

# GENERACION Y MANEJO DE GASES EN SITIOS DE DISPOSICION FINAL

**PUBLICADO POR:**

Ing . Wagner Colmenares Mayanga  
[www.ingenieriaquimica.org/usuario/wagner](http://www.ingenieriaquimica.org/usuario/wagner)

Ing . Karin Santos Bonilla .

**Este trabajo fue descargado del siguiente sitio:**

[http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/relleno\\_sanitario](http://www.ingenieriaquimica.org/articulos/relleno_sanitario)

Para conseguir una copia actualizada, puede visitar esa dirección.

El contenido de esta obra es propiedad intelectual de sus autores y se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons - Reconocimiento - Compartir Igual](#). Ello implica que en la utilización o distribución de la obra usted debe:

- reconocer los créditos de la obra, citando a los autores y la fuente en la que se obtuvo originalmente (mencionada arriba)
- compartir la obra derivada bajo la misma licencia

# INTRODUCCIÓN

La disposición definitiva de los residuos sólidos es, hoy en día, uno de los problemas más importantes que afectan a la región América Latina en términos ambientales. El sistema más adecuado para la disposición final es el relleno sanitario.

El presente trabajo provee de información básica acerca de la generación, composición y manejo del gas producto de la disposición final de los residuos sólidos en un relleno sanitario y de las alternativas para su uso posterior a su recolección. Producto de la biodegradación de los residuos en estos rellenos sanitarios se tienen los lixiviados y a los gases, éste último denominado biogás.

La producción del biogás en rellenos grandes permite su aprovechamiento transformándolos en energía eléctrica teniendo una alta inversión inicial, pero que puede ser autofinanciable.

El biogás generado en rellenos sanitarios puede ser capturado utilizando un sistema de recolección de biogás que usualmente quema el gas por medio de quemadores. Alternativamente el gas recuperado puede usarse de diferentes maneras. Por ejemplo: producción de energía eléctrica a través del uso de generadores de combustión interna, turbinas, o microturbinas o puede utilizarse como combustible en calentadores de agua u otras instalaciones.

Además de los beneficios energéticos en el uso del biogás, la recolección y control del biogás generado ayuda a reducir emisiones atmosféricas contaminantes

## OBJETIVOS

- Estudiar la generación de gases originados en la disposición final.
- Conocer las etapas de la biodegradación de los residuos sólidos y la composición del biogás.
- Evaluar el manejo de los gases originados producto de la biodegradación de los residuos sólidos.
- Dar a conocer las experiencias a nivel mundial del empleo del biogás como fuente de energía.

## ANTECEDENTES

El crecimiento urbano ha propiciado un incremento en la generación de residuos provenientes de actividades que se desarrollan en casas habitación, sitios de servicios privados y públicos, construcciones, demoliciones, establecimientos comerciales y de servicios. La gestión de los residuos sólidos, desde el lugar de la producción hasta su disposición final, incluye varias etapas relacionadas con el almacenamiento en situ, recolección, transferencia y transporte, procesado y disposición final de los mismos.

El manejo integral de los desechos sólidos se debe de realizar de una manera eficiente y ordenada para proporcionar la solución más adecuada, en concordancia con los mejores principios de salud pública, economía, ingeniería, estética, aceptación social y preservación ambiental.

Al depositarse los residuos en los rellenos, éstos comienzan a descomponerse mediante una serie de procesos químicos complejos. Los productos principales de la descomposición son los líquidos lixiviados y los gases. Tanto los líquidos como los gases pueden afectar la salud de las poblaciones de los alrededores.

La producción de metano se debe a la actuación de microorganismos como bacterias, que mediante procesos biológicos degradan los residuos, emitiendo éste y otros gases, y liberando otras sustancias químicas. Los gases producidos por la fermentación anaerobia de la materia orgánica de los residuos constituyen un problema difícil de resolver. Dependiendo de la cantidad de residuos que consideremos, la producción de gases puede ser importante y también larga.

