

## PERSPECTIVA BIOENERGÉTICA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL VALLE DE LERMA

Silvina Manrique<sup>1</sup>, Judith Franco<sup>2</sup>, Virgilio Núñez<sup>3</sup> y Lucas Seghezso<sup>2</sup>

Instituto de Investigación en Energía No Convencional (INENCO); Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED), Facultad de Ciencias Naturales.

Consejo de Investigaciones de la UNSa. (CIUNSa)

Universidad Nacional de Salta. Avda. Bolivia 5150, A 4408 FVY Salta, Argentina

Tel.: 0387-4255533 – E-mail: [silmagda@unsa.edu.ar](mailto:silmagda@unsa.edu.ar)

### RESUMEN

Los residuos sólidos urbanos (RSU), que tradicionalmente se han depositado a cielo abierto en el Valle de Lerma (Salta), podrían comenzar a ser dispuestos en un relleno sanitario regional en función de un proyecto provincial existente. El mencionado proyecto no incluye el aprovechamiento de la energía contenida en los RSU. En este trabajo se consideraron como recursos bioenergéticos potenciales. Dos clases de estimaciones fueron realizadas a partir de diferentes metodologías: a) poder calorífico de los RSU y potencial producción de electricidad y b) potencial biogás a obtenerse y potencial generación eléctrica. El aprovechamiento del potencial energético de estos residuos, sumado a los beneficios por mitigación de gases efecto invernadero, y demás aspectos ambientales, sin duda contribuirán a una mejor calidad de vida para la población del Valle.

**PALABRAS CLAVE:** residuos sólidos urbanos, bioenergía, metano, biogás, relleno sanitario regional, Valle de Lerma.

### 1. INTRODUCCION

En el mundo se desechan actualmente alrededor de 4 millones de toneladas de basura doméstica, urbana e industrial diariamente (Piña, 2007). Un 30% de estos residuos se entierran en rellenos sanitarios y el resto constituye un serio problema desde el punto de vista ecológico, higiénico, sanitario, político, social, económico. El costo de la recolección, transporte y eliminación es cada vez más cara, en virtud de que se desaprovecha el potencial energético de estos residuos (Acurio et al., 1998).

Por su alto contenido de materia orgánica, los RSU dispuestos en los vertederos emiten el conocido *landfill gas* o gas de relleno sanitario (GRS), que está constituido típicamente por un 40-60% de CH<sub>4</sub> y se conoce comúnmente como biogás (Zamorano et al., 2007). El metano, gas con un alto poder calorífico, es el tercer gas de efecto invernadero (GEI) más importante después del vapor de agua y CO<sub>2</sub>. Sobre un periodo de 100 años, el potencial de calentamiento global de CH<sub>4</sub> es de 25 veces que igual masa de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2007; Stern et al., 2007). Las concentraciones de CH<sub>4</sub> han incrementado en 30% en los últimos 25 años (IPCC, 2007) y multiplicadas por un factor de 2-3 veces desde 1700s debido a las actividades humanas. Aproximadamente el 70% de las emisiones de CH<sub>4</sub> son antropogénicas (desde agricultura, actividades de gas natural, vertederos, etc.) y 19% (70 Tg/año) de ésta es atribuida a la generación de gas de vertedero (Lay et al., 1996; Czepiel et al., 2003). Por tanto, los vertederos ofrecen grandes oportunidades para mitigación de GEI, ya que la generación de energía por medio de la utilización del biogás de los rellenos sanitarios implicaría disminuir las emisiones de una gran cantidad de CH<sub>4</sub> (Figuereido, 2007; Zamorano et al., 2007; Tsai, 2007). El relativamente corto tiempo de vida del CH<sub>4</sub> en la atmósfera (7-10 años) significa que los efectos benéficos de esquemas de manejo para reducir las emisiones podría ser observado en un relativamente corto periodo de tiempo (Stern et al., 2007). Además, la utilización del GRS provee una fuente de ingresos y reemplaza el uso de combustibles fósiles (Peer et al., 1993; Thompson et al., 2009).

#### *Situación y Marco de oportunidad para la utilización de energía de RSU en el Valle de Lerma*

Argentina tiene una legislación incipiente en materia ambiental, que se encuentra en proceso de aplicación. A nivel federal, la Ley General de Medioambiente N° 25.675 (2002), y la Ley de Gestión de RSU N° 25.916 (2004), brindan recomendaciones acerca de la gestión de RSM. A nivel provincial en Salta, la Ley Ambiental N° 7.070/2000, declara que la protección del medioambiente es una prioridad para la política pública de la provincia. La legislación relacionada con RSM tiene por objeto poner fin a la práctica común en Argentina, que es la disposición de residuos en basurales a cielo abierto. De hecho, de los 2.200 municipios del país, solamente menos del 5% tienen rellenos sanitarios para la disposición final de RSM (Proyecto MDL de la Ciudad de Salta, 2006).

En la provincia, la disposición de los residuos se realiza a cielo abierto en todas las comunidades, a excepción de la ciudad capitalina - que destina sus residuos a enterramiento<sup>4</sup>. En el año 2005, Salta contaba con un índice de residuos (RSU) por

<sup>1</sup> Becaria Doctoral del CONICET (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas).

<sup>2</sup> Investigador Adjunto CONICET. Instituto de Investigación en Energía No Convencional (INENCO).

<sup>3</sup> Director Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED).

