

# Estimación de emisiones atmosféricas provenientes de vertederos de residuos sólidos urbanos

Discusión caso Valle de México

Adolfo Hernández M.<sup>1</sup>, José Dávila G.<sup>2</sup> y Violeta Mugica A.<sup>1</sup>

Departamento de Ciencias Básicas<sup>1</sup>, Departamento Energía<sup>2</sup>

Universidad Autónoma Metropolitana

Ciudad de México, D.F.; México

aherm@correo.azc.uam.mx

**Abstract**— Atmospheric emission estimation from municipal solid waste landfills is mainly based on first order kinetics models and, currently, several computational tools to carry out the calculation have been developed. However, have not a discussion about the differences between that models and their repercussions in the emission inventories. In order to show the differences; in this document is presented the estimation of landfill gas emissions in the Mexico City Metropolitan Area and the differences between three models. It was observed that the model proposed by the Intergovernmental Panel on Climate Change disagrees significantly front other used models, mainly in the years following the closure of landfills, that would have important implications.

**Keyword**— *Landfill Gas Emissions, IPCC waste model, MMB, LandGEM.*

**Resumen**— La estimación de las emisiones atmosféricas provenientes de vertederos de residuos sólidos urbanos se basa principalmente en modelos cinéticos de primer orden y, actualmente, se han desarrollado varias herramientas computacionales para realizar el cálculo. Sin embargo, no hay una discusión sobre las diferencias entre esos modelos. Con el objetivo de mostrar las diferencias; en este documento se presenta la estimación de las emisiones gaseosas provenientes de vertederos en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y las diferencias entre tres modelos. Se observó que el modelo propuesto por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático discrepa significativamente de otros modelos usados, principalmente en los años posteriores al cierre de los vertederos, que podrían tener importantes repercusiones.

**Palabras claves**— *Emisiones Gaseosas de Vertederos, IPCC waste model, MMB, LandGEM.*

## I. INTRODUCCIÓN

Los vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU), emiten importantes cantidades de contaminantes a la atmósfera, al suelo y a los cuerpos de agua, a lo que se suman los problemas de olores fétidos y la proliferación de vectores. Y aunque en la modalidad de relleno sanitario controlado, sus emisiones se pueden reducir significativamente; aún en éstos existen emisiones fugitivas equivalentes hasta al 70% del total, que escapan por diferentes mecanismos [1].

En países como México, los vertederos a cielo abierto son los más comúnmente encontrados, seguidos de los entierros de basura [2], los cuales suelen ser abandonados posterior a su cierre. En consecuencia; se han reportado severas afectaciones a la salud de las poblaciones aledañas a los vertederos, que van desde cefaleas, vómito y miocarditis. Malformaciones congénitas, enfermedades respiratorias y gastrointestinales, son otros problemas de salud asociados a la exposición a los gases emitidos por vertederos de basura reportados en diversos estudios [3] [4] [5].

En la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), a raíz del cierre del vertedero “Neza-Bordo”, los RSU han sido dispuestos en vertederos ubicados en los alrededores de la Ciudad de México, cerca de zonas urbanas y sin el control exigido para la contención de las emisiones contaminantes, tales

son los casos de los vertederos de Cuautitlán, Tepetzotlán, Milagro y Cañada. Esta nueva distribución geográfica de los sitios de disposición de RSU tiene impactos de corto y mediano alcance, pero se esperaría que las emisiones de metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ), compuestos orgánicos volátiles (VOCs, por sus siglas en inglés) y tóxicos provenientes de los vertederos [6] también tengan impactos de largo alcance influyendo sobre la calidad del aire del Valle de México.

En este documento se presentan tres modelados de emisiones contaminantes provenientes de vertederos identificados en el Valle de México y el marco teórico de su importancia ambiental con el objetivo de establecer las bases técnicas para futuros estudios relacionados con la calidad del aire.

## II. VERTEDEROS DE RSU EN LA ZMVM

Hasta su cierre en el año 2011, la Ciudad de México depositaba sus RSU en el vertedero denominado Bordo Poniente. En este lugar quedaron almacenados aproximadamente 74 millones de toneladas de basura los cuales se han enterrado y para el que se han planteado varios planes de aprovechamiento del biogás que ahí se genera, mientras tanto el vertedero sigue emitiendo cantidades solo estimables de gases contaminantes a la atmósfera.

Posteriormente a su cierre, los residuos de la Ciudad de México fueron enviados a vertederos privados instalados en la periferia de la ciudad, la mayoría dentro de la ZMVM. Así, de acuerdo a los Inventarios de Residuos Sólidos [7] [8], seis vertederos han recibido grandes cantidades de RSU, tres de ellos fuera de la ZMVM. Debido al enorme volumen que representa la generación de residuos sólidos de la zona, algunos de ellos ya han sido clausurados por rebasar su capacidad de manejo y almacenaje. Ante la saturación de los vertederos; se recurrió a otros vertederos en municipios de Tepetzotlán, Tlalnepantla y Zumpango. De esta manera, finalmente la basura solamente es enterrada y abandonada por las empresas operadoras. En la figura 1 se muestra la localización de los vertederos identificados en la zona. Es importante aclarar que en este documento solamente se analiza el caso de los vertederos oficialmente reconocidos y no aquellos que existen de manera clandestina.