# PRINCIPIOS TEÓRICOS

## LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS

Un relleno sanitario es un lugar de disposición de los residuos sólidos domiciliarios o municipales. Un área determinada de tierra o una excavación que recibe residuos sólidos domiciliarios, residuos sólidos industriales, comerciales y/o lodos no peligrosos. Según la literatura especializada, cualquier lugar donde los residuos sólidos domiciliarios se encuentran siendo depositados en grandes cantidades, es en principio, un biorreactor que genera gases y líquidos percolados, lo que dependerá de una serie de variables relacionadas a las características de la basura, del lugar de disposición, de la forma de disposición, al clima, etc.

En un relleno, los variados componentes de los residuos sólidos se degradan anaeróbicamente a diferentes tasas. Por ejemplo, los alimentos se descomponen más rápido que los productos de papel. Aunque el cuero, la goma y algunos plásticos también son materias orgánicas, usualmente se resisten a la biodegradación. Algunos materiales lignocelulósicos, plásticos, textiles y otras materias orgánicas son muy resistentes a la descomposición vía organismos anaeróbicos. A pesar de la falta de uniformidad de la descomposición anaeróbica, se han desarrollado algunas fórmulas empíricas para predecir la cantidad de metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que se genera de la descomposición de la celulosa y otros materiales orgánicos.

El período de tiempo que se requiere para que los residuos sólidos domésticos se degraden y se produzca biogás dependerá de varias variables: el número de organismos presentes en la basura, nutrientes, temperatura, acidez (pH), contenido de humedad, cobertura y densidad de compactación:

- **Composición de la basura:** A mayor cantidad de restos de comida presentes en la basura más rápido se generará biogás. El papel y materias orgánicas similares se degradan a una tasa menor y se resisten a la biodegradación.
- **Contenido de humedad:** El contenido de humedad es uno de los parámetros más determinantes en un relleno sanitario. Si este se aumenta levemente se acelera el proceso de generación de gas considerablemente. De ahí que en los rellenos sanitarios se recomienda recircular los líquidos percolados para adicionar humedad a la basura, o incluso agregar agua, disminuyendo al mismo tiempo los impactos ambientales de su descarga y los costos de tratamiento. El clima es uno de los elementos determinantes del contenido de humedad en un relleno, y su efecto depende en alguna medida de las características de la cobertura y el grado de impermeabilidad de la base del relleno.
- **Nutrientes:** Aunque los organismos anaeróbicos se desarrollan naturalmente entre la basura, estos mismos también se encuentran en las excrementos humanos y de animales, por lo que el proceso de generación de gas se acelera cuando en un relleno también se

disponen los lodos de los sistemas de tratamiento de aguas servidas. Además esto agrega humedad.

- **Mezcla:** En un relleno sanitario, al mezclar la basura logra poner en contacto los organismos anaeróbicos con su fuente alimenticia. Lo mismo hace la recirculación de líquidos percolados.
- **Cobertura:** La cobertura periódica y sistemática de la basura evita que esta entre en contacto con el aire permitiendo la generación de condiciones anaeróbicas que la degradan y producen biogás. Mientras antes se den estas condiciones más rápido comienza a degradarse la basura.
- **Compactación:** La compactación de la basura genera el contacto con los nutrientes y la humedad, y tiende a expulsar el oxígeno presente, lo que a su vez tiende a reducir el tiempo en que se inicia la biodegradación anaeróbica.

Algunos autores, sugieren que en los vertederos o basurales abiertos, en los cuales la basura no es compactada ni cubierta, ocurre una baja descomposición anaeróbica puesto que la basura se encontraría en contacto con el aire primando un proceso de oxidación. En estos casos donde la descomposición de la basura ocurre en condiciones aeróbicas donde se generaría en su mayor parte  $\text{CO}_2$  y agua y prácticamente nada de metano. Bajo condiciones anaeróbicas entonces, el metano y el  $\text{CO}_2$  son los principales gases que se generan en un relleno sanitario.