<sup>4</sup> Y cuenta con reglamentación específica: Decreto N° 12.219 (2004), sobre el tratamiento y la disposición de RSM en rellenos sanitarios.

habitante/día de 760 g y un tonelaje anual de generación de RSU de más de 300.000 toneladas. Estos indicadores la ubican dentro de las cinco provincias que más desechos generan, ranking encabezado por la provincia de Buenos Aires (SAyDS, 2005). Sin embargo, existe un marco de oportunidad en la provincia por tres circunstancias principalmente. En primer lugar, el municipio capitalino se dispone a ejecutar un proyecto dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que consiste en la disposición de la basura en el relleno sanitario San Javier etapa III, con recuperación y quema de biogás. Las autoridades a cargo del proyecto plantean que en una segunda etapa del proyecto, podría considerarse el uso de GRS como combustible para la producción de asfalto, necesario para tareas de mantenimiento del pavimento de las calles de la ciudad. Esto demuestra un cambio de percepción y voluntad política por un lado, y por otro, pondrá a disposición los resultados de esta experiencia piloto, con un doble aporte: datos técnicos posibles de ser recabados, y mayor comprensión y conocimiento de la aplicación del MDL. En segundo lugar, la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación (SAyDS) firmó un contrato que pondrá en marcha el Plan de Gestión Integral de RSU para la provincia de Salta. El plan se extiende a Valles Calchaquíes Sur y Norte, Valle de Lerma Centro, Valle de Siancas y Rosario de la Frontera. El Municipio de Coronel Moldes se encuentra incluido dentro del Plan. La propuesta consiste en la creación de un relleno sanitario regional, en la zona centro del Valle de Lerma. Por último, en el marco de la Ley Nacional N° 26.190 concerniente al “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica”, podrían obtenerse ingresos económicos de la venta de electricidad desde fuentes renovables, como los RSU. Dicha Ley, en su Artículo 14, punto III establece “remunerar en hasta 1,5 centavos por kilovatio hora (0.015 \$/kWh) efectivamente generados por sistemas de energía geotérmica, mareomotriz, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración y biogás a instalarse que vuelquen su energía en los mercados mayoristas o estén destinados a la prestación de servicios públicos, exceptuando de dicha remuneración, las consideradas en la Ley 26.093”.

Las cuestiones delineadas muestran que la provincia, y principalmente el Valle de Lerma, que concentra más del 50% de la población provincial, se encuentra con condiciones legales, organizativas y financieras, como para iniciar medidas tendientes a dar solución a los problemas creados por los basurales públicos. Por otra parte, esta iniciativa debería ser una prioridad, ya que los volúmenes de basura han incrementado en el tiempo, lo que puede asociarse (entre otros factores) con el incremento de la población urbana<sup>5</sup> y las tendencias consumistas modernas. El objetivo del presente trabajo es: estimar la potencialidad bioenergética de los RSU generados en el Valle de Lerma, sus beneficios ambientales (desde el punto de vista de las emisiones evitadas de GEI) y las alternativas de aprovechamiento eléctrico.

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1. Área de estudio

El Valle de Lerma, ubicado entre los 24°25,61' y 25° 43,66' de latitud sur y los 65°15,22' y 65° 46,60' de longitud oeste, tiene una longitud máxima de 144,3 km y un ancho máximo de 52,3 km (5.006 km<sup>2</sup> de superficie total, Núñez et al., 1997). Está integrado por 7 departamentos y 13 municipios, y en él se distinguen dos zonas muy heterogéneas entre sí: a) la zona baja, en donde se concentran la población y las actividades productivas y de servicios, y b) la zona montañosa, de población dispersa, con actividades de autoconsumo y ganadería extensiva. Si bien se generan residuos en ambos sectores, éstos representan un grave problema en la zona urbana o baja (hasta 1600 m.s.n.m), por los volúmenes y frecuencia con que se generan. La población considerada fue de 110.000 habitantes (sin la capital provincial) (INDEC, 2001).

### 2.2. Caracterización de los RSU del Valle y tendencias

Se utilizaron diferentes fuentes de datos secundarias directas. Se realizó una revisión de material documental y de registros de datos en bruto generados por otros investigadores o por sistemas de registros ordinarios de instituciones. Los datos presentados en la Tabla 1 fueron utilizados para las estimaciones de potencial energético de los RSU generados en el Valle.

| Variable           | Valor  | Variable           | Valor        | Variable                         | Valor  |
|--------------------|--------|--------------------|--------------|----------------------------------|--|
| Composición        |        | Análisis elemental |              | Poder calorífico inferior biogás | 4500 (kcal/m <sup>3</sup> N)                 |
| Comida y jardín    | 60 %   | C                  | 38,32 %      | Densidad de metano               | 0,0007168 (t/m <sup>3</sup> )                |
| Papeles y cartones | 10 %   | H                  | 4,47 %       | Metano por t RSU                 | 50(m <sup>3</sup> N CH <sup>4</sup> / t RSU) |
| Plásticos          | 10 %   | O                  | 26,27 %      | Eficiencia conversión eléctrica  | 30%  |
| Vidrio             | 3 %    | N                  | 0,84 %       | Máximo biogás valorizado         | 70%  |
| Metales            | 3 %    | S                  | 0,43 %       | Sólidos volátiles                | 70%  |
| Textiles           | 0,2 %  | Cl                 | 0,67 %       | Humedad                          | 50%  |
| Otros              | 13,8 % | Población          | 110.000 hab. | Producción per cápita            | 0,6 (kg/hab.día)                             |

Tabla 1. Valores utilizados en las estimaciones sobre el potencial energético de RSU.

### 2.3. Potencialidad bioenergética de los RSU

Debido a que en la provincia no se llevan estadísticas o bases de datos unificadas sobre RSU de los distintos municipios del Valle, es preciso efectuar generalizaciones sobre la base de la información parcial disponible, a fin de poder aproximarse al potencial energético de los residuos. Dos grupos de metodologías fueron ensayadas para estimar el potencial de los RSU para el Valle de Lerma: a) estimación indirecta del PCI (poder calorífico inferior) y la generación eléctrica potencial y b) estimación de la generación de biogás desde los RSU y posible generación eléctrica. Ambas estimaciones fueron comparadas.

#### a. Estimación del poder calorífico de los RSU y potencial generación eléctrica

Se determinó por medio del empleo de cuatro clases de métodos empíricos (Dong y Li, 2003): 1) valores medios, 2) composición física; 3) análisis elemental y 4) análisis próximo.

<sup>5</sup> Según INDEC (2001) la población urbana agrupa a las localidades o aglomerados mayores de 2000 habitantes, mientras que el resto constituye la población rural.