A partir de diferentes fuentes, entre ellas los Inventarios de Residuos Sólidos de la Ciudad de México y fuentes hemerográficas, se estimaron los volúmenes de RSU depositados en los diferentes vertederos. En resumen, al 2014, en los alrededores de la Ciudad de México se encontraban, almacenados un aproximado de 175 millones de toneladas de RSU, sin considerar los vertederos clandestinos. En el Anexo I se puede consultar la tabla con los datos detallados.

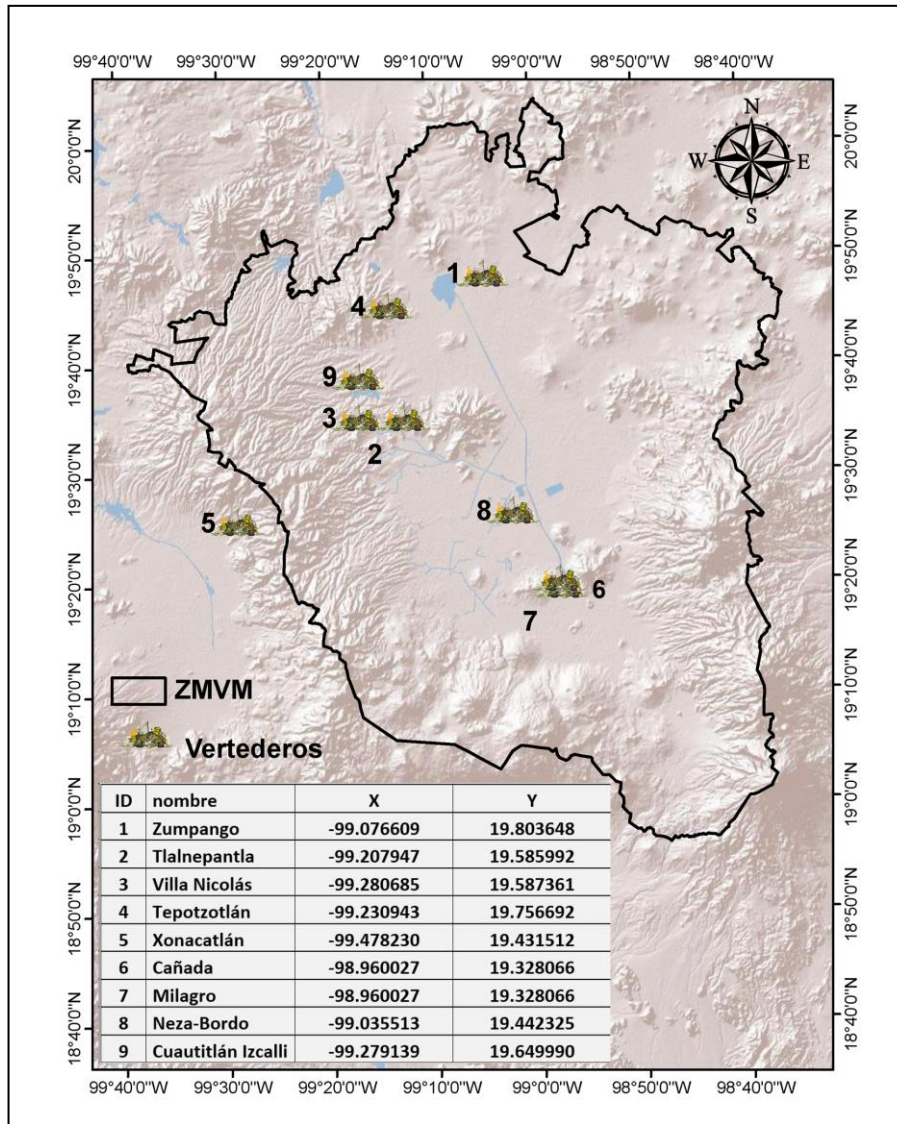


Fig.1. Localización de los vertederos de RSU en la ZMVM.

### III. MARCO TEÓRICO

Las emisiones atmosféricas generadas por los RSU se modelan generalmente mediante una cinética de descomposición de primer orden, para lo cual se han desarrollado varias herramientas de cálculo. La base de cálculo varía entre los modelos; una alternativa es utilizar la fracción degradable de los residuos sólidos urbanos conocida como compuestos orgánicos degradables (DOC, por siglas en inglés), la meteorología, la composición de los RSU, la población servida, entre otras variables. La constante cinética es función de varios factores, aunque son considerados principalmente la composición y la meteorología.

