

Los productos y los impactos de la descomposición de residuos sólidos urbanos en los sitios de disposición final

GÁBOR KISS KÖFALUSI* Y GUILLERMO ENCARNACIÓN AGUILAR*

* Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental. Dirección de Investigación en Residuos y Sitios Contaminados. Correos-e: gkiss@ine.gob.mx y gencarna@ine.gob.mx

Resumen. Los procesos de descomposición de los residuos favorecen la emisión de productos contaminantes que pueden ser un riesgo potencial al ambiente y a la salud, entre los que se encuentran los lixiviados y el biogás, mismos que requieren de un manejo adecuado acorde a la normatividad ambiental mexicana y en cumplimiento de los tratados internacionales firmados por México. Bajo este marco se promueve la disminución de la contaminación atmosférica así como la producción de energía a partir del biogás, aprovechando los bonos de carbono que se reciben por la reducción de las emisiones de metano y bióxido de carbono, principales gases de efecto invernadero causantes del calentamiento global de la Tierra.

Palabras clave: residuos sólidos, disposición final, relleno sanitario, descomposición, lixiviado, biogás, efecto invernadero, calentamiento global

Abstract. *Waste decomposition processes promote the emission of polluting matters which can be a potential risk to the environment and public health. Among them, leachates and biogas are those products requiring an adequate management in accordance with the Mexican environmental regulations and related international treaties signed by Mexico. Within this framework, the reduction of atmospheric pollution as well as energy production from biogas are both promoted, through the Carbon Credits that can be obtained for the reduction of methane and carbon-dioxide emissions, main greenhouse effect gases responsible for the global warming of the Earth.*

Keywords: *solid wastes, final disposal, sanitary landfill, decomposition, leachate, biogas, greenhouse effect, global warming.*



INTRODUCCIÓN

La disposición final de los residuos sólidos urbanos en rellenos sanitarios o en tiraderos a cielo abierto da lugar a la generación de diferentes productos contaminantes, derivados de los procesos de descomposición microbiana y liberación de componentes contaminantes de los residuos. La contaminación puede presentarse en forma sólida (polvo y materiales ligeros arrastrados

por el viento), líquida (lixiviado) y gaseosa (biogás), o incluso como partículas sólidas suspendidas en el lixiviado o en el humo de incendios provocados y autoincendios eventuales en los tiraderos.

El levantamiento de polvo y arrastre de residuos ligeros como plásticos, papeles y envolturas ocurre con frecuencia en tiraderos a cielo abierto donde no

se cubren los residuos, lo que provoca problemas en la actividad agrícola y en el tránsito vehicular en los alrededores. Esto representa un impacto estético negativo paisaje, así como una potencial contaminación directa al medio ambiente. Por otro lado, resultado del contacto de los residuos dispuestos con las aguas pluviales infiltradas, se genera lixiviado, que por su alto contenido de elementos contaminantes, puede ser un peligro potencial de contaminación al suelo y a las aguas freáticas si no se le da un manejo adecuado. Además, el biogás generado está compuesto mayormente de metano y bióxido de carbono, gases que pueden contribuir de manera importante a la aportación de gases de efecto invernadero e incrementar el calentamiento global del planeta.

Para mitigar la contaminación al ambiente por la disposición de los residuos, resulta imprescindible conocer los procesos de descomposición y lixiviación que conllevan a la generación de biogás y lixiviado, así como tomar en consideración las posibles consecuencias de una disposición no adecuada.

RIESGOS Y CONSECUENCIAS DE UNA DISPOSICIÓN INADECUADA DE LOS RESIDUOS

Una mala práctica de disposición final de los residuos sólidos urbanos puede causar efectos nocivos al ambiente y a la salud, como los que se describen a continuación:

- § Como consecuencia directa de un vertido descontrolado o disposición inadecuada de los residuos, aunado a las condiciones calurosas en la mayor parte del territorio mexicano y a las altas precipitaciones en la época de lluvias, la población se expone a un alto riesgo debido a posibles infecciones y epidemias transmitidas por el aire, agua y vectores de fauna nociva.
- § Por otro lado, la disposición de residuos en sitios que no cuentan con un subsuelo impermeable u

obras de ingeniería para evitar el flujo de contaminantes hacia el manto acuífero, puede incidir en la contaminación del suelo y del manto freático, lo que se traduce en un riesgo de afectación al ecosistema, recursos naturales y finalmente, por vía indirecta, a la salud humana.

- § Otro riesgo del manejo inadecuado es la posibilidad de incendios, sea de modo intencional, derivado de un descuido humano o incluso por el autoincendio de la basura, provocando por ende el deterioro del suelo y de la vegetación, así como la contaminación del aire con humo, ceniza y gases tóxicos, entre otros.
- § El polvo y los residuos ligeros levantados por el viento, así como los materiales arrastrados por posibles escorrentías superficiales, pueden llegar a los terrenos de cultivo y caminos cercanos, estorbando la actividad agrícola y el tránsito vehicular, aunado al efecto antihigiénico e impacto estético desagradable que ello produce.
- § La descomposición de los residuos sólidos urbanos que tienen un alto contenido de materia orgánica (más de 50% en México), conlleva a la generación de líquidos y gases indeseables, lo cual significa un riesgo, directo o indirecto, a la salud pública dependiendo del contacto de la población con dichas emisiones.
- § El alto porcentaje de materia orgánica entre los residuos favorece la proliferación de roedores e insectos e inclusive aves de carroña, asociados a la propagación de enfermedades y epidemias.
- § Y, por último, se da un impacto estético negativo en el paisaje alrededor de los sitios de disposición final sin control adecuado, lo que afecta no sólo a la gente que vive en la zona, sino también la plusvalía socio-económica de la región.