▪ **Valores medios de PCI.**

Existen estimaciones de poder calorífico de cada uno de los materiales potencialmente presentes en los RSU, de diferentes lugares del mundo. En la Tabla 2 se recopilan valores desde: Acurio et al. (1998); Abu y Abu-Qdais (2000), Conesa (2005); Zamorano et al. (2007), Minciardi et al. (2008), Poletto y Da Silva (2009).

| Material                 | PCS (kcal/kg) | PCI (kcal/kg) |
|--------------------------|---------------|---------------|
| a. Papel y cartón        | 3500          | 2400          |
| b. Textiles              | 5000          | 3400          |
| c. Madera y follaje      | 4000          | 3240          |
| d. Residuos alimenticios | 2000          | 650           |
| e. Plástico              | 8000          | 6000          |
| f. Goma, cuero y otros   | 6000          | 4000          |
| g. Vidrio, hojalata      | 100           | 30            |

Tabla 2. Valores medidos de poder calorífico superior e inferior. Confección propia en base a los autores mencionados.

Una vez conocidos los PCI de cada uno de los materiales incluidos en los RSU, se consideró su participación en porcentaje sobre el peso total. Realizando el producto entre el % de participación y el PCI, se obtuvo un PCI parcial, que luego contribuyó a la suma final.

▪ **Composición física.**

El análisis físico está basado en la proporción de peso de diferentes componentes en los RSU, tales como residuos alimenticios, plástico y papel. En la Tabla 3 se muestran los modelos empleados.

| M | Fórmula  | Variables   |
|---|--|---|
| 1 | $PCI (kcal/kg) = 88,2R + 40,5(G+P) - 6W$   | $R = \% \text{ plásticos}; G = \% \text{ residuos de comidas}; P = \% \text{ papel}; W = \% \text{ agua}$                             |
| 2 | $PCI (kcal/kg) = 2229,91 + 7,90R + 28,16P + 4,87G - 37,28W$                            | $O = \% \text{ otros componentes}; M = \% \text{ madera y leñas}; T = \% \text{ textiles}; E (Btu/lb) = \text{ contenido de energía}$ |
| 3 | $PCI (kcal/kg) = 38,52P + 92,09R + 49,24T + 38,34M + 37,55G + 64,07O (100 - W/W) - 6W$ |   |
| 4 | $E (Btu/lb) = 23 (G + 3,6P) + 160R$  |   |
| 5 | $E (Btu/lb) = 267 (R/P) + 2285,7$  |   |

Tabla 3. Los modelos (M) corresponden a 1) Japan National Municipal Solid Waste Foundation (1991); 2) Liu (1996); 3) Lin (2000); 4) Khan y Abu Gharah (1991); 5) Abu-Qudais y Abu-Qdais (2000). Todos los valores expresados sobre peso.

▪ **Análisis elemental o último.**

Se basa en las determinaciones de la concentración de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre, principalmente.

| M | Fórmula   | Variables  |
|---|---|--|
| 1 | $PCI (kcal/kg) = 81C + 342,5 (H - O/8) + 22,5S - 6(9H + W)$                     | $C = \% \text{ carbono}; H = \% \text{ hidrógeno}; O = \% \text{ oxígeno}; S = \% \text{ azufre}; W = \% \text{ agua}$ |
| 2 | $PCI (kcal/kg) = 81 (C - 3O/8) + 57 (3O/8) + 345 (H - O/16) + 25S - 6 (9H + W)$ |  |
| 3 | $PCI (kcal/kg) = 81 (C - 3O/8) + 342,5 H + 22,5S + 171/4 O - 6 (9H + W)$        |  |

Tabla 4. Modelos de estimación de PCI en función del análisis elemental. Los modelos son: 1) de Dulong; 2) de Steuer; 3) de Scheurer-Kestner.

▪ **Análisis inmediato o próximo.**

Se basa en las determinaciones de contenido de humedad, materia volátil, carbono fijo y contenido de cenizas en la muestra de RSU. Los modelos utilizados aparecen en la Tabla 5.

| Modelo | Fórmula                                  | Variables   |
|--------|--|---|
| 1      | $PCI (kcal/kg) = 45 V - 6W$              | $V = \% \text{ en peso de volátiles}; W = \% \text{ en peso de agua}$ |
| 2      | $PCI (kcal/kg) = 44,75 V - 5,85W + 21,2$ |   |

Tabla 5. Modelos de estimación de PCI en base a análisis inmediato. Los modelos son: tradicional (1) y de Bento (2). (Japan National Municipal Solid Waste Foundation, 1991).

b. *Estimación de la generación de biogás y potencial generación eléctrica*

La generación de metano en los enterramientos generalmente es modelada usando ecuaciones de descomposición cinética de primer orden (Blaha et al., 1991; Bogner y Matthews, 2003; Thompson et al., 2008) que se basan en la cantidad de recurso generado en el tiempo, la composición de los recursos, y otros factores. En los modelos de primer orden, la producción de metano se asume continua, con un decrecimiento lineal en el tiempo, proporcional a la degradación de la materia orgánica en un año dado, y a la fracción restante de materia orgánica disponible (Borjesson et al., 2000). Entre los modelos existentes pueden mencionarse: German EPER, TNO, Belgium, LandGEM, Scholl Canyon, este último usado por el IPCC (2006) (Thompson et al., 2009). Sin embargo, cuando no existen registros continuos de datos históricos y actuales, sobre cantidades, composición, variaciones estacionales y otros, se aplican otros modelos matemáticos o deducciones estequiométricas. Se estima la generación de metano o biogás, suponiendo que la totalidad del CH<sub>4</sub> potencial se libera durante el año en el que se produce la disposición de los desechos.

En el presente trabajo se aplicaron los siguientes modelos, correspondientes al segundo grupo mencionado: a) valores medios, b) demanda química de oxígeno o DQO, c) EPER, d) IPCC 1996. Para cada método se especifican los valores considerados. Y por último, se aplica un método de descomposición cinética de primer orden (IPCC, 1996), pero modificado (Kumar et al., 2004), de tal forma que puede ser utilizado a pesar de los pocos datos de base disponibles.