Entre los modelos desarrollados están el propuesto por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), IPCC waste model [9], el modelo LandGEM V3.02 [10] desarrollado por la U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) y el Modelo Mexicano de Biomasa, MMB [11] también desarrollado por la USEPA para las condiciones de México.

En el IPCC waste model el contenido de DOC es la base del cálculo y la constante cinética de generación de metano es diferenciada para cada tipo de desecho observado en la caracterización de los RSU (fracciones de residuos de alimentos, jardinería, papel, madera y maleza, textiles, pañales desechables, lodos de aguas residuales y residuos industriales) de tal manera que las emisiones totales son resultado de la sumatoria de las emisiones de cada fracción de acuerdo al tiempo de residencia en el vertedero y restando el metano captado o recuperado (Ecuación 1).

$$CH_{4,T} = \left( \sum x DDOC_{m,T-1} (1 - e^{-kT}) (F) (16/12) - R_T \right) (1 - OX_T) \quad (1)$$

En donde:  $x$  es la fracción másica unitaria del material,  $DDOC_{m,T}$  es la masa degradable al tiempo  $T$ ,  $F$  es la fracción de metano en el gas emitido,  $R_T$  es la cantidad de metano recuperado y  $OX_T$  es el factor de oxidación al año  $T$ . Este último factor de oxidación se ajusta a cero para vertederos sin control adecuado y la falta de información que sustente un valor diferente.

El modelo LandGEM también utiliza una cinética de primer orden para estimar la generación anual de metano  $Q_{CH_4}$ , pero la base de cálculo es la masa de residuos aceptados en el vertedero al año  $i$ ,  $M_i$ , la cual se multiplica por la capacidad de generación de metano,  $L_0$ , y la constante cinética de generación de metano al año decimal  $i,j$ ,  $K_{i,j}$  (Ecuación 2).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k L_0 \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{i,j}} \quad (2)$$

Si bien, el metano, el dióxido de carbono y el vapor de agua son los principales constituyentes de las emisiones atmosféricas provenientes de los vertederos de RSU, también se emite un conjunto de compuestos orgánicos no metano (CONM) y algunos gases inorgánicos que pueden tener propiedades tóxicas. El modelo del IPCC únicamente permite estimar las emisiones de metano y dióxido de carbono, pero el modelo LandGEM estima emisiones de gases inorgánicos y compuestos orgánicos no metano (CONM) con base en la especiación de la base de datos Compilation of Air Pollutant Emission Factors (AP-42) de la USEPA. Por su parte, una limitante importante del MMB es que solamente calcula las emisiones del metano como biogás y no determina  $CO_2$  ni otros compuestos orgánicos volátiles.

El MMB es una versión regionalizada del modelo LandGEM por lo tanto utiliza un modelo cinético similar, pero en donde se adecuaron coeficientes para ajustarse a los datos medidos en vertederos de diferentes partes del país (Ecuación 3).

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 2k L_0 \left( \frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{i,j}} (MFC)(F) \quad (3)$$

En donde aplica la misma nomenclatura que el modelo LandGEM.  $MFC$  es el factor de corrección de metano y  $F$  es el factor de ajuste por quemas o incendios en el vertedero [12].

Aunado a la información del AP-42, en México se determinó, para un vertedero, el perfil de emisiones de los CONM [13], el cual referiremos como perfil local y se presenta en la tabla I.

Tabla I. Perfil local de emisiones provenientes del vertedero Prados de la Montaña, “A” [13].

Especie	%masa	Especie	%masa	Especie	%masa
M/p-Xileno	26.48	2-Metilpentano	1.15	Metiltolueno	0.61
o-Xileno	9.74	1,2,4-Trimetilbenceno	1.07	n-Nonano	0.57
Etilbenceno	6.92	2,2,4-Trimetilpentano	1.00	n-Heptano	0.50
Propano	4.77	MTBE	0.95	2-Metilhexano	0.48
Tolueno	4.28	n-Hexano	0.95	Etileno	0.46
n-Butano	3.46	Acetileno	0.9	n-Octano	0.38
i-Pentano	2.92	n-decano	0.83	Metilciclopentano	0.35
n-Pentano	1.55	Benceno	0.68	2,3,4Trimetilpentano	0.35
i-Butano	1.31	3-Metilhexano	0.67	Estireno	0.28

#### IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL INVENTARIO DE EMISIONES

Los gases emitidos de los vertederos incluyen una gran variedad de compuestos orgánicos además del metano el cual es el más estudiado por su mayor concentración en el biogás. Entre estos se encuentran etano, tolueno, mercaptanos, propanol, diversos cloro-carbonos y benceno, por mencionar los más relevantes.