No obstante lo anterior, todos esos impactos negativos pueden y deben ser evitados con la construcción y operación de rellenos sanitarios en sitios adecuados,

en donde se mitiguen los impactos causados, minimizando la contaminación al ambiente y evitando todo tipo de molestias a la población o riesgos a la salud humana.

PROCESOS QUE OCURREN DURANTE LA DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS EN LOS SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL

La calidad de los lixiviados y biogás está asociada a los procesos de descomposición de los residuos, mientras que estos procesos dependen de diferentes factores internos y externos, entre los cuales se encuentran (Kiss 1998):

- § las condiciones climáticas y meteorológicas en el sitio,
- § las propiedades fisicoquímicas de los residuos dispuestos,
- § la tecnología aplicada en la disposición final, y
- § la edad del relleno.

A continuación se presenta una descripción de los principales factores que afectan la descomposición de los residuos.

Las condiciones climáticas y meteorológicas comprenden todos los factores ambientales que influyen en los procesos de transformación, como la precipitación pluvial, temperatura y vientos, principalmente. La precipitación juega un papel determinante en la generación del lixiviado, favoreciendo la solubilización de los componentes tóxicos de los residuos, mientras el efecto de la temperatura y de los vientos prevalece en su influencia sobre las condiciones del balance hídrico. La temperatura externa ejerce su efecto sólo en las capas superiores del relleno, mientras en el perfil interior ésta es afectada por los procesos bioquímicos de la descomposición de los residuos.

Las propiedades fisicoquímicas de los residuos dispuestos varían según el sitio, y también en el tiempo, resultando, por ende, lixiviados y biogás con

características diversas. Por otro lado, el contenido de elementos contaminantes en estos productos depende de la composición química de los residuos, su contenido de humedad, la capacidad de descomposición de los componentes y el calor de reacción de los diversos procesos de transformación, entre otros.

La tecnología aplicada en el sitio de disposición final afecta al desarrollo de los procesos de descomposición, influyendo en las condiciones ambientales prevalecientes, a través de la altura de las celdas, o bien, el perfil total del relleno, la tecnología de compactación y el tipo de cubierta. Existen además algunas prácticas que consisten en recircular el lixiviado a la superficie del relleno, con el objeto de acelerar los procesos de degradación en el cuerpo de los residuos, y con el mayor aprovechamiento de la evaporación, cuya práctica incluso puede ser una opción para el tratamiento de este líquido altamente contaminante.

La edad del relleno también es un factor importante, ya que la composición del lixiviado y biogás depende no sólo de las características de los residuos dispuestos y de las condiciones ambientales y tecnológicas, sino también de la capacidad de reacción de los materiales depositados, la cual a largo plazo va disminuyendo. Las experiencias demuestran que el contenido de elementos contaminantes, o bien la agresividad del lixiviado cambia en el tiempo, manifestando generalmente un rápido incremento inicial luego una lenta disminución (Johannessen 1999).

En cuanto a los procesos de descomposición de los residuos, su carácter aerobio o anaerobio es determinado por la existencia o falta de oxígeno dentro del relleno. En caso de suficiente oxígeno disponible, los microorganismos presentes en los residuos contribuyen a la descomposición aerobia de la materia orgánica. El proceso es fomentado parcialmente por el aire atrapado en el relleno, mientras las capas superficiales reciben cierta aireación incluso desde la atmósfera. Un factor importante que favorece a los

microorganismos aerobios es la humedad, que en esta fase de descomposición debe estar alrededor de 60% (A.G.H.T.M. 1977). Ya que generalmente el contenido de humedad de los residuos sólidos municipales es de 20 a 40% del peso total en el mundo, y alrededor de 37% en México (SEDESOL 2005), el agua pluvial que se precipita en el relleno juega un papel importante para alcanzar la humedad necesaria para favorecer los bioprocesos. La entrada de escorrentías superficiales y aguas subterráneas, desde luego, queda excluida en un relleno sanitario, con la aplicación de canaletas de desvío y un aislamiento de fondo adecuado.

Los productos de la descomposición aerobia generalmente son: bióxido de carbono, amoníaco (el cual después se transforma en nitrato) y agua, así como otros productos de oxidación, en menor proporción. Las reacciones de oxidación generalmente son exotérmicas, por lo que la temperatura interna del relleno puede alcanzar en corto tiempo temperaturas de 60° C o más. Debido a ello, un porcentaje importante de la humedad se evapora, por lo tanto, en esta fase, directamente del proceso de la descomposición aerobia prácticamente no se genera lixiviado (Kiss y Mendoza 1998).