Así mismo, cuando la degradación se genera bajo condiciones que no son controladas, el proceso ocurre en forma aleatoria en la basura depositada y es muy difícil predecir el nivel de biodegradación que ocurre en el relleno y el horizonte de tiempo en que esta se desarrolla. Tras años de experiencia práctica y de investigaciones conducidas en el mundo más desarrollado se ha logrado alcanzar algún grado de entendimiento acerca de los procesos de biodegradación de la basura y de la producción de biogás y su composición.

## FASES EN LA BIODEGRADACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS

En general la biodegradación de los residuos sólidos sigue un patrón de cinco etapas:

**Fase 1:** Esta fase es aeróbica que sucede inmediatamente después que la basura es depositada. Las sustancias de fácil biodegradación se comienzan a degradar a partir de su contacto con el oxígeno del aire. Esta primera fase de descomposición microbiana de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos se realiza bajo condiciones aerobias, mientras se ejecutan las operaciones necesarias para introducir la materia orgánica en un medio que posea condiciones anaerobias: túneles de fermentación, digestor, vertedero, etc. Se produce  $\text{CO}_2$  y la temperatura comienza a elevarse. En general es una etapa relativamente corta.

**Fase 2:** Fase de transición, esta etapa también es una etapa aeróbica, durante la cual aún no se desarrollan condiciones anaeróbicas. Ocurre un proceso de fermentación, donde se desarrollan ácidos en los líquidos percolados y se produce una caída importante en el pH. En estas condiciones el biogás está compuesto básicamente de CO<sub>2</sub>. Se caracteriza esta fase por el paulatino descenso de las condiciones aerobias, presencia de oxígeno, hasta su completa desaparición, comenzando la etapa anaerobia. El oxígeno desaparece del metabolismo respiratorio, siendo sustituido por compuestos inorgánicos oxidados, como el nitrito y el sulfito, los cuales, sometidos a un potencial de oxidación-reducción del medio en torno a -50 a -100 milivoltios, se reducen a gas nitrógeno y sulfuro de hidrógeno.

En estas condiciones, el potencial reductor del medio irá incrementándose, y cuando llegue a valores en torno a -150 a -300 milivoltios, comenzará la generación de metano. Mientras sigue bajando el potencial de oxidación/reducción, los microorganismos encargados de la descomposición de la materia orgánica comienzan un proceso que se resume en la conversión del material orgánico complejo en ácidos orgánicos y otros productos intermedios. El pH de la fase líquida, si es que existe, comienza a caer debido a la presencia de ácidos orgánicos y al efecto de las elevadas concentraciones de CQ dentro del medio.

**Fase 3:** Fase ácida, en esta fase se acelera la actividad microbiana iniciada en la fase anterior con la producción de cantidades significativas de ácidos orgánicos y pequeñas cantidades de gas de hidrógeno. Esta fase, predominada por las bacterias denominadas no metanogénicas o acidogénicas, pueden resumirse en:

Transformación enzimática o hidrólisis, de compuestos con alto peso molecular como los lípidos, polisacáridos, proteínas, ácidos nucleicos, etc., en otros compuestos aptos para ser utilizados por los microorganismos como fuentes de energía y como transformación a carbono celular.

Conversión microbiana o acidogénesis de los compuestos resultantes del primer paso de este proceso, en compuestos intermedios de bajo peso molecular, como son el ácido acético, CH<sub>3</sub>COOH, y las pequeñas concentraciones de ácido fúlvico y otros ácidos más complejos.

Las características propias de la fase ácida son:

Generación de diversos compuestos gaseosos, principalmente dióxido de carbono, CO<sub>2</sub>, además de gas de hidrógeno, H<sub>2</sub>.

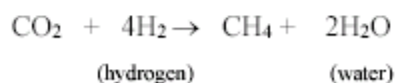
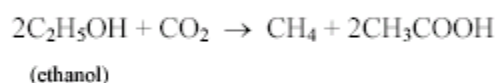
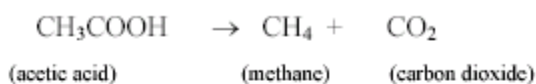
El pH de la fase líquida del medio, si existe, frecuentemente caerá hasta un valor de 5 o menos, por la presencia de los ácidos orgánicos y por las elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub>.