El inventario de emisiones se calculó utilizando tres modelos, el IPCC waste model y el LandGEM V.3.02 y el MMB, cuyos resultados se muestran en las figuras 2, 3 Y 4 respectivamente. Los datos de cantidad RSU dispuestos en cada vertedero se presentan en el anexo I. En la tabla II que se presenta a continuación se resumen los parámetros con los que se corrieron los modelos.

Tabla II. Principales parámetros de los modelos de emisiones.

Parámetro	IPCC waste model	MMB	LandGEM
<b>Fracción de CH<sub>4</sub></b>			
(F)	0.5	0.5	0.5
<b>Clima</b>	húmedo	Distrito Federal	Convencional
<b>Composición de los RSU</b>	Alimentos= 0.3487 Jardinería= 0.098 Papel= 0.1848 Madera y cartón= 0.0195 Textiles= 0.0577 Pañal= 0 Lodos= 0 industriales= 0	Alimentos= 0.384 Jardinería= 0.08 Papel= 0.15 Madera y cartón= 0.01 Textiles= 0.04 Pañal= 0.02 Lodos= 0 industriales= 0	no explícito
<b>Constante cinética (k, años<sup>-1</sup>)</b>	Alimentos= 0.185 Jardinería= 0.1 Papel= 0.06 Madera y cartón= 0.03 Textiles= 0.04 Pañal= 0.05 Lodos= 0.06 industriales= 0.05	Rápida= 0.16 Moderadamente Rápida= 0.075 Moderadamente Lenta= 0.032 Lenta= 0.016	0.05
<b>Potencial de Generación (Lo, m<sup>3</sup>-Mg<sup>-1</sup>)</b>	No explícito	Rápida= 55.2 Moderada Rápida= 110.3 Moderadamente Lenta= 171 Lenta= 161.8	100



Se pueden observar diferencias significativas entre los resultados de los modelos. En primer lugar; durante los años de operación de los vertederos, el modelo IPCC da lugar a una tasa de emisiones inicial más acelerada que LandGEM y MMB, sin embargo; posteriormente, las emisiones decaen mucho más rápido en el modelo del IPCC de tal manera que las emisiones de gases de los vertederos se agotarían aproximadamente en el año 2030. Lo cual coincide con el periodo de años al que está limitado el modelo. En cambio, en los modelos LandGEM y MMB las emisiones son aún significativas para el año 2030 ya que la tasa de emisiones decae más lentamente. También se puede resaltar el volumen de emisiones máximo que alcanza el modelo MMB es significativamente menor que los estimados por los modelos LandGEM e IPCC (MMB=227,391 ton de CH<sub>4</sub>-año<sup>-1</sup>, IPCC=266,354 ton de CH<sub>4</sub>-año<sup>-1</sup> y LandGEM= 304,023 ton de CH<sub>4</sub>-año<sup>-1</sup>). En la figura 5 se muestran las estimaciones de cada modelo para las emisiones de metano, en donde se pueden se muestran con claridad dichas diferencias. En resumen, las diferencias entre los resultados de los modelos están asociadas con la diferencia en el modelo cinético y las bases de cálculo de los mismos.

En el Inventario de Emisiones se reportaron 179,677 ton-año<sup>-1</sup> de metano en el 2012 y 278,206 ton-año<sup>-1</sup> en el 2014. Comparativamente; los resultados aquí obtenidos con el modelo MMB son congruentes con los datos oficiales, lo cual era de esperarse ya que el Inventario también es estimado con este último modelo.