Por otro lado, la materia orgánica de los residuos también se descompone en ausencia de oxígeno (condiciones anaerobias), pero más lentamente que en condiciones aerobias. La descomposición anaerobia llega a prevalecer, después del agotamiento del aire atrapado, en las partes interiores del sitio de disposición final, que están aisladas de la recarga del aire proveniente de la atmósfera. La influencia del ambiente externo aquí ya no prevalece; por lo tanto, los procesos bioquímicos de metabolismo microbiano pueden mantener la temperatura elevada. En estos niveles no hay posibilidad de evaporación al ambiente, y además la temperatura de 35 a 50° C es inferior a la de las condiciones de oxidación (A.P.W.A. 1976), y con la descomposición anaerobia se produce cierta cantidad de lixiviado. La degradación da inicio con macromoléculas como proteínas y aminoácidos, para

la generación posterior de ácidos orgánicos, metano y bióxido de carbono, mientras se lleva a cabo una desnitrificación y la reducción de los diversos componentes, sobre todo de sulfatos.

Cabe mencionar que en un sitio de disposición final pueden existir condiciones mixtas o bacterias facultativas que responden a ambos ambientes, favoreciendo al mismo tiempo la descomposición aerobia y anaerobia.

Aunado a lo anterior, el sitio de disposición final está expuesto permanentemente a la precipitación pluvial, por lo que una cantidad considerable de agua de lluvia llega a infiltrarse en los residuos. Con la percolación del agua a través del relleno, ésta disuelve diferentes componentes de los residuos (lixiviación) y también se lleva los productos de la descomposición aerobia y anaerobia. El líquido así generado se llama lixiviado, y su cantidad es mucho más considerable que la de los líquidos generados en los otros procesos. El lixiviado se acumula en el fondo del relleno, de donde es bombeado o conducido por gravedad a un tanque o vaso recolector para darle un adecuado tratamiento posterior. En el cuadro 1 se presenta un resumen de las condiciones y resultados de los procesos de descomposición de los residuos en un sitio de disposición final (Kiss y Mendoza 1998).

En función del tiempo, el proceso de descomposición de los residuos puede dividirse en varias etapas. Un ejemplo de ello es la clasificación según cinco fases de descomposición, como se ilustra en la figura 1 basada en una publicación del Banco Mundial (Johannessen 1999), en donde los diagramas se refieren a la evolución de las proporciones volumétricas de los principales componentes del biogás.

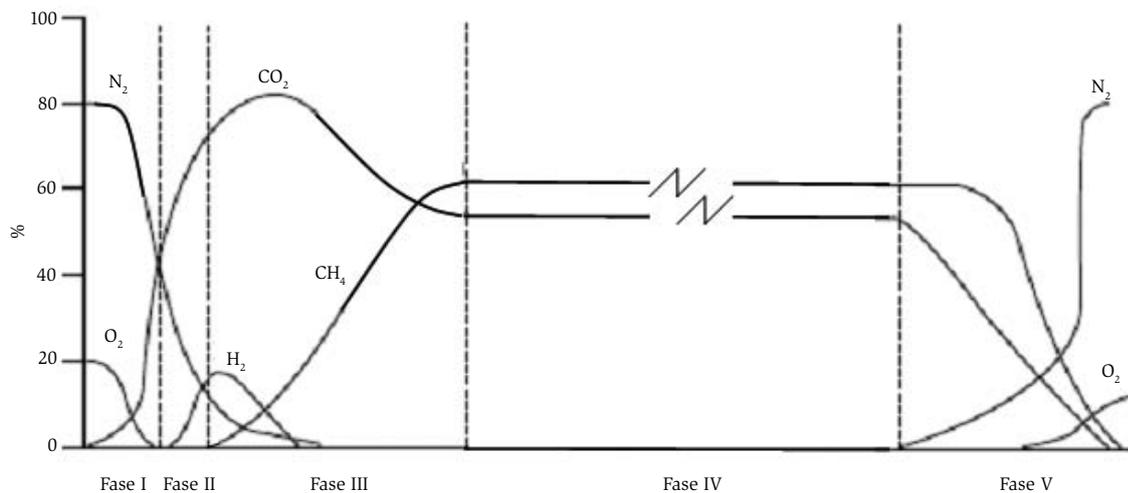
La fase I es una etapa aeróbica promovida por el aire atrapado en las celdas cubiertas en el relleno o vertedero. El oxígeno del aire, sin embargo, empieza a consumirse rápidamente, así como el nitrógeno, por los procesos de nitrificación. Como consecuencia de la degradación aerobia de la materia orgánica, empieza

CUADRO 1. PROCESOS DE DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS EN UN SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL

PROCESOS	DESCOMPOSICIÓN AEROBIA	DESCOMPOSICIÓN ANAEROBIA	LIXIVIACIÓN
Requisitos	Oxígeno disponible, menos humedad	Falta de oxígeno, más humedad	Gran volumen de agua pluvial, cubierta permeable
Temperatura	50-70° C	35-50° C	—
Reacciones	Oxidación, nitrificación	Reducción, desnitrificación	Disolución, hidrólisis
Consecuencias	Mineralización, esponjamiento	Consolidación, solidificación	Aumento de permeabilidad, acumulación de contaminantes
Productos	CO ₂ , H ₂ O, productos de oxidación	Ácidos orgánicos, CH ₄ , CO ₂ , NH ₃ , H ₂ S, lixiviado	Lixiviado

Fuente: Kiss y Mendoza 1998.