▪ **Valores medios:**

Es el método más sencillo de estimar el biogás que se generará mediante la digestión anaerobia de un residuo húmedo. Se acude a tablas con valores medios para cada biomasa de origen, existiendo diferentes tablas. En este caso se utilizaron valores

referidos en: Attal et al. (1992); Barlaz (1997); ICF (2005); Hackett y Williams (2004). La contribución parcial de cada material al total del biogás generado por tonelada de RSU, fue sumada, obteniendo la producción en m<sup>3</sup>/tRSU.

| Componente        | Volumen de biogás (m <sup>3</sup> N/kg RSU) | Biogás en m <sup>3</sup> N/t RSU |
|-------------------|---|----------------------------------|
| Restos de comida  | 0,113                                       | 113                              |
| Restos vegetales  | 0,067                                       | 67                               |
| Papel y cartón    | 0,15  | 150                              |
| Madera            | 0,034                                       | 34                               |
| Textiles y cuero  | 0,0085                                      | 8,5                              |
| Plásticos         | 0,0093                                      | 9,3                              |
| Cristal y metales | 0   | 0                                |
| Otros             | 0,101                                       | 101                              |

Tabla 6. Generación de biogás teórico por unidad de masa seca de diversos sustratos orgánicos.

#### ▪ DQO:

Típicamente, se puede relacionar la producción de biogás con la demanda química de oxígeno (DQO). La DQO se define como la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente un determinado sustrato. No toda la materia orgánica oxidable químicamente lo es biológicamente (por ejemplo, los hidrocarburos aromáticos). Se estimará que sólo un 70% de la DQO corresponde a materia biológicamente degradable (González, 1997). Dentro de ésta se consideraron dos fracciones: **de alta degradabilidad (MAD)** -restos de alimentación y jardín, degradables hasta 1 o 2 años- y la **degradabilidad media (MDM)**, compuesta por papel, cartón y madera –degradables en más de 5 años-. El rendimiento de mineralización del vertedero se considera en 45%. El modelo es el siguiente:  $V = k(1-H) \cdot (1/M) \cdot \alpha \cdot \beta \cdot (A \cdot X + B \cdot Y)$  (Ec.1)

Donde: V=caudal de biogás (50% CH<sub>4</sub>)/ t de RSU húmedo (60% moderadamente biodegradable, 10,2% lentamente biodegradable; K=caudal de metano generado por unidad de DQO (K=350 m<sup>3</sup>N/t); H=humedad de los residuos (50%); M=contenido de metano del biogás (0,5);  $\alpha$ = relación de biodegradabilidad frente a DQO (0,7);  $\beta$ =rendimiento de mineralización (0,45); A= t de DQO/t materia orgánica de alta degradabilidad (1,52); X=porcentaje de materia orgánica de alta degradabilidad (0,6); B= t de DQO/t materia orgánica de media degradabilidad (0,95); Y=porcentaje de materia orgánica de media degradabilidad (0,102). Se supondrá una DQO media, por g de sustrato seco, para la MAD, por su mayor contenido en proteínas y lípidos, de 1.52 g, y para la MDM, por su mayor contenido en celulosa, de 0,95 g (Gendebien et al., 1992). Se estima un contenido de humedad de 50 g de agua en 100 g de materia orgánica vertida, y un contenido en metano del biogás del 50% en volumen de gas seco de metano.

#### ▪ Modelo EPER:

Genera la tasa de producción de metano independiente de la cantidad de sustrato restante o de la cantidad de biogás ya producido (Scharff, 2005; Scharff y Jacobs, 2006), simulando la generación de metano desde rellenos sanitarios operacionales, pero no sellados. Aunque la completa degradación anaeróbica de residuos orgánicos en rellenos puede requerir muchos años, EPER sólo considera el aporte de residuos del último año, para estimar la degradación de metano (Scharff, 2005; Scharff y Jacobs, 2006; SCS Engineers, 1997). El modelo es:  $Q = (M)(COD)(CODf)(F)$  (Ec.2)

Donde: Q=producción de metano (t/año); M=generación de residuos (t/año)(24.100 t); COD=carbono orgánico degradable (kg/t)(0,13); CODf=fracción asimilada de COD (0,77); F=fracción de metano en el gas de relleno (0,5). El contenido de carbono orgánico degradable (COD) es necesario en los modelos de generación de GRS ya que éste representa la porción de los residuos disponible para degradación microbiana dentro del relleno. La fracción orgánica de cada tipo de residuo orgánico es considerada con diferentes tasas de descomposición. Las celulosas y hemicelulosas, presentes en los alimentos y residuos de jardín, son inmediatamente biodegradables bajo condiciones orgánicas; mientras que la lignina encontrada en la madera y diarios, no lo son (Gomes et al., 2008; MacLeod et al., 2008). Se utilizaron valores por defecto.

#### ▪ Método por defecto de IPCC 1996.

Permite obtener una estimación anual razonable de las emisiones reales siempre que la cantidad y la composición de los desechos eliminados se hayan mantenido constantes o hayan variado lentamente en el transcurso de varias décadas (IPCC, 1997; Tsai, 2005). Todos los parámetros del modelo pueden cambiar con el transcurso del tiempo, dependiendo de las tendencias en la disposición de los desechos y las prácticas de gestión de éstos (Figueredo, 2007).

$$E_{CH_4} = (RSU_t)(RSU_f) \{ (FCM) \cdot (COD) \cdot (CODf) \cdot (F) \cdot 16/12 \} \quad (Ec.3)$$

Donde: E<sub>CH<sub>4</sub></sub>: emisiones de CH<sub>4</sub> en t/año); RSU<sub>t</sub>: total de residuos generados (Gg/año); RSU<sub>f</sub>: fracción de RSU dispuesta en los rellenos (1); FCM: factor de corrección de CH<sub>4</sub> (0,6<sup>6</sup>)(dependientes de los tipos de prácticas de vertederos de RSU); COD: fracción de carbono orgánico degradable (0,13); CODf: fracción del total de COD que actualmente se degrada (kg/kgRSU) (0,77); F: fracción de CH<sub>4</sub> en el relleno (0,5); 16/12: conversión de carbono a metano. De acuerdo a la metodología del IPCC y de acuerdo a los datos, la estimación de COD fue modificada como sigue: A: fracción de papeles en los RSU; C: fracción de residuos de cocina: COD= (0,4A)+(0,15C)=0,13. Para CODf=0,014T+0,28=0,77, donde T: temperatura (°C) en la zona anaerobia de los residuos, estimada en 35°C (Tsai, 2005). Lo que está integrado en las llaves {} se denomina Lo= potencial de generación de metano (kg CH<sub>4</sub>/kgRSU), y representa la cantidad de metano producida por tonelada de residuo en el relleno. El IPCC (1996) sugiere por defecto una generación potencial de metano (Lo) entre 100-200 kg de metano por tonelada de residuo (Thompson et al., 2009).