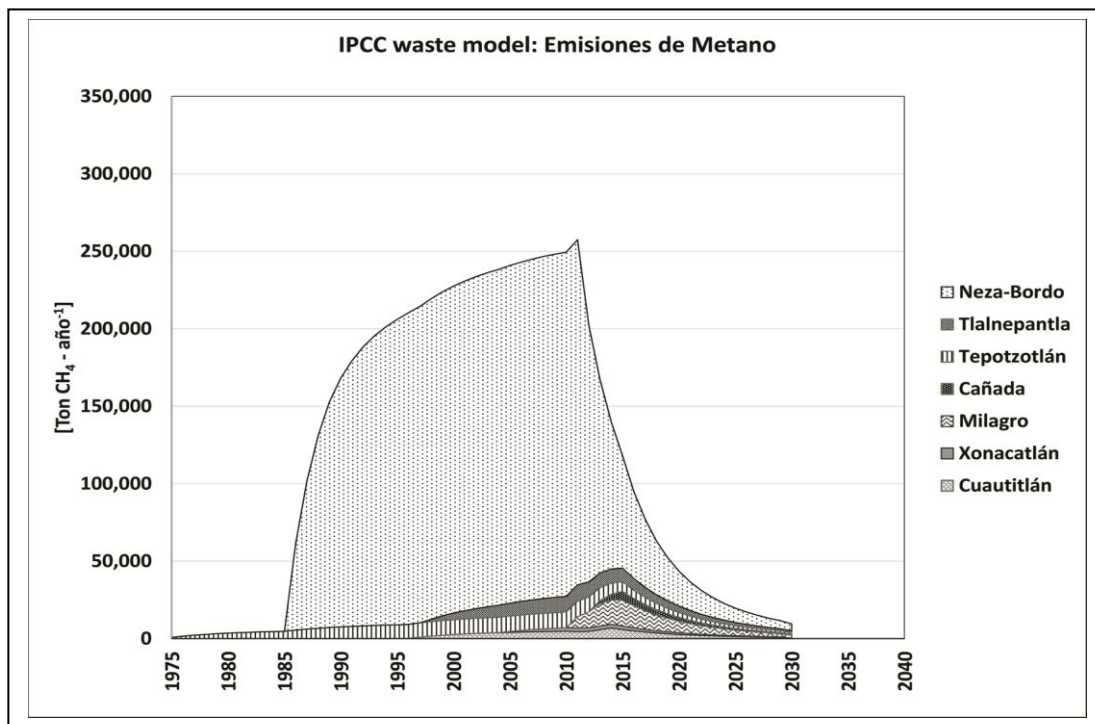


Fig. 2. Estimación de las emisiones de CH<sub>4</sub> empleando "IPCC waste model".

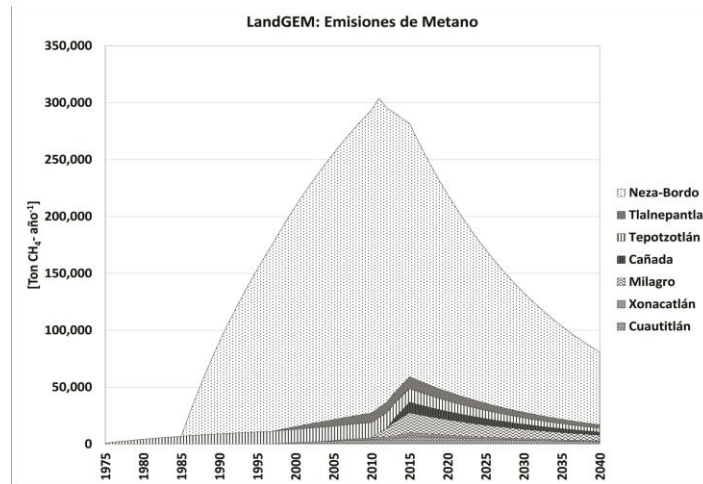


Fig. 3. Estimación de las emisiones CH<sub>4</sub> empleando “LandGEM V3.02”.

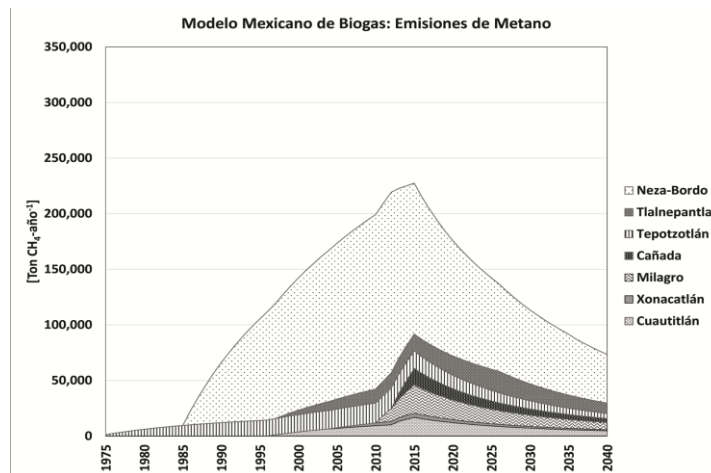


Fig. 4. Estimación de las emisiones CH<sub>4</sub> empleando el “Modelo Mexicano de Biomasa”.

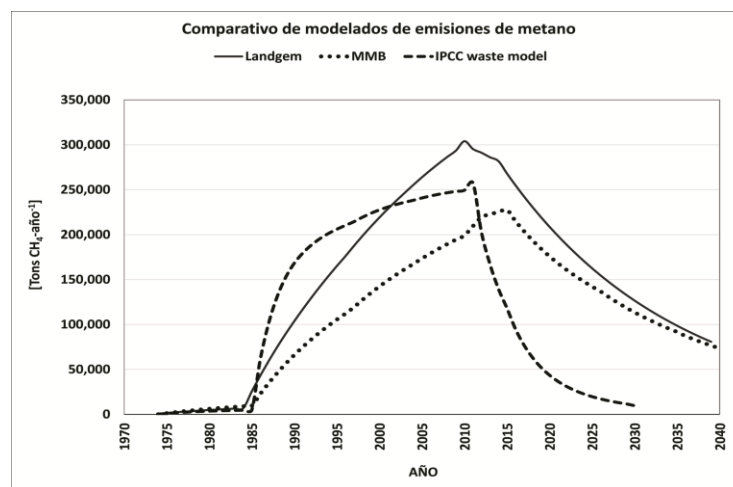


Fig. 5. Comparativos de salidas de los modelos.