FIGURA 1. FASES DE DESCOMPOSICIÓN REFLEJADAS EN LA EVOLUCIÓN IDEALIZADA DE LA COMPOSICIÓN DEL BIOGÁS



a producirse bióxido de carbono, que se acompaña de una elevación de la temperatura. Esta fase dura hasta el agotamiento del oxígeno, abarcando por lo general un par de semanas.

La fase II es la llamada fase ácida, la cual es una transición a los procesos anaerobios, cuando la fermentación empieza a generar lixiviados con un

alto contenido de ácidos orgánicos, lo que da lugar a un descenso significativo en el pH. Por otro lado, el biogás generado está constituido mayormente de bióxido de carbono y nitrógeno aún no consumido, aunado a la producción de un porcentaje menor de hidrógeno. En los lixiviados, la demanda química de oxígeno alcanza su concentración más alta, así como

el amoníaco y los ácidos orgánicos también llegan a su máxima concentración.

La fase III es una etapa metanogénica intermedia en donde predominan las condiciones totalmente anaerobias. La proporción del metano se incrementa, mientras el contenido de bióxido de carbono decrece. Los ácidos grasos volátiles son transformados a biogás, y su concentración disminuye en el lixiviado. Esto conlleva a un aumento en el pH, mientras que la carga orgánica del lixiviado se reduce considerablemente.

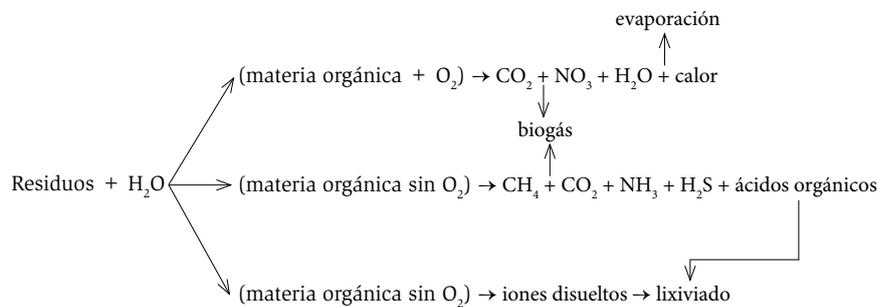
La fase IV es conocida como la fase metanogénica estable. Es un periodo anaerobio durante el cual se alcanza una máxima producción del metano, con una concentración estable en el biogás de alrededor del 55% en volumen. El contenido de bióxido de carbono es algo menor pero también estable, variando entre 40 y 50%. En el lixiviado se mantiene un pH elevado, con concentraciones significativas de amoníaco, y una carga orgánica decreciente medida por la demanda química de oxígeno.

La fase V es la etapa final de la estabilización de los residuos, con un carácter aerobio. Estas condiciones ocurren por lo regular en rellenos recién clausurados. La producción de metano decrece y el bióxido de carbono se sustituye por nitrógeno y oxígeno conforme se introduce el aire atmosférico a través de las capas superficiales del relleno.

En todos los procesos principales de transformación, sea vía aerobia, anaerobia o por lixiviación, un elemento común es el agua, que está presente en los mismos residuos como contenido de humedad; sin embargo, en su mayor parte proviene de la precipitación. En la degradación de los residuos el agua desempeña un papel muy importante, ya que cataliza los procesos de degradación a través de la hidrólisis y disolución de componentes tóxicos de la materia orgánica e inorgánica, y da como resultado finalmente la producción del lixiviado. Las transformaciones físico-químicas que se derivan del contacto del agua con los residuos, se presentan de manera resumida la figura 2 (Kiss y Mendoza 1998).

En dicha figura se observa el papel importante que juega el agua al contacto con la materia orgánica para la generación de lixiviados que contienen agentes tóxicos derivados de los residuos. Por lo que, si se logra controlar la cantidad de agua que incide en los residuos (impidiendo la entrada de aguas pluviales y subterráneas mediante la impermeabilización del fondo y de la cubierta del relleno), el agua disponible se limitaría al contenido de humedad de la basura, y en consecuencia disminuiría considerablemente la generación de lixiviados y el riesgo de contaminación al ambiente.

FIGURA 2. ESQUEMA GENERAL DE LA DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS POR CAUSA DEL CONTACTO CON AGUA



Fuente: Kiss y Mendoza 1998.