#### ▪ Método de descomposición cinética de primer orden (DPO), modificado.

<sup>6</sup> Valor utilizado en el proyecto de relleno sanitario del municipio capitalino.

Este método provee una estimación de las emisiones de metano dependiente del tiempo, lo cual refleja el verdadero patrón del proceso de degradación. Se requieren datos sobre cantidades de residuos tanto actuales como históricas, composición y prácticas de disposición por algunas décadas. Estos datos no están disponibles para el Valle. Sin embargo, Kumar et al. (2004) proponen una aproximación modificada denominada “método triangular”. Se asume que la degradación ocurre en dos fases: 1) comienza después de un año de depositado el material, y la tasa de descomposición incrementa hasta el año 6; 2) comienza cuando la tasa de generación de gas decrece y llega a ser cero después del año 15. El biogás generado se basa en una ecuación cinética de primer orden, en una forma triangular: el área del triángulo es el gas liberado en el periodo considerado para cada depósito realizado, que se estimó mediante el método por defecto. Se realizaron los cálculos para los primeros 15 años de depositado el material y para un periodo posterior. El valor de ‘h’ o valor del pico, de emisiones de metano, se calculó conociendo el volumen de gas y la base del triángulo. Usando el valor del pico (h), los otros valores son calculados. El mismo procedimiento es aplicado para cada año, considerando que las emisiones de un año son la suma de las emisiones parciales de los años anteriores (Kumar et al., 2004).

Para las proyecciones de generación de RSU, se aplicó la tasa de crecimiento demográfico anual promedio de los departamentos del Valle, correspondiente a la década 1991-2001, en base a datos de INDEC, cuyo valor es igual a 1,67% (INDEC, 2001). Este procedimiento es idéntico al aplicado en el proyecto MDL de quema de metano desde relleno sanitario del municipio capitalino (MDL, 2004). Se compararon las diferencias de proyecciones entre los métodos por defecto y triangular.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSION

#### 3.1. Estimación del Poder calorífico de RSU y potencial generación de electricidad

Las estimaciones de poder calorífico inferior (PCI) a partir de métodos empíricos arrojan un promedio de 2.600 kcal/kg de RSU, lo cual está dentro del rango de valores obtenidos por Kumar y Goel (2009) y Abu Qudais y Abu-Qdais (2000), superando las estimaciones de Igoni et al. (2007), quien menciona un promedio de 1.700 kcal/kg. Este PCI está en función de –entre otros factores- la composición macroscópica de los RSU, la que a su vez depende de varios factores tales como las condiciones climáticas, los niveles económicos y las prácticas humanas y varían en función de la ubicación y el tiempo. Es difícil determinar las relaciones de los factores que interactúan para tal compleja composición de RSU (Abu-Qudais y Abu-Qdais, 2000; Dong y Li, 2003).

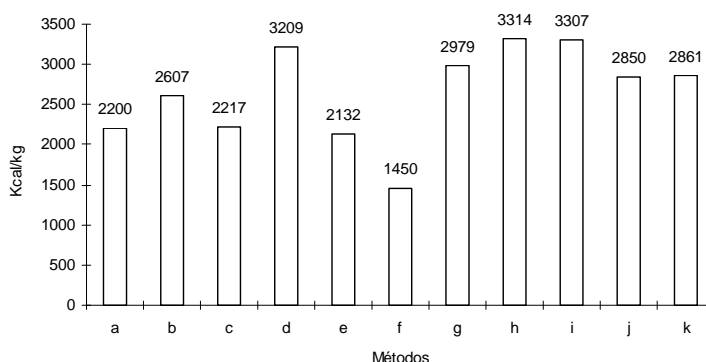


Figura 1. Estimaciones de PCI de los RSU del Valle de Lerma, utilizando diferentes métodos indirectos: a) valores medios; b) composición física 1; c) composición física 2; d) composición física 3; e) composición física 4; f) composición física 5; g) análisis elemental Dulong; h) análisis elemental Steuer; i) análisis elemental Scheurer-Kestner; j) análisis último tradicional; k) análisis último Bento.

Con el valor de PCI promedio obtenido, se tendría un potencial energético de alrededor de 63.000 Gcal al año, o más de 6.200 tep (toneladas de petróleo equivalente) al año. Los máximos y mínimos posibles de obtenerse, en función del PCI, se muestran en la Tabla 7. Sin embargo, la eficiencia (E) de una planta de incineración se asume en 28% (Poletto y Da Silva, 2009; Gómez et al., 2010), con lo cual, se tendrían alrededor de 1.750 tep anuales (con 28% eficiencia).

|          | PCI (kcal/kg) | kcal/día    | Gcal/ año | GJ/año  | Tep/año | Tep/año (28%E) |
|----------|---------------|-------------|-----------|---------|---------|----------------|
| Promedio | 2.600         | 171.600.000 | 62.634    | 261.810 | 6.253   | 1.751          |
| Mínimo   | 1.450         | 95.700.000  | 34.931    | 146.009 | 3.487   | 976            |
| Máximo   | 3.314         | 218.724.000 | 79.834    | 333.707 | 7.970   | 2.232          |

Tabla 7. Potencial energético anual estimado a partir del valor de PCI máximo, mínimo y medio obtenido.

Esto implica 0,86 Kwh/kg RSU ( $\pm 0,18$ ) o una disponibilidad de 160.000 kwh/día. En una instalación funcionando 24 horas al día, se tendría una potencia térmica de 6,7 MW y una generación de electricidad de 57.800 MWh.

Talyan et al. (2008) sugieren que para generación de energía, el PCI de los RSU no debe ser inferior a 1200 kcal/kg. Por lo cual con un valor como el obtenido, la incineración podría verse favorecida. Sin embargo, cualquier sistema de incineración como tecnología de tratamiento alternativa para los RSU, debe ser cuidadosamente planificado, teniendo en cuenta los análisis elementales y de metales pesados presentes en el flujo de residuos, y la realización de un estudio específico para evaluar la factibilidad técnico-económica de utilizar la incineración. Asimismo, deben determinarse la existencia de compuestos con características de peligrosidad, tales como inflamabilidad, corrosividad, reactividad, toxicidad y patogenicidad (Barton et al., 1996).