La demanda bioquímica de oxígeno, DBO<sub>5</sub>, la demanda química de oxígeno, DQO, y la conductividad del medio líquido se incrementarán significativamente debido a la disolución de ácidos orgánicos.

Disolución de algunos constituyentes inorgánicos, principalmente metales pesados, y de algunos nutrientes en el medio líquido, debido a los bajos valores del pH.

**Fase 4:** Esta fase, dominada por microorganismos que comienzan a desarrollarse hacia el final de la fase ácida, estrictamente anaerobios y denominados metanogénicos, se caracteriza por la conversión del ácido acético y el gas de hidrógeno, producidos por los formadores de ácidos en la fase ácida, en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. Es también la fase anaeróbica donde la producción de metano alcanza su más alto nivel, con una concentración de metano estable en el rango de 40% a 60% por volumen de biogás. Los ácidos orgánicos en los líquidos percolados se descomponen inmediatamente en biogás. La carga orgánica de los percolados es baja y consiste principalmente de componentes orgánicos de alta biodegradabilidad. Como las condiciones son eminentemente anaeróbicas los percolados tendrán una alta concentración de amoníaco.

Debido a la transformación de los ácidos y el gas de hidrógeno en CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, el pH de la fase líquida subirá a valores más neutros, en el rango de 6,8 a 8, reduciendo las concentraciones de DOB<sub>5</sub> y DQO, así como el valor de conductividad del líquido. Con este incremento de pH, disminuye la concentración de los constituyentes inorgánicos en la disolución y, como resultado, la concentración de metales pesados presentes en el líquido también se reducirá



**Fase 5:** Fase de maduración, esta fase mucho menos activa en cuanto a la generación de gases se refiere, viene caracterizada por una disminución de la humedad y la conversión del material biodegradable que anteriormente no estaban disponibles.

La velocidad de generación del gas de vertedero disminuye significativamente, porque la mayoría de los nutrientes disponibles se han diluido en el medio líquido durante las fases anteriores, y los sustratos que quedan en el medio sólido son de una degradación lenta.

Las fases 1 y 2 pueden tener una duración de entre semanas a dos o más años. En general, una mayor temperatura ambiental tenderá a acelerar los procesos de biodegradación. Altas tasas de compactación y acumulación de la basura en capas delgadas también tendrán el mismo efecto. La acumulación de la basura en celdas pequeñas también acelerará las reacciones tendiendo a reducir la duración de estas etapas.



Las fases 3 y 4, en tanto, pueden llegar a durar aproximadamente 5 años en su nivel más elevado para luego decaer progresivamente, dependiendo de las condiciones de operación del relleno y en particular del contenido de humedad de la basura. Como la humedad tiende a acelerar las bioreacciones que ocurren en la basura, las precipitaciones tenderán a reducir la duración de estas etapas y a aumentar la generación de biogás en el tiempo. La recirculación de los líquidos percolados hacia las celdas de disposición contribuirá al contenido de humedad de la basura y a acelerar las reacciones.

La fase 5 del ciclo de vida de un relleno sanitario dependerá en gran parte de las condiciones de operación desarrolladas desde un principio en un relleno. Sin embargo, puede tomar décadas e incluso siglos para que la basura depositada en un relleno finalmente se estabilice.

## **DIGESTIÓN ANAEROBIA**

La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en ausencia de oxígeno que da lugar a una mezcla de gases (principalmente metano y dióxido de carbono), conocida como "biogás" y a una suspensión acuosa o "lodo" que contiene los componentes difíciles de degradar y los minerales inicialmente presentes en la biomasa. La materia prima preferentemente utilizada para someterla a este tratamiento es la biomasa residual con alto contenido en humedad, especialmente los residuos ganaderos y los lodos de depuradora de aguas residuales urbanas.

