	0.10	0.0032	0.0012	0.0018	0.0028
k ponderada			0.0307	0.0482	0.0420	0.0406

^a Valores que son determinados por el Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0

^b Valores calculados de acuerdo con los porcentajes obtenidos en el **cuadro II**

^c En los pañales se asume 20 % orgánico y 80 % inorgánico

CUADRO IV. DETERMINACION DE L_0 EN LOS SITIOS DE ESTUDIO DE BAJA CALIFORNIA, MEXICO

Sitio de estudio	MCF ^a	DOC ^b	DOC _F ^c	F ^d	Constante	L_0 (m ³ /t)
MXL	0.8	0.1930	0.77	0.5	16/12	79.529
ENS	1	0.1741	0.77	0.5	16/12	89.371
SQ	0.8	0.1620	0.77	0.5	16/12	66.528
VG	0.8	0.1447	0.77	0.5	16/12	59.423

^a MXL, SQ y VG se consideran sitios sin manejo y ENS con manejo, todos con una profundidad ≥ 5 m

^b Valores calculados de acuerdo con los porcentajes obtenidos en el **cuadro II**

^c Valor predeterminado utilizado por el IPCC (2002)

^d Valor asumido en 0.5 (IPCC 2002, 2006)

realizó de acuerdo con la composición de residuos de Estados Unidos de América (EUA) y se obtuvieron tres niveles de k de acuerdo con el grado de degradación (DR, degradación rápida; DM, degradación mediana; y DL, degradación lenta). En Chihuahua los valores de k fueron: 0.100, 0.020 y 0.005 por año y L_0 de 63.2 m³/t (SCS Engineers 2005a). En Querétaro los valores de k fueron: 0.140, 0.028 y 0.007 por año y L_0 de 73.1 m³/t (SCS Engineers 2005b). En Monterrey, Nuevo León, México, se siguió una metodología diferente para estimar los parámetros k y L_0 . En el caso de k (0.066 por año) se utilizó el Método 2E de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA). Para L_0 (95.4 m³/t) se utilizaron valores típicos de L_0 de proyectos de biogás desarrollados en EUA, y se ajustó el valor considerando la precipitación pluvial y la diferencia en la composición de los residuos depositados en Monterrey (LFG Consult 2007).

En América Latina (AL), se encontraron diversos estudios que se basan principalmente en la composición de EUA para hacer los ajustes a los parámetros del modelo. Tales son los casos de Lima,

Perú (SCS Engineers 2005c); Guatemala, Guatemala (SCS Engineers 2005d); Manizales, Colombia (SCS Engineers 2005e); Montevideo, Uruguay (SCS Engineers 2005f), en donde los valores para L_0 oscilaron entre 68 y 91 m³/t y para k en DR estuvieron entre 0.1 y 0.4, DM de 0.02 a 0.08, y DL de 0.005 a 0.02 por año. No obstante, estos valores pudieran diferir con los valores *in situ* debido a que el manejo y la composición de los residuos generados en EUA son diferentes a los de AL, aunado a las características propias del lugar (clima, hidrología y otros).

CONCLUSIONES

A pesar de que existen modelos que proporcionan valores establecidos de k y L_0 , utilizar valores *in situ* reduce la posibilidad de sobreestimar o subestimar el potencial de generación de biogás. Para ello, se debe de conocer la composición de residuos. En la presente investigación se reporta un alto grado de componentes orgánicos (64 % en promedio) dispuestos en cuatro SDF de Baja California.

La composición de residuos orgánicos en ENS y MXL son muy similares (68.57 % y 66.43 % respectivamente). No obstante, la distribución de porcentajes de residuos en las diferentes categorías (principalmente en residuos de comida y poda) marcó diferencias en los valores de k , esto porque el valor de k está relacionado con el periodo de degradación, el cual es diferente en cada uno de los tipos de residuos. El SDF cuyos RSD contienen una mayor cantidad de celulosa es el de MXL, pero el hecho de no cumplir con los requisitos necesarios para ser considerado un RESA, afecta la producción de metano y disminuye el valor de L_0 .

Es importante recalcar que estas cuatro comunidades pertenecen a una misma región de México, por lo que de acuerdo con los modelos preestablecidos tienen un mismo valor de k y L_0 . Sin embargo, se demostró que no es posible generalizar dichos valores porque cada lugar presenta características propias.

Por lo anterior, se recomienda que cuando se desarrollen proyectos de estimación de biogás en países de AL, se evite la utilización de información proveniente de otros países, como EUA, que presentan notables diferencias con respecto a los países latinoamericanos. Lo adecuado sería comenzar a desarrollar sus propios parámetros de ajuste, con métodos y criterios estandarizados para que la información generada pueda ser comparada entre lugares que tienen similitudes en composición y manejo de residuos, clima, culturas, entre otros.