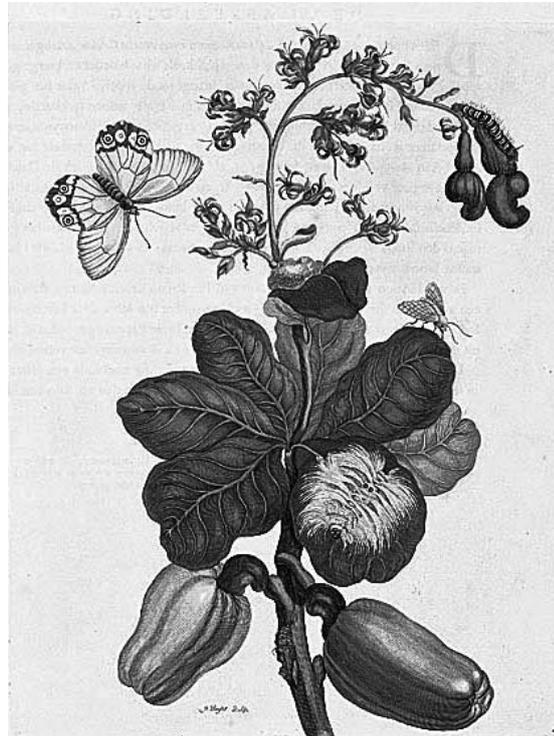
RIESGOS POTENCIALES ASOCIADOS A LA DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS

Como se desprende de la anterior descripción, la generación de lixiviados y biogás da como resultado una potencial contaminación del medio ambiente, por lo que debe tenerse conciencia de los aspectos ambientales, ecológicos y sanitarios que esto implica, definiendo los riesgos potenciales que puedan originarse de los residuos dispuestos en los sitios de disposición final.

Los componentes tóxicos derivados de la lixiviación de los residuos constituyen un riesgo potencial de contaminación de cuerpos de agua y suelo con su afectación a la salud humana. Con respecto a los lixiviados, estos no se encuentran listados entre los residuos peligrosos en la norma oficial mexicana vigente (NOM-052-ECOL-1993), que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. No obstante, en un proyecto para su modificación (PROY-NOM-052-ECOL-2001), en fase de discusión pública, los lixiviados generados en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos aparecen clasificados como residuos peligrosos, sin que a la fecha exista información de soporte que avale experimentalmente esta designación.

Es importante puntualizar que la peligrosidad se determina a partir de las características CRETIB (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y carácter biológico-infeccioso) de los residuos. Todos aquellos residuos que tienen al menos una de las características mencionadas son considerados como peligrosos.

En cuanto a la corrosividad, reactividad, explosividad e inflamabilidad, los lixiviados de los residuos sólidos urbanos en México no presentan características peligrosas, según la comprensión de la norma vigente, mientras que por su origen de generación tampoco se consideran biológico-infecciosos.



Considerando la toxicidad, los lixiviados de residuos sólidos urbanos a veces podrían resultar peligrosos (lo que se debe generalmente a la codisposición ilegal de residuos peligrosos en los basureros municipales), no obstante, sería demasiado severo aplicar tal clasificación a todo lixiviado en general, cuyo potencial contaminante, en la mayoría de los casos no se deriva de químicos y metales pesados contenidos sino de la alta carga orgánica del líquido.

Lo anterior se observa en la composición típica de los lixiviados, para la cual no existen en México datos representativos a nivel nacional, aunque en la literatura internacional se encuentran los rangos típicos presentados en el cuadro 2 (Tchobanoglous *et al.* 1994). Los datos mostrados ilustran, además, cómo disminuye la carga contaminante de los lixiviados en función del tiempo, conforme a la evolución de las diferentes fases de descomposición de los residuos.

Respecto al biogás, su composición depende de la naturaleza de los residuos dispuestos en el relleno y del equilibrio fisicoquímico alcanzado entre el lixiviado

CUADRO 2. COMPOSICIÓN TÍPICA DE LOS LIXIVIADOS GENERADOS EN RELLENOS SANITARIOS

Componente	Relleno nuevo (menos de dos años)	Relleno maduro (más de 10 años)
Demanda química de oxígeno (DQO)	3,000–60,000	100–500
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	2,000–30,000	100–200
Carbono orgánico total (COT)	1,500–20,000	80–160
Sólidos totales en suspensión (STS)	200–2,000	100–400
Nitrógeno total	20–1,600	100–160
Fósforo total	5–100	5–10
Alcalinidad como CaCO ₃	1,000–10,000	200–1,000
Dureza total como CaCO ₃	300–10,000	200–500
Calcio (Ca ²⁺)	200–3,000	100–400
Magnesio (Mg ²⁺)	50–1,500	50–200
Potasio (K +)	200–1,000	50–400
Sodio (Na +)	200–2,500	100–200
Cloro (Cl ⁻)	200–3,000	100–400
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	50–1,000	20–50
Fierro total	50–1,200	20–200
pH	4.7–7.5	6.6–7.5

Fuente: Johannessen 1999.

y la fase sólida. Puesto que la composición del biogás puede ser muy variable en los diferentes sitios (e incluso en el mismo sitio en función del tiempo), resulta difícil determinar una composición general aplicable a todas las emisiones gaseosas de los tiraderos o rellenos sanitarios. El cuadro 3 presenta un resumen de los valores más frecuentes encontrados en la literatura nacional e internacional.

En principio, y a grandes rasgos, se puede decir que el biogás generado en los sitios de disposición final se constituye en su mitad de metano (CH₄) y, en la otra mitad, de bióxido de carbono (CO₂), siendo la proporción del primero ligeramente mayor a la del segundo. También suelen estar presentes trazas de otros gases como sulfuro de hidrógeno (o ácido sulfhídrico, su forma disuelta en agua), mercaptanos,

algunos compuestos orgánicos volátiles, entre otros, los cuales son las principales fuentes de olor en los sitios de disposición final, y pueden ser importantes por sus posibles efectos sobre la salud humana.