Aunque la digestión anaerobia es un proceso ampliamente conocido en la práctica, se posee en la actualidad una información muy limitada sobre su química y su microbiología. Sin embargo, se puede afirmar en líneas generales que la digestión anaerobia se desarrolla en tres etapas durante las cuáles la biomasa se descompone en moléculas más pequeñas para dar biogás como producto final, por la acción de diferentes tipos de bacterias.

Las variables que influyen en el proceso son las siguientes:

- Temperatura: se encuentra un funcionamiento óptimo alrededor de los 35 ° C
- Acidez: determina la cantidad y el porcentaje de metano en el biogás, habiéndose encontrado que el valor óptimo de pH oscila entre 6,6 y 7,6.
- Contenido en sólidos: se suele operar en mejores condiciones con menos de un 10% en sólidos, lo que explica que la biomasa más adecuada sea la de alto contenido en humedad.
- Nutrientes: para el crecimiento y la actividad de las bacterias, éstas tienen que disponer de carbono, nitrógeno, fósforo, azufre y algunas sales minerales.
- Tóxicos: aparte del oxígeno, inhiben la digestión concentraciones elevadas de amoníaco, sales minerales y algunas sustancias orgánicas como detergentes y pesticidas

El producto principal de la digestión anaerobia es el biogás, mezcla gaseosa de metano (50 a 70%) y dióxido de carbono (30 a 50%), con pequeñas proporciones de otros componentes (nitrógeno, oxígeno, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno), cuya composición depende tanto de la materia prima como del proceso en sí. La cantidad de gas producido es muy variable, aunque

generalmente oscila alrededor de los 350 L/kg de sólidos degradables, con un contenido en metano del 70%.

Por su parte, el efluente de la digestión está compuesto por diversos productos orgánicos e inorgánicos y se puede utilizar tanto en la fertilización de suelos, con excelentes resultados, como en alimentación animal, aspecto aún en vías de investigación.

Etapas de la digestión anaeróbica:

- Hidrólisis de los polímeros complejos.
- Acidogénesis por fermentación de los monómeros produciendo acetato, propionato, butirato, succinato, alcoholes, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>.
- Acetogénesis por fermentación secundaria generando acetato, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>.
- Metanogénesis a partir de H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, acetato

Los procariontes reductores de CO<sub>2</sub> más importantes son los metanógenos, un grupo de arqueobacterias anaeróbicas estrictas que emplean generalmente el H<sub>2</sub> como donante de electrones. Hay por lo menos diez substratos que se convierten en metano por la acción de uno u otro metanógeno, todos los cuales liberan energía adecuada para la síntesis de ATP, incluyendo formiato, acetato, metanol, metilmercaptano y metilamina

La conversión de acetato a metano aparece como un proceso ecológico muy importante en digestores de residuos y en medios anóxicos de agua dulce, donde no hay una competencia excesiva por el acetato con otras bacterias. A pesar de que la producción de metano está muy extendida, son pocos los compuestos de carbono que sirven como precursores directos de la metanogénesis. Por lo tanto, es un proceso que depende de la producción de esos compuestos por otros organismos, a partir de la materia orgánica compleja.

En muchos ambientes anóxicos los precursores inmediatos del metano son el H<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> que se generan por las actividades de los organismos fermentadores. En el proceso general de producción de metano a partir de la fermentación de un polisacárido, como la celulosa, pueden intervenir hasta cinco grupos fisiológicos de procariontes. Las bacterias celulolíticas rompen la molécula de celulosa, de peso molecular elevado, en celobiosa y glucosa libre. Por acción de los fermentadores primarios, la glucosa origina ácidos orgánicos, alcoholes, H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. Todo el hidrógeno producido es consumido inmediatamente por las bacterias metanogénicas, las acetogénicas o las reductoras de sulfato si éste se halla en alta concentración. Además el acetato puede ser convertido en metano por otros metanógenos.

## ¿QUÉ ES EL BIOGAS?

El biogás es un gas producido por bacterias durante el proceso de biodegradación de material orgánico en condiciones anaeróbicas (sin oxígeno). La generación natural de biogás es una parte importante del ciclo biogeoquímico del carbono. El metano producido por bacterias es el último eslabón en una cadena de microorganismos que degradan material orgánico y

devuelven los productos de la decomposición al medio ambiente. Este proceso que genera biogás es una fuente de energía renovable.