Para generación eléctrica mediante combustión y turbinas de vapor, el contenido de humedad del material a utilizarse resulta restrictivo. Por tanto, si éste fuera el caso, debería quizás eliminarse la fracción orgánica que es la que contiene el mayor porcentaje de humedad, ya que los procesos de combustión para poder ser estables y que no se produzca la extinción de la llama, aceptan materiales con un máximo de 30% de humedad (Puigdevall y Galindo, 2007). Esto implicaría un sistema con separación previa al tratamiento o recuperación energética, de las fracciones orgánica e inorgánica (Acurio et al., 1998).

### 3.2. Producción teórica de biogás y potencial generación de electricidad

Con respecto al aprovechamiento de los RSU como biogás, directamente desde el relleno sanitario que está planificado, las modelizaciones de generación de biogás se muestran en la Tabla 8:

| Método                   | m <sup>3</sup> /t RSU | m <sup>3</sup> /año | 70% valorización    |          |        |         |
|--------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|----------|--------|---------|
|                          |                       |                     | m <sup>3</sup> /año | Gcal/año | GJ/año | Tep/año |
| Valores Medios           | 100                   | 2.410.000           | 1.687.000           | 7.591    | 31732  | 758     |
| Eliminación de DQO       | 110,25                | 2.657.025           | 1.859.917           | 8.370    | 34985  | 836     |
| Método IPCC defecto 1996 | 112                   | 2.699.200           | 1.889.440           | 8.502    | 35540  | 849     |
| Método DPO modificado    | 102                   | 2.457.180           | 1.720.026           | 7.743    | 32367  | 773     |
| Método EPER              | 139,6                 | 3.364.36            | 2.355.052           | 10.598   | 44298  | 1058    |
| Promedio                 | 112,77                | 2.717.757           | 1.902.430           | 8.561    | 35.785 | 855     |

Tabla 8. Resultados de las estimaciones de producción de biogás a partir de RSU, comparando diferentes métodos indirectos.

Para un 70% de valorización de biogás, se contaría con un máximo de alrededor de 2 millones de m<sup>3</sup>N por año. Esto implicaría un potencial energético anual de más de 8.500 Gcal o más de 35 mil GJ en el Valle por año. Las estimaciones corresponden a la generación de biogás por tonelada de peso húmedo de RSU.

Como se observa, este potencial es menor que el estimado a partir de considerar el PCI de los RSU, lo que es lógico solamente teniendo en cuenta cuáles son las fracciones potencialmente útiles en cada caso: las proyecciones de generación de biogás sólo consideran las fracciones de alta y media degradabilidad (restos de comida, vegetales, papel, cartón y madera), que en el total significan aproximadamente el 60% de los RSU. Por otra parte, en el 40% restante no considerado en las estimaciones de generación de biogás, se encuentran los materiales de mayor poder calorífico dentro de los RSU y de menor contenido de humedad, como por ejemplo, las fracciones de plásticos, gomas, cueros y otros. En este sentido, la separación previa de estas fracciones y su reciclado, o utilización en sistemas de incineración adecuados, podría aún aumentar la oferta de energía disponible.

En la búsqueda de ajustar estos modelos en base a los escasos datos disponibles para la zona de estudio, se empleó el modelo de descomposición cinética de primer orden del IPCC (1996) o DPO, adaptado según Kumar et al. (2004), y denominado "método triangular". Tomando sólo los resultados de dicho método para el primer periodo (2011 al 2025), y estimando la producción de biogás por día (para un 70% de valorización), se podría obtener una potencia térmica de 0,03 a 1,3 MWt (para 24 hs de operación), mientras que la potencia eléctrica (30% eficiencia) sería de entre 0,01 y 0,4 MWe (10 a 400 kWe), desde el primer año al año número 15 de operación, respectivamente. La generación de electricidad sería de 876 MWh a 3.500 MWh. Si la generación de electricidad se estima para el segundo periodo considerado (años 2026 a 2040), donde la generación de biogás para cada momento integra la generación parcial de los quince años anteriores (y por lo tanto, se aproxima a la imagen estática que arroja el método por defecto del IPCC), los resultados muestran números mayores. Para un funcionamiento de 24 hs, se tendría una generación de electricidad de 3.500 MWh a 4.380 MWh (con una eficiencia eléctrica de 30% y un porcentaje de valorización de 70% del biogás). El rango de potencia térmica varía desde 1,32 MWt a 1,66 MWt, mientras que el de potencia eléctrica oscila desde 0,4-0,5 MWe. La generación eléctrica para los 30 años considerados, se estima como se muestra en la Fig. 2.

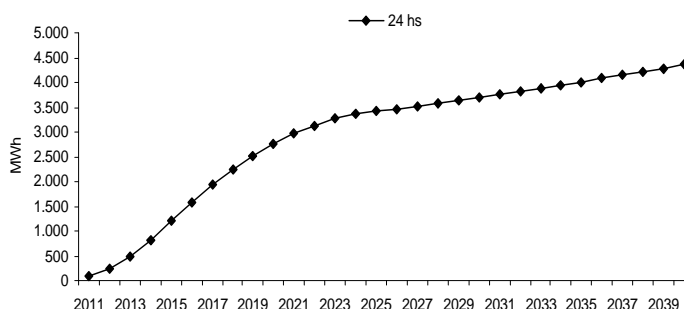


Figura 2. Generación eléctrica (MWh) desde una planta en base a RSU, para los 30 años considerados (empleando método triangular).