Cabe mencionar que, en sitios particulares, los datos arriba presentados pueden mostrar considerables discrepancias de los rangos indicados, no obstante se observa una buena coincidencia con la composición típica reportada para los rellenos sanitarios de la república mexicana (SEDESOL 2001).

En cuanto a su peligrosidad, el biogás y otros productos gaseosos, podrían, en teoría, ser explosivos por el metano que contienen, sobre todo si son emitidos a la atmósfera en forma incontrolada. Es sabido, sin embargo, que el riesgo de explosión existe si el metano está presente en el aire en ciertas proporciones (al-

CUADRO 3. COMPOSICIÓN TÍPICA DEL BIOGÁS PRODUCIDO EN RELLENOS SANITARIOS

COMPONENTE	% EN VOLUMEN
Metano (CH ₄)	45-55
Bióxido de carbono (CO ₂)	40-50
Nitrógeno (N ₂)	2-3
Sulfuro de hidrógeno (H ₂ S)	1-2
Hidrógeno (H ₂)	< 1
Oxígeno (O ₂)	< 1
Monóxido de carbono (CO)	Traza
Amoniaco (NH ₃)	Traza
Hidrocarburos aromáticos y cíclicos	Traza
Compuestos orgánicos volátiles	Traza

Fuente: elaboración propia basada en la literatura nacional e internacional.

rededor de 5 a 15% en volumen). Afortunadamente, estas situaciones son poco probables en los sitios de disposición final, ya que en el interior del relleno la concentración del CH₄ normalmente está a un nivel mayor al límite indicado, mientras que en el exterior, debido al espacio abierto el riesgo de explosión se reduce considerablemente.

Se debe destacar que el mayor potencial de contaminación o impacto ambiental del biogás se origina de los posibles efectos ambientales de sus dos principales componentes (metano y bióxido de carbono). El CH₄ y CO₂ además de ser contaminantes de la atmósfera a nivel local, son además los gases de efecto invernadero más importantes que contribuyen al calentamiento global del planeta, por lo que la tarea de controlar su emisión se deriva también de diferentes compromisos internacionales.

TAREAS Y OPORTUNIDADES RESULTANTES DE LOS COMPROMISOS NACIONALES E INTERNACIONALES

Al disponer los residuos en tierra, independientemente del grado del control que tenga el sitio, se generan emisiones que, a falta de un control y

manejo adecuado pueden contaminar al ambiente. En los sitios de disposición final, la formación de lixiviados y biogás conlleva también, en menor o en mayor grado, a la presencia de compuestos tóxicos, mismos que son regulados por tratados y convenios internacionales de los cuales México es signatario: el Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte (ACAAN) que promueve el manejo adecuado de las sustancias químicas por medio de la aplicación regional de los convenios y protocolos mundiales; el Convenio de Estocolmo respecto de los compuestos orgánicos persistentes (COP) y el Convenio de Basilea sobre el control del movimiento transfronterizo de los residuos peligrosos y su eliminación, así como el Protocolo de Kioto que hace referencia a la lucha del cambio climático mediante una acción internacional de reducción de las emisiones de determinados gases de efecto invernadero responsables del calentamiento del planeta.

Bajo este marco, resulta necesario realizar proyectos de investigación que evalúen las características de calidad y cantidad de los lixiviados y biogás en sitios representativos de la república mexicana, con la finalidad de generar bases de información para la

toma de decisiones en cuanto al cumplimiento de la normatividad ambiental aplicable del país y de los tratados mencionados.

Respecto de la normatividad vigente, ya se mencionó que los lixiviados no se encuentran listados como residuos peligrosos en la NOM-052-ECOL-1993, pero sí en su proyecto de actualización (hasta el 2005 aún no terminado). De lo anterior, surge la polémica que si bien en algunos casos el lixiviado pudiera considerarse peligroso por ciertas características, como por ejemplo la toxicidad; la generalización de tal consideración a todo lixiviado de residuos urbanos implicaría una enorme responsabilidad y una tarea difícil de cumplir para el manejo adecuado por parte de los actores involucrados (autoridades municipales, principalmente), conforme a las competencias establecidas en la Ley general de prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR). Ello, además, daría como resultado una contradicción con la misma ley, ya que ésta expresa claramente que los residuos peligrosos son de competencia federal.

En cuanto al biogás, vale la pena mencionar los esfuerzos internacionales derivados del Protocolo

de Kioto, con la finalidad de reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI). Entre los GEI principales se considera el bióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), así como el hexafluoro de azufre (SF_6), los hidrofluorocarbonos (HFC) y perfluorocarbonos (PFC), atribuyéndole a cada uno su potencial específico de contribución al calentamiento global, véase el cuadro 4.

Considerando los dos gases principales que constituyen el biogás en proporciones muy similares, se destaca que el metano posee un efecto de albedo 23 veces mayor al del bióxido de carbono, es decir, su contribución al calentamiento global sería mucho más considerable aún si su volumen proporcional fuese menor al acostumbrado. En los cálculos de emisiones totales de efecto invernadero, por lo tanto, se suele utilizar el valor de CO_2 equivalente aplicando los multiplicadores del potencial de calentamiento global arriba presentados.