REFERENCIAS

- Aguilar-Virgen Q., Taboada-González P.A., Ojeda-Benítez S. (2011). Modelo Mexicano para la estimación de la generación biogás. *Ingeniería* 15, 37-45.
- Batool S.A. y Chuadhry M.N. (2008). The impact of municipal solid waste treatment methods on greenhouse gas emissions in Lahore, Pakistan. *Waste Manag.* 29, 63-69.
- Chiemchaisri C. y Visvanathan C. (2008). Greenhouse gas emission potential of the municipal solid waste disposal sites in Thailand. *J. Air Waste Manage.* 58, 629-635.
- Chung S. y Poon C. (2001). Characterisation of municipal solid waste and its recyclable contents of Guangzhou. *Waste Manage. Res.* 19, 473-485.
- ETEISA (2006). Estudio de prefactibilidad para el aprovechamiento del biogás generado en el relleno sanitario "Don Juanito", Municipio de Villavicencio, Colombia. Estudios y Técnicas Especializadas en Ingeniería. [en línea]. <http://www.bioagricoladellano.com.co/web-site/documentos/?C=M;O=A 02/04/2010>.
- Garg A., Achari G. y Joshi R.C. (2006). A model to estimate the methane generation rate constant in sanitary landfills using fuzzy synthetic evaluation. *Waste Manage. Res.* 24, 363-375.
- Gidarakos E., Havas G. y Ntzamilis P. (2006). Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete. *Waste Manage.* 26, 668-679.
- Gómez G., Meneses M., Ballinas L. y Castells F. (2008). Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico. *Waste Manage.* 28, 2465-2471.
- IPCC (2002). CH₄ Emissions from Solid Waste Disposal. En: Background Papers - IPCC Expert Meetings on Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan, pp. 419-439.
- IPCC (2006). Waste. En: 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Institute for Global Environmental Strategies (IGES), Japan.
- Karousakis K. y Birol E. (2008). Investigating household preferences for kerbside recycling services in London: A choice experiment approach. *J. Environ. Manag.* 88, 1099-1108.
- Kumar S., Gaikwad S.A., Shekdar A.V., Kshirsagar P.S. y Singh R.N. (2004). Estimation method for national methane emission from solid waste landfills. *Atmos. Environ.* 38, 3481-3487.
- LFG Consult (2007). Case studies of CDM - Landfill Gas Projects Monterrey, Mexico (Benlesa). World Bank Group. [en línea]. <http://siteresources.worldbank.org/INTLACREGTOPURBDEV/Resources/840343-1178120035287/ModelMonterrey.pdf 16/06/2008>.
- Machado S.L., Carvalho M.F., Gourc J., Vilar O.M. y Nascimento J.C.D. (2009). Methane generation in tropical landfills: Simplified methods and field results. *Waste Manage.* 29, 153-161.
- Ojeda-Benítez S., Armijo-de Vega C. y Ramírez-Barreto M.E. (2003). Characterization and quantification of household solid wastes in a Mexican city. *Resour. Conservat. Recycl.* 39, 211-222.
- Scharff H. y Jacobs J. (2006). Applying guidance for methane emission estimation for landfills. *Waste Manage.* 26, 417-429.
- SCS Engineers (2005a). Estudio de pre-factibilidad para la recuperación y utilización en el relleno sanitario de Chihuahua, Chihuahua, México. World Bank Group. [en línea]. http://www.banco mundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish_Portuguese/Chihuahua_PreFeasibility_Study_Spanish.pdf 15-06-2008.
- SCS Engineers (2005b). Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía en

- el relleno sanitario de Querétaro, Querétaro, México. World Bank Group. [en línea]. http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish_Portuguese/Chihuahua_PreFeasibility_Study_Spanish.pdf 15-06-2008.
- SCS Engineers (2005c). Report of the pump test and pre-feasibility study for landfill gas recovery and energy production at the Huaycoloro landfill Lima, Peru. World Bank Group. [en línea]. http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/English/Huaycoloro_PreFeasibility_Study_English.pdf 14/06/2008.
- SCS Engineers (2005d). Informe de la prueba de extracción y estudio de pre-viabilidad para la recuperación de biogás en el relleno sanitario de El Trébol, Ciudad de Guatemala, Guatemala. USEPA y USAID/Guatemala. [en línea]. www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/el_trebol_report_sp.pdf 14/06/2008.
- SCS Engineers (2005e). Estudio de pre-factibilidad de recuperación y utilización de biogás en el relleno sanitario de La Esmeralda Manizales, Colombia. World Bank Group. [en línea]. URL http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/PrefeasibilityStudies/Spanish_Portuguese/La_Esmeralda_PreFeasibility_Spanish.pdf 14/06/2008.
- SCS Engineers (2005f). Reporte de prueba de bombeo y estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía en el relleno sanitario de Montevideo, Montevideo, Uruguay. World Bank Group. [en línea]. http://www.bancomundial.org.ar/lfg/archivos/Pre feasibilityStudies/Spanish_Portuguese/Montevideo_PreFeasibility_Study_Spanish.pdf 14/06/2008.
- SCS Engineers (2007). Informe de la prueba de extracción y estudio de pre-factibilidad para recuperación y utilización de biogás en el relleno sanitario de Ensenada, México. World Bank Group.
- SCS Engineers (2009). Manual de Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0. USEPA. [en línea]. http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/manual_del_usuario_modelo_mexicano_de_biogas_v2_2009.pdf 07/12/2009.
- SECOFI (1985). Norma Mexicana NMX-AA-015-1985. Protección al Ambiente-Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Muestreo-Método de Cuarteo. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, México.
- Tchobanoglous G., Theisen H. y Vigil S. (1994). *Gestión integral de residuos sólidos*. McGraw-Hill, Madrid, España, 1087 pp.
- WBG (2004). Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean. World Bank Group [en línea]. http://www.bancomundial.org.ar/lfg/gas_access_008.htm 02/04/2010.
- Zeng Y., Trauth K.M., Peyton R.L. y Banerji S.K. (2005). Characterization of solid waste disposed at Columbia Sanitary Landfill in Missouri. *Waste Manage. Res.* 23, 62-71.