### 3.3. Perspectivas energéticas, ambientales y económicas para el Valle

Las diferentes aproximaciones utilizadas para modelizar la generación de biogás desde el futuro relleno sanitario, permiten estimar que los RSU generados anualmente en el Valle de Lerma, posibilitarían obtener entre 800 y 4.400 MWh –desde el año 1 de comienzo de operación del relleno sanitario hasta el año 30-. Quizás esta energía podría utilizarse en alumbrado público u otros beneficios sociales. Sin duda, el potencial energético de la cantidad de residuos anuales generados en el Valle, que aparecen desperdigados y son de diferente naturaleza, es bajo si se considera únicamente desde el punto de vista de un

inversionista económico. Sin embargo, el correcto tratamiento de estos RSU, lejos de considerarse un negocio, es una responsabilidad de los municipios y los gobiernos, donde también se incluye a la población en general. Además, el aprovechamiento de estos RSU, implicará, además de la solución para numerosos problemas ambientales y sociales locales (contaminación visual, de aguas, suelos y vegetación, plagas y enfermedades, problemas de salud, entre otros), la reducción de emisiones de GEI, que de otra manera serían liberados a la atmósfera. Las emisiones evitadas de CH<sub>4</sub> se estiman como se muestra en la Fig.3. Para un contenido de metano de 50% en el biogás, las emisiones promedio anuales resultan con el método por defecto en más de 760 t CH<sub>4</sub>/año, mientras que con el método triangular se estima un promedio anual de 450 tCH<sub>4</sub>, lo cual significa el 60% del primer valor (en los primeros 15 años). En el segundo periodo (años 2026 a 2040) se tendrían entre 890 a 970 t CH<sub>4</sub>/año promedio, según el método, como puede observarse en la Fig. 3.

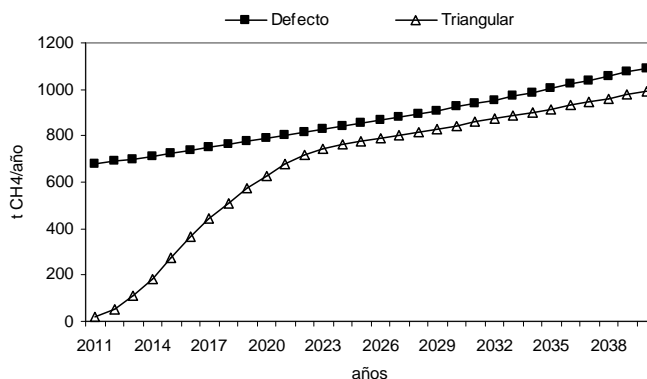


Figura 3. Emisiones de metano (tCH<sub>4</sub>/año) evitadas por aprovechamiento eléctrico del biogás de los RSU (método por defecto y triangular), en un periodo de 30 años. .

Quizás la manera en que resulte viable algún sistema de aprovechamiento energético de RSU, sea mediante incentivos, subsidios y primas por generación eléctrica, por ejemplo. Algunas alternativas podrían ser: a) venta de bonos de carbono, dentro del Mecanismo de Desarrollo Limpio; y/o b) el fortalecimiento de mercados de energía verde (Greg, 2009).

Si la energía generada se vende a la red, tal como está previsto en la Ley Nacional 26.190 (a un precio de 0,015\$/kwh), se tendría un ingreso anual de entre \$13.140 en el primer año de operación del relleno (año 2.011 en teoría), hasta \$52.500 en el año 15 de funcionamiento, aproximadamente. Los ingresos en el segundo periodo de operación (otros 15 años) oscilaría entre \$52.500 a \$65.700 pesos. Es de suponer que el incentivo de la Ley habrá cambiado bastante en dicho intervalo de tiempo.

A esto podría sumarse la venta de bonos de carbono (CER), con un valor de 10 US\$/tCO<sub>2eq</sub>. Estos mecanismos financieros, permitirían alcanzar además, las beneficios ambientales y sociales ya mencionados. Se tendría (tomando el promedio de ambos métodos) un total de 225.000 tCO<sub>2eq</sub> evitadas en total durante los primeros 15 años, y de 348.750 tCO<sub>2eq</sub> evitadas en los siguientes 15 años. Es decir, un ingreso de US\$5.737.500 en 30 años o de US\$ 191.250 por año durante este periodo.

#### 4. CONCLUSIONES

Si bien son escasos los datos sobre RSU del Valle de Lerma, es posible estimar la potencial generación de electricidad desde los mismos. En este caso, estas estimaciones se realizaron a partir de dos grupos de metodologías: i) enfocadas en el PCI de los RSU y ii) enfocadas en la generación de biogás o gas de relleno sanitario. El primer grupo de métodos se aplicó a fin de tener una referencia de comparación, y observar el potencial de los RSU desde diferentes perspectivas de aprovechamiento. Se estimó un valor promedio de PCI de 2.600 kcal/kg, significando un potencial energético de 1.750 tep anuales (si se emplean en una planta de incineración, con una eficiencia estimada de 28%). Sin embargo, en función del proyecto provincial de disposición de los RSU en un relleno sanitario regional, el segundo grupo fue la base para los cálculos del potencial de electricidad, como así, de emisiones evitadas a la atmósfera.

Dentro de este segundo grupo de metodologías, se triangulaban modelos estáticos y dinámicos, siendo estos últimos (método triangular, en este caso) los que mejor reflejan la dinámica natural de descomposición de los RSU en un relleno. En este caso, el método dinámico empleado, permitió realizar estimaciones prospectivas para un periodo de 30 años. Para un 70% de valorización del biogás generado en el relleno sanitario, se podría obtener (según el método triangular) una potencia térmica de 0,03 a 1,3 MWt (para 24 hs de operación), una potencia eléctrica (30% eficiencia) de 0,01 a 0,4 MWe (10 a 400 kWe), y una generación de electricidad de 876 MWh a 3.500 MWh, desde el primer año al año número 15 de operación, respectivamente. En el segundo periodo (desde el año 16 al 30 de operación), se tendría una generación de electricidad de 3.500 MWh a 4.380 MWh. El rango de potencia térmica varía desde 1,32 MWt a 1,66 MWt, mientras que el de potencia eléctrica oscila desde 0,4-0,5 MWe. Si la energía generada se vende a la red, se tendría un ingreso anual de entre \$13.140/año en el primer año de operación del relleno (año 2.011 en teoría), hasta \$65.700/año pesos en el año 30. A esto podría sumarse la venta de bonos de carbono (CER), que podrían generar un ingreso, por emisiones evitadas de metano, de cerca de US\$ 191.250 por año durante este periodo de 30 años.

A fin de ajustar estos valores, se torna de fundamental importancia el estudio a campo de los RSU, particularmente, en cuanto a la potencial producción de biogás, ya que un relleno sanitario regional es el destino proyectado de los mismos.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto CIUNSa (Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta) N° 1.955 y con el soporte de una beca doctoral del CONICET otorgada a la autora principal del presente.