En el marco de los compromisos del Protocolo de Kioto, se promueve la implementación de proyectos que aprovechan el instrumento de incentivo financiero llamado Mecanismo de desarrollo limpio (MDL). Para-

CUADRO 4. POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL DE DIFERENTES GASES DE EFECTO INVERNADERO

GASES DE EFECTO INVERNADERO	POTENCIAL DE CALENTAMIENTO GLOBAL EN UN HORIZONTE DE 100 AÑOS (CO_2) = 1
Bióxido de carbono (CO_2)	1
Metano (CH_4)	23
Óxido nitroso (N_2O)	296
Hexafluoro de azufre (SF_6)	22,200
Hidrofluorocarbonos (HFC)	120–12,000
Perfluorocarbonos (PFC)	5,700–11,900

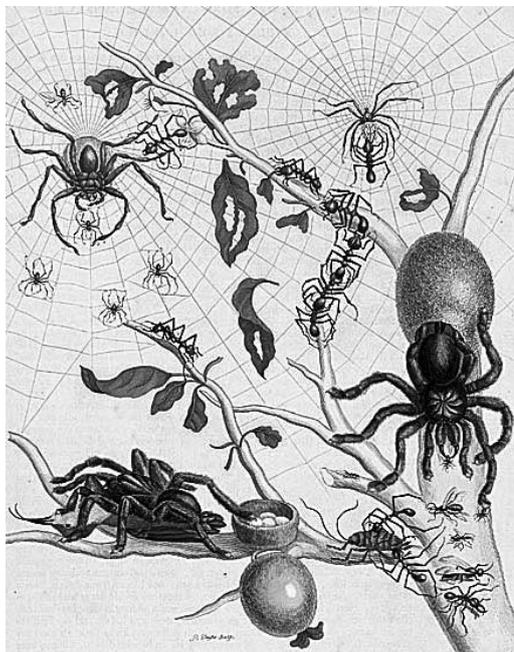
Fuente: IPCC 2001.

lamente, el Banco Mundial ha puesto en marcha un programa que reúne a inversionistas de países desarrollados y posibles beneficiarios de países en desarrollo, creando un mercado para los certificados de reducción de emisiones de carbono, mejor conocidos como bonos de carbono.

El MDL y el mercado de los bonos de carbono son instrumentos que permiten a los países desarrollados cumplir con sus metas resultados de

compromisos para la reducción de emisiones, puedan financiar proyectos de captura o abatimiento de los gases de efecto invernadero en otras naciones, principalmente en vías de desarrollo, acreditando tales disminuciones como si se hubiesen realizado en territorio propio. Esto abarata los costos de cumplimiento para los países que financien tales proyectos, y significa un apoyo importante para los países beneficiados en el desarrollo tecnológico y la conservación del medio ambiente. Por ejemplo, si en México en este marco se implementa un proyecto de aprovechamiento del biogás de un relleno sanitario y con ello se disminuyen las emisiones de bióxido de carbono equivalente a la atmósfera, entonces esta reducción particular puede ser vendida a otro país que esté obligado a reducir sus emisiones de GEI, generando beneficios tanto económicos como ambientales. La compra y venta se realiza entre empresas particulares de los países involucrados, a través de la implementación del proyecto encuadrado en el Mecanismo de desarrollo limpio.

El MDL empezó a operar antes de que el Protocolo de Kioto entrara en vigor en 2005. Por una parte, en



las negociaciones del 2001 los países firmantes acordaron que todas las reducciones de emisiones obtenidas a partir de ese año serían válidas para cuando Kioto entrara en vigencia; y por otro lado, varios países desarrollados adoptaron normativas a nivel nacional que han generado una demanda de proyectos MDL. Desde entonces, el mercado de los bonos de carbono se viene desarrollando a nivel mundial y en los últimos

años ha adquirido mayor fuerza, lo que significa que hoy día hay numerosos países e instituciones que han creado fondos para la inversión en tales proyectos.

Como el biogás se constituye principalmente de metano y bióxido de carbono, que son los gases de efecto invernadero más importantes, resulta evidente considerar proyectos que contemplen la disminución de la emisión descontrolada de estos gases generados de los residuos en sitios de disposición final. Desafortunadamente, en México aún no se han implementado proyectos MDL en específico, aunque el aprovechamiento del biogás como fuente de energía ya funciona con éxito, como lo demuestra el caso del relleno sanitario operado por la empresa SIMEPRODESO en Salinas Victoria, Nuevo León.

Este proyecto, diseñado para la generación de energía a partir del aprovechamiento de biogás, tiene una capacidad instalada de 7.4 megawatts, y se encuentra operando desde el mes de abril de 2003. La energía generada se aprovecha en alumbrado público y bombeo de agua potable en la Zona Metropolitana de Monterrey y para las mismas instalaciones. Además,



los beneficios en materia ambiental son significativos, ya que se estima una reducción de emisiones contaminantes equivalentes a un millón de toneladas de CO₂ (SEDESOL 2005).