El comportamiento posterior al cierre de los vertederos Neza-Bordo, del modelo IPCC waste muestra un decaimiento de la tasa de emisiones demasiado rápido lo cual es poco congruente con la realidad. Por

otra parte, el modelo MMB no genera más información de emisiones además del metano. Por estas razones el resto de las discusiones se centrarán en los resultados del modelo LandGEM.

El perfil de emisiones determinado en el caso del vertedero Prados de la Montaña y el del modelo LandGEM varían significativamente en especies identificadas y fracciones presentes. El cambio en especies identificadas se debe principalmente a que en el caso del perfil “A” (tabla I), solamente fueron analizadas un grupo de especies predefinido con la finalidad de comparar las diferentes fuentes de emisiones contaminantes atmosféricas en la ZMVM. Los cambios en las fracciones de las especies podrían estar asociadas a las condiciones propias de los vertederos en los que se determinaron los perfiles (ver tabla III).

Tabla III. Emisiones de COV y tóxicos, estimadas al año 2014.

Especiación LandGEM			
Especie	[Ton-año <sup>-1</sup> ]	Especie	[Ton-año <sup>-1</sup> ]
Etanol	954.926	Percloroetileno	8.496
cloruro de Vinilo	558.851	1,1-Dicloroetano	8.475
Tetracloruro de carbono	139.922	Metil mercaptano	6.79
Tricloroetileno	128.207	1,1,2,2-Tetracloroetano	6.588
2-Propanol	107.241	Benceno	5.295
Diclorofluorometano	69.028	Etilbenceno	5.099
Etil mercaptano	44.394	Pentano	4.292
Mercurio	43.777	Cloroetano	4.011
Dimetil sulfuro	42.431	Hexano	3.725
Bromodichlorometano	30.658	Cloroformo	2.993
Propano	21.893	1,1,1-Tricloroetano	2.285
Sulfuro de hidrógeno	20.295	Diclorobenceno	2.162
Metil isobutil cetone	18.268	monóxido de carbono	1.576
Butano	18.122	1,2-Dicloroetano	1.448
dibromoetileno	17.425	Diclorodifluorometano	1.101
t-1,2-Dicloroetano	17.305	Clorobenceno	1.05
Etano	17.292	Clorodifluorometano	1.004
Acetona	14.507	1,2-Dicloropropano	0.726
Xilenos	13.128	1,1-Dicloroetano	0.692
Acilonitrilo	11.928	Clorometano	0.128
disulfuro de carbono	10.369	Carbonil sulfuro	0.022
Tolueno	9.685	Fluorotriclorometano	0.007
Diclorometano	9.548	Metil etil cetona	0.002
M/p-Xileno	3257	Acetileno	111
o-Xileno	1198	n-decano	102
Etilbenceno	851	Benceno	84
Propano	587	3-Metilhexano	82
Tolueno	526	Metiltolueno	75
n-Butano	426	n-Nonano	70
i-Pentano	359	n-Heptano	62
n-Pentano	191	2-Metilhexano	59
i-Butano	161	Etileno	57
2-Metilpentano	141	n-Octano	47
1,2,4-Trimetilbenceno	132	Metilciclopentano	43
2,2,4-Trimetilpentano	123	2,3,4-Trimetilpentano	43
MTBE	117	Estireno	34
n-Hexano	117		



Es de resaltar que muchas especies son del grupo de las sustancias tóxicas definido por la USEPA. Se observan altas emisiones de tolueno, etano, xilenos, benceno, diclorofluorometano y otras especies halogenadas. En la figura 6, se muestran las emisiones agrupadas, en donde resaltan la presencia de especies alifáticas y halogenadas.