## ABSTRACT

The municipal solid waste (MSW), traditionally they have been deposited to opened sky in Lerma's Valley (Salta). Because a current provincial project, the MSW might begin to deposit in a sanitary regional landfill. The mentioned project does not include the MSW energy utilization. In this work they were considered to be energetic potential resources. Two classes of estimations were realized from different methodologies: a) heating power of the RSU and potential production of electricity and b) potential biogas to be obtaining and electrical generation. The utilization of the energetic potential of these residues, added to the benefits for gas mitigation greenhouse effect, and other environmental aspects, undoubtedly they will contribute to a better quality of life to the population of the Valley.

## REFERENCIAS

- Abu-Qudais, M. y Abu-Qdais H.A. (2000). Energy content of municipal solid waste in Jordan and its potential utilization. *Energy Conversion & Management* 41: 983-991.
- Acurio, G., Rossin, A., Teixeira, P.F., Zepeda, F. (1998). Diagnóstico de la situación del manejo de residuos sólidos municipales en América Latina y el Caribe. BID y Organización Panamericana de la Salud. Serie Ambiental No. 18.
- Barton, J.R., Dalley, D. y Patel, V.S. (1996). Life Cycle Assessment For Waste Management. *Waste Management* 16 (1-3): 35-50.
- Blaha, D., Bartlett, K., Czepiel, P., Harris, R., Crill, P. (1991). Natural and anthropogenic methane sources in New England. *Atmospheric Environment* 33: 243-255.
- Bogner, J., Matthews, E. (2003). Global methane emissions from landfills: new methodology and annual estimates 1980-1996. *Global Biogeochemical Cycles* 17 (2): 34-1-34-18.
- Conesa, J.A. (2005). Incineración de Residuos Sólidos, Universidade de Alicante, Departamento de Engenharia Química, Espanha, Disponible en: <<http://iq.ua.es/>>.
- Czepiel, P.M., Shorter, J.H., Mosher, B., Allwine, E., McManus, J.B., Harriss, R.C., Kolb, C.E., Lamb, B.K. (2003). The influence of atmospheric pressure on landfill methane emissions. *Waste Management* 23: 593-598.
- Figueiredo, N.J. (2007). Utilização Do Biogás De Aterro Sanitário Para Geração De Energia Elétrica E Iluminação A Gás – Estudo De Caso”. Universidade Presbiteriana Mackenzie. Escola De Engenharia. Sao Pablo. Brasil.
- INDEC. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Informe Anual 2001.
- 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. Ginebra, Suiza, 104 p.
- Japan National Municipal Solid Waste Foundation. (1991). Design Guide for the Facility of Solid Waste Disposal, Tokyo.
- Khan, A.M.Z. y Abu Ghrahah, Z.H. (1991). New approach for estimating energy content of municipal solid waste. *Journal of Environmental Engineering* 117 (3):376-380.
- Lay, J., Li, Y., Noike, T. (1996). Effect of moisture content and chemical nature on methane fermentation characteristics of municipal solid wastes. *Journal of Environmental Systems and Engineering* 1: 101-108.
- Lin, C.H. (2000). Model to evaluate lower heat value of solid waste in Taiwan, Tung Nan Institute of Technology, Taipei, Taiwan, ROC.
- Liu, J.I., Paode, R.D., Holsen, T.M. (1996). Modeling the energy content of multiple regression analysis. *Journal of the Air & Waste Management Association* 46: 650-656.
- Minciardi, R.; Paolucci, M.; Robba, M.; Sacile, R.(2008). Multi-objective optimization of solid waste flows: Environmentally sustainable strategies for municipalities. *Waste Management*, Volume 28 (11): 2202-2212.
- Municipalidad de la ciudad de Salta. (2006). Proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio. Formulario de documento de diseño de proyecto (CDM-SSC-PDD). Versión 03. <<http://cdm.unfccc.int/Reference/Documents/>>.
- Peer, R.L., Thorneloe, S.A. y Epperson, D.L. (1993). A comparison of methods for estimating global methane emissions from landfills. *Chemosphere* 26 (1-4): 387-400.
- Piña, D.I. (2007). Costos económicos por la generación y manejo de residuos sólidos en el municipio de Toluca, Estado de México. *Equilibrio Económico*, Año VIII. 3 (2): 131-148.
- Poletto, J.A. y C. L. da Silva. (2009). Influencia de la Separación de Residuos Sólidos Urbanos para Reciclaje en el Proceso de Incineración con Generación de Energía. *Información Tecnológica* 20 (2), 105-112. doi:10.1612/inf.tecnol.4062it.08.
- Puigdevall, J. y Galindo, D. (2007). Apuntes del Curso De Postgrado de Energía de la Biomasa de la Maestría en Energías Renovables de la Universidad de Zaragoza, España. Febrero 2007.
- SAYDS. (2005). “Estrategia Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (ENGIRSU)”, Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAyDS). Inédito.
- SAYDS. (2009). Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. Gestión Residuos (RSU). Observatorio Nacional para la Gestión de RSU. [http://www.ambiente.gov.ar/observatoriosu/informacion\\_general/estadisticas.html](http://www.ambiente.gov.ar/observatoriosu/informacion_general/estadisticas.html).
- Stern J.C., Chanton J., Abichou T., Powelson D., Yuan L., Escoriza S., Bogner J. (2007). Use of a biologically active cover to reduce landfill methane emissions and enhance methane oxidation. Technical paper. *Waste Management* 27: 1248-1258.
- Thompson, S., Sawyer J., Bonam R., J.E. Valdivia. (2009). Building a better methane generation model: Validating models with methane recovery rates from 35 Canadian landfills. *Waste Management* 29: 2085-2091.
- Thompson, Shirley, Sawyer, J., Bonam, R., Smith, S. (2008). Modeling landfill gas generation to determine targets and strategies to reduce greenhouse gases. *The Journal of Solid Waste Technology and Management* 34 (1).
- Tsai, W.T. (2007). Bioenergy from landfill gas (LFG) in Taiwan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11: 331-344.
- Zamorano, M., Pérez J.I.P, Pavés, I.A. y Ridao A.R. (2007). Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11: 909-922.