Debido a la importante cantidad de biogás generado en los sitios de disposición final de los residuos sólidos urbanos, es necesario considerar no sólo la reducción de su emisión a la atmósfera sino también su aprovechamiento. El biogás es una fuente de combustible que es fácil de capturar y utilizar. Es una fuente renovable de energía que tiene que ser explotada con el objetivo de no desperdiciarla y evitar emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera.

Por su composición, el biogás es un combustible con un importante poder calorífico, potencialmente aprovechable para diversos usos. Considerando la significativa proporción de metano que lo constituye, el biogás puede ser aprovechado de manera factible en México, tanto en la generación de energía eléctrica como en la producción de metanol y de éter dimetílico.

De acuerdo con cálculos teóricos, una tonelada de residuos sólidos urbanos puede generar hasta 223 m³ de biogás (SEDESOL 2005). El poder calorífico del biogás está determinado por la concentración de metano, y se encuentra alrededor de 20 a 25 MJ/m³, comparado con 33 a 38 MJ/m³ para el gas natural. Cabe mencionar que un metro cúbico de biogás concebido en su totalidad mediante combustión es suficiente para generar seis horas de luz equivalente a un bombillo de 60 watts (SEDESOL 2005).

Derivado de todo lo anterior y considerando los compromisos y retos mencionados, será necesario realizar en México un inventario de emisiones de biogás en sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos, sitios controlados y/o rellenos sanitarios y sitios sin control, con el objetivo de establecer programas en el marco del Mecanismo de desarrollo limpio, y aprovechar los beneficios de la venta de los bonos de carbono poniendo en marcha proyectos de captación y aprovechamiento de biogás para la reducción del efecto invernadero y la generación de energía eléctrica en el país.

CONCLUSIONES

Los residuos sólidos urbanos que terminan en un sitio de disposición final se descomponen, en principio vía aerobia y luego, en la mayor parte del proceso, vía anaerobia, generando como productos principales el lixiviado y el biogás. El factor principal que promueve la generación de estos productos es el agua pluvial que atraviesa la materia depositada, estableciendo así las condiciones favorables para los procesos fisicoquímicos y bioquímicos de la descomposición. Con la descomposición de los residuos y la lixiviación de sus componentes se producen diferentes materias contaminantes que podrían ser peligrosas, lo que hace importante darle un manejo adecuado, tanto al lixiviado como al biogás.

Bajo el marco de los tratados internacionales en materia de residuos, sustancias tóxicas y gases de efecto invernadero, se debe promover la disminución de la contaminación al ambiente derivada de la disposición final de los residuos, lo que implica no sólo el manejo adecuado de los lixiviados y la reducción de las emisiones de metano y bióxido de carbono, sino también el posible aprovechamiento del biogás para la producción de energía eléctrica. Para ello, se podrá aprovechar además el llamado Mecanismo de desarrollo limpio, establecido para la implementación de tales proyectos a nivel nacional e internacional.

BIBLIOGRAFIA

- American Public Works Association. 1976. *Tratamiento de los residuos sólidos urbanos*. Instituto de Administración Local, Madrid, España.
- Association Générale des Hygiénistes et Techniciens Municipaux. 1977. *Técnicas de higiene urbana. Recogida y tratamiento de basuras. Limpieza de las vías públicas*. Instituto de Administración Local, Madrid, España.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- Johannessen, L.M. 1999. *Guidance Note on Recuperation of Landfill Gas from Municipal Solid Waste Landfills*. World Bank, Urban Development Division, Urban Waste Management Thematic Group, Working Paper Series 4.
- Kiss, G. 1999a. Relación entre lixiviados de rellenos sanitarios y precipitación. *Vector de la Ingeniería Civil* 23: 6-27 y 24: 24-27.
- Kiss, G. 1999b. Modelos y fórmulas para la descripción del balance de agua en rellenos sanitarios. *Ingeniería y Ciencias Ambientales* 45: 14-23.
- . 1998. Balance de agua en rellenos sanitarios. *Vector de la Ingeniería Civil* 20: 21-27.
- Kiss, G. y F Mendoza. 1998. Generación de materias contaminantes en rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales. *Ingeniería y ciencias ambientales* 38: 6-9.
- Ley general de prevención y gestión integral de los residuos (LGPGIR). 2003. *Diario Oficial de la Federación* del 8 de octubre. SEGOB, México.
- Norma Oficial Mexicana NOM-052-ECOL-1993, que establece las características de los residuos peligrosos, el listado de los mismos y los límites que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. *Diario Oficial de la Federación* del 22 de octubre, SEGOB, México.
- Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-052-ECOL-2001, que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y el listado de los residuos peligrosos 2002. *Diario Oficial de la Federación* 26 de julio. SEGOB, México.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). 2005a. Metodología para el desarrollo de un proyecto de biogás. Documento en CD. Programa Hábitat, México.
- . 2005b. Modelo mexicano de biogás. Documento en CD. Programa Hábitat, México.
- . 2001. *Manual para la operación de rellenos sanitarios*. SEDESOL, México.
- Tchobanoglous, G., H. Theisen y S. Vigil. 1994. *Gestión integral de residuos sólidos*. Volumen I. McGraw-Hill, Madrid, España.

Imágenes: ilustraciones Maria Sybilla Merian (1647-1717).