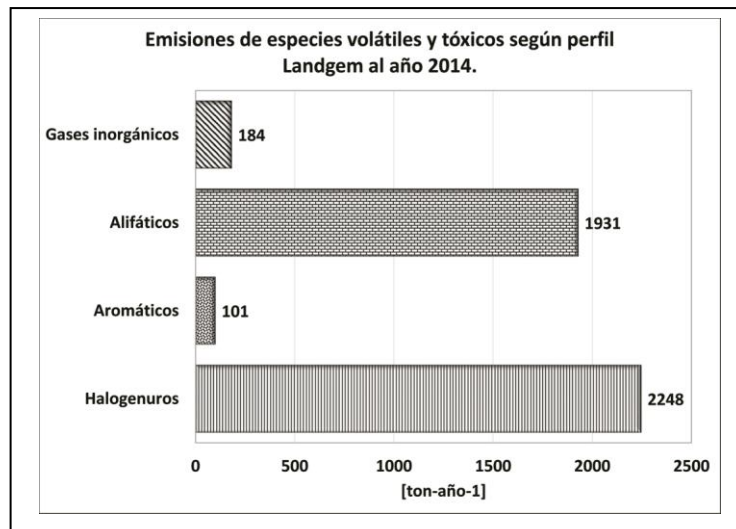
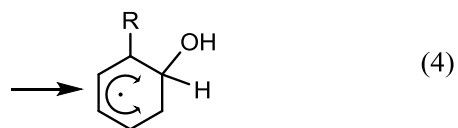
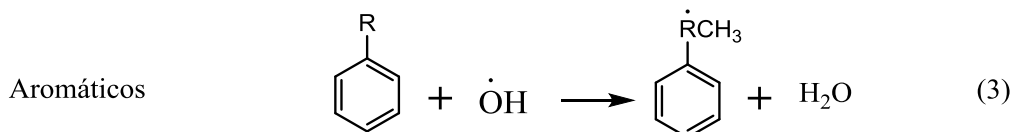
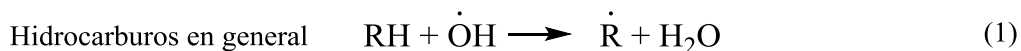


Fig. 6. Emisiones gaseosas de los vertederos en la ZMVM agrupadas según del perfil del modelo LandGEM.

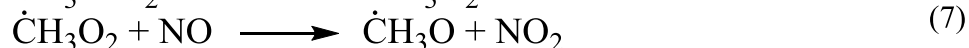
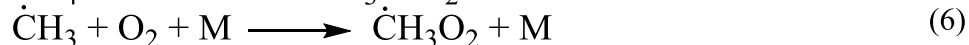
Los COV identificados en las emisiones de vertederos de RSU participan en las reacciones fotoquímicas, principalmente en reacción con el radical hidroxilo. Estos a su vez se oxidan para formar radicales peroxialquilo los cuales pueden consumir óxido de nitrógeno, promoviendo así la acumulación de ozono troposférico [14].

La velocidad de reacción depende de la especie química en cuestión. El metano tiene participación en la fotoquímica de acuerdo con la reacción 1, formando el radical metilo el cual puede reaccionar con el oxígeno del aire formando radicales peroxi-metilo. Éste último radical da lugar a la formación de radicales alcóxido y dióxido de nitrógeno al reaccionar con el óxido de nitrógeno promoviendo así el incremento de ozono [14].

Reacciones:



El metano no es considerado como una variable en el modelado de ozono troposférico dado a que la velocidad de la reacción 5 es baja ( $k=2.45 \times 10^{-12} \exp^{1775/T} \text{ cm}^3\text{-molecula}^{-1}\text{-s}^{-1}$ ). Así, actualmente la concentración de metano en los modelos de meso-escala se considera como una constante. Sin embargo, las concentraciones de este gas pueden ser elevadas definiendo en gran medida las denominadas concentraciones de fondo de ozono troposférico pues el metano representa el 96% de las emisiones de compuestos orgánicos totales generadas por los vertederos de RSU.



Además, las emisiones de metano provenientes de fuentes en general han sido clasificadas como un gas de efecto invernadero ya que se ha considerado que contribuyen al forzamiento radiativo positivo<sup>1</sup> a nivel global.

## V. CONCLUSIONES

En este documento se ha puesto a la vista el nivel de las emisiones contaminantes provenientes de los vertederos de residuos sólidos urbanos en la ZMVM. Ha quedado de manifiesto que la disposición de residuos sólidos urbanos significa una fuente de altas tasas de emisiones contaminantes atmosféricas en la ZMVM. Estas emisiones incluyen grandes volúmenes de especies químicas tóxicas y de gases de efecto invernadero; pero sobre todo altos volúmenes de metano. Las enormes cantidades de metano que se generan en los vertederos podrían mover el punto de equilibrio de la fotoquímica atmosférica aún, cuando la velocidad de reacción de este compuesto sea baja. La cinética química de las especies químicas presentes en los perfiles de emisiones indica que se podría estar promoviendo la elevación de los niveles de ozono troposférico en la región, lo cual podría ser la explicación de que las condiciones meteorológicas son el factor principal del cual depende que mejore o empeore la calidad del aire en la ZMVM. Por lo anterior sería recomendable realizar estudios de modelado de ozono troposférico considerando el metano como una variable.

Es de resaltar la gran cantidad de especies halogenadas y aromáticas reconocidas por su toxicidad que se emiten en los vertederos, por lo que sería recomendable realizar estudios de esas y otras especies a diferentes radios de distancia de los vertederos para determinar el perímetro de seguridad en función del volumen de RSU dispuestos en el sitio.