Cada año, la actividad microbiana libera entre 590 y 880 millones de toneladas de metano a la atmósfera. Cerca del 90% del metano emitido proviene de la descomposición de biomasa. El resto es de origen fósil, o sea relacionado con procesos petroquímicos. La concentración de metano en la atmósfera en el hemisferio norte es cerca de 1.65 partes por millón

El biogás es un poco más liviano que el aire y posee una temperatura de inflamación de alrededor de los 700 ° C (Diesel 350 ° C, gasolina y propano cerca de los 500 ° C). La temperatura de la llama alcanza 870 ° C. El biogás está compuesto por alrededor de 60 % de metano (CH<sub>4</sub>) y 40% de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). El biogás contiene mínimas cantidades de otros gases, entre otros, 1% de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S).

Entre más largo es el tiempo de retención, más alto es el contenido de metano, y con esto el poder calorífico. Con tiempos de retención cortos el contenido de metano puede disminuir hasta en un 50%. Con un contenido de metano mucho menor del 50%, el biogás deja de ser inflamable.

El cuadro siguiente resume la composición promedio del biogás según la fuente. El valor calorífico varía entre 17 y 34 MJ/m<sup>3</sup> según el contenido de metano.

Composición del biogás derivado de diversas fuentes (6).					
Gases	Desechos agrícolas	Lodos cloacales	Desechos industriales	Rellenos sanitarios	Propiedades
Metano	50 - 80%	50 - 80%	50 - 70%	45 - 65%	combustible
CO <sub>2</sub>	30 - 50%	20 - 50%	30 - 50%	34 - 55%	ácido, asfixiante
Vapor agua	saturación	saturación	saturación	saturación	corrosivo
Hidrógeno	0 - 2%	0 - 5%	0 - 2%	0 - 1%	combustible
H <sub>2</sub> S	100 - 7000ppm	0 - 1%	0 - 8%	0,5 - 100ppm	corrosivo, olor, tóxico
Amoníaco	trazas	trazas	trazas	trazas	corrosivo
CO	0 - 1%	0 - 1%	0 - 1%	trazas	tóxico
Nitrógeno	0 - 1%	0 - 3%	0 - 1%	0 - 20%	inerte
Oxígeno	0 - 1%	0 - 1%	0 - 1%	0 - 5%	corrosivo
Orgánicos	trazas	trazas	trazas	5ppm	corrosivos, olores

## COMPOSICIÓN Y PROPIEDADES DEL BIOGAS

El biogás es una mezcla de gases compuesta principalmente de:

- Metano (CH<sub>4</sub>): 40-70% del volumen.
- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): 30-60 vol. %
- Otros gases: 1-5 vol. % ; incluyendo hidrógeno (H<sub>2</sub>): 0-1 vol. % y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S): 0-3 vol. % y trazas de vapor de agua.

Como en cualquier otro gas, algunas de las propiedades características del biogás dependen de la presión y la temperatura. También son afectadas por el contenido de humedad. Los factores más importantes para caracterizar el biogás son los siguientes:

- Como cambia el volumen cuando cambian la presión y la temperatura,
- Como cambia el valor calorífico cuando cambian la temperatura, presión y/o contenido de agua, y
- Como cambia el contenido de vapor de agua cuando cambian la temperatura y/o la presión.

El **valor calorífico** del biogás es cerca de 6 kWh por metro cúbico. Es decir que un metro cúbico de biogás es equivalente a aproximadamente medio litro de combustible diesel.

El gas de relleno o biogás es explosivo e inflamable. Si no se evacua de manera adecuada, se dispersa sin control dentro del relleno e invade también terrenos adyacentes. Puede causar incendios o explosiones. Ya se observaron casos en los cuales el gas de relleno se infiltró dentro del sótano de edificios o dentro del alcantarillado y causó explosiones.