## RECONOCIMIENTOS

A la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Autónoma de Madrid por compartir sus experiencias en el tema y a J. Alberto Granados por su apoyo en la edición del presente manuscrito.

## REFERENCIAS

- [1] S. Jeuseelan, "A simple Mathematical model for anaerobic digestion process," *Wat. Sci. Tech.*, 1997.
- [2] S. Moreno-Pérez, "Residuos Sólidos Urbanos en México. La Infraestructura para la confinación y tratamiento de residuos sólidos urbanos," *Reporte CESOP*, vol. 51, Febrero 2012.
- [3] H. Fielder, C. Poon-King, S. Palmer, N. Moss and G. Coleman, "Assessment of impact on health of residents living near the Nant-y-Gwyddon landfill site: retrospective analysis," *British Medical Journal*, vol. 320, 2001.

<sup>1</sup> Cambio en el balance de radiación que tiende a calentar el planeta.

- 
- [4] K. Schrapp and N. Al-Mutairi, "Associated health effects among residences near Jeleeb Al-Shuyoukh landfill," *American Journal of Environmental Sciences*, vol. 6, no. 2, pp. 184-190, 2010.
- [5] C. D. Heaney, S. Wing, R. Campbell, D. Caldwell, B. Hopkins, D. Richardson and K. Yeatts, "Relation between malodor, ambient hydrogen sulfide, and health in a community bordering a landfill," *Environmental Research*, vol. 11, no. 6, pp. 847-852, August 2011.
- [6] USEPA, *Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills. Background Information for Proposed Standards and Guidelines*, Washington, DC.: U. S. Environmental Protection Agency, 1991.
- [7] SEDEMA, "Inventario de Residuos Sólidos del Distrito Federal 2012," Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal, México, D.F., 2013.
- [8] SEDEMA, "Inventario de Residuos Sólidos CDMX-2014," Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México, México, D.F., 2015.
- [9] IPCC, *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Volumen 5, Desechos*, Japón: The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.
- [10] USEPA, *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*, Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2005.
- [11] USEPA, *Manual del Usuario: Modelo Mexicano de Biogás*, Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2009.
- [12] G. Stege and J. Dávila, *User's Manual Mexico Landfill Gas Model*, Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2009.
- [13] E. Vega, V. Mugica, R. Carmona and E. Valencia, "Hydrocarbon source apportionment in Mexico city using the chemical mass balance receptor model.," *Atmospheric Environment*, vol. 34, no. 24, pp. 4121-4129, 2000.
- [14] J. Seinfeld and S. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*, 2a. ed., New York: J. Wiley, 2006.

## Anexo I. Cantidad RSU dispuestos en cada vertedero [Ton]

<b>Año</b>	<b>Cuautitlán</b>	<b>Xonacatlán</b>	<b>Milagro</b>	<b>Cañada</b>	<b>Tepotzotlán</b>	<b>Tlalnepantla</b>	<b>Neza-Bordo</b>
2014	592,395	104,755	1,095,365	1,174,935	22,995	315,250	0
2013	592,395	104,755	1,095,365	1,046,090	22,995	315,250	0
2012	223,745	104,755	1,799,715	1,046,090	18,615	315,250	0
2011	144,000	97,592	1,289,778	0	267,247	315,250	2740741
2010	144,000	97,592	1,289,778		267,247	315,250	2740741
2009	144,000	97,592	0		267,247	315,250	2740741
2008	144,000	97,592			267,247	315,250	2740741
2007	144,000	97,592			267,247	315,250	2740741
2006	144,000	97,592			267,247	315,250	2740741
2005	144,000	97,592			267,247	315,250	2740741
2004	144,000	97,592			267,247	315,250	2740741
2003	144,000	0			267,247	315,250	2740741
2002	144,000				267,247	315,250	2740741
2001	144,000				267,247	315,250	2740741
2000	144,000				267,247	315,250	2740741
1999	144,000				267,247	315,250	2740741
1998	144,000				267,247	315,250	2740741
1997	144,000				267,247	271,250	2740741
1996	31,465				267,247	0	2740741
1995	0				267,247		2740741
1994					267,247		2740741
1993					267,247		2740741
1992					267,247		2740741
1991					267,247		2740741
1990					267,247		2740741
1989					267,247		2740741
1988					267,247		2740741
1987					267,247		2740741
1986					267,247		2740741
1985					267,247		2740741
1984					267,247		0
1983					267,247		
1982					267,247		
1981					267,247		
1980					267,247		
1979					267,247		
1978					267,247		
1977					267,247		
1976					267,247		
1975					267,247		
1974					267,247		
<b>Total</b>	<b>3,600,000</b>	<b>1,095,000</b>	<b>6,570,000</b>	<b>3,267,115</b>	<b>10,220,000</b>	<b>5,630,500</b>	<b>74,000,000</b>