Si el CH<sub>4</sub> (metano) es explosivo en concentraciones entre 5 - 15 %; en concentraciones más elevadas de 15 %, es inflamable. Otros impactos nefastos del gas de relleno consisten en la dispersión en el suelo, donde el metano puede dañar a las raíces de las plantas, impidiendo el suministro de la planta con oxígeno y aire. El metano también tiene un impacto venenoso en los seres humanos expuestos durante largo tiempo (por ejemplo, los obreros del relleno, recicladores trabajando en el relleno). Además, el metano tiene alto impacto como gas de invernadero y daña a la atmósfera y al clima.

## RENDIMIENTOS TEÓRICOS DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS DISPUESTOS

El metano y el CO<sub>2</sub> son los principales constituyentes del biogás y se producen durante la descomposición anaeróbica de la celulosa y las proteínas en la basura de los rellenos. La descomposición anaeróbica ocurre en ausencia de oxígeno. Además de los gases nombrados en los rellenos también se genera una pequeña proporción de compuestos orgánicos no metanogénicos. Estos compuestos incluyen contaminantes atmosféricos peligrosos y compuestos orgánicos volátiles (COV).

La descomposición es un proceso complejo que requiere que se den ciertas condiciones, como ya se indicó más arriba, factores ambientales como la cantidad de materias orgánicas y el contenido de humedad de la basura, la concentración de nutrientes, la presencia y distribución de microorganismos, el tamaño de las partículas de la basura, la inmisión de agua, pH, y temperatura, afectan la descomposición de la basura y la generación de biogás. Debido al complejo conjunto de condiciones que deben ocurrir para que se genere biogás, se estima que la basura debería llevar depositada al menos un año o más para que se comience a desarrollar la descomposición anaeróbica y comience la generación de biogás. La basura acumulada en un relleno puede generar gas durante 20 o 30 años. Sin embargo, en botaderos sin control donde la basura está en exposición al aire, resulta una descomposición aeróbica que sólo emite CO<sub>2</sub> y agua.

En teoría, la cantidad de biogás que se genera de una tonelada de carbono biodegradable corresponde a 1,868 Nm<sup>3</sup> (Nm<sup>3</sup> = Metro cúbico normal). En países industrializados, la cantidad teórica es de 370 Nm<sup>3</sup> de biogás por cada tonelada de basura depositada.

En general, la evidencia empírica en los países desarrollados ha demostrado que la biodegradación ocurre en forma dispareja e imperfecta, por lo que se considera que la generación de biogás se aproximaría más a los 200 Nm<sup>3</sup> por cada tonelada de basura depositada que a la cifra anterior.

Algunos autores han hecho estimaciones teóricas basadas en supuestos acerca de la composición química de la basura doméstica, y le han aplicado estos supuestos a la ecuación de Buswell de metanogénesis, que gobierna el proceso metanogénico. Estos cálculos han obtenido rendimientos teóricos de biogás, considerando el total de la basura o considerando una biodegradabilidad ponderada. En la siguiente tabla se entregan algunos resultados de estos cálculos:

Tabla 1.- Rendimiento del biogás

Por otro lado, el Landfill Methane Outreach Program de la EPA de Estados Unidos recomienda varios métodos para estimar con mayor o menor precisión la generación de biogás en un relleno sanitario.

El “Método A: Aproximación Simple” : Es, como su nombre lo indica una aproximación gruesa basada en la cantidad de basura depositada en un relleno. El procedimiento se basa en una razón empírica entre cantidad de basura y flujo de biogás observada en los muchos y variados proyectos de recuperación de biogás de rellenos sanitarios estudiados por este programa. Es un reflejo de las características del relleno promedio y puede no representar con precisión las distintas características de la basura, el clima y otras variables que pueden estar presentes en un relleno específico. En general la EPA recomienda utilizar esta regla sólo como un proceso preliminar para determinar si es necesario utilizar métodos más complejos.

Esta regla simple de aproximación sólo requiere conocimientos acerca de la cantidad de basura depositada en el relleno de interés y se nutre del juicio y experiencia de expertos de la industria, que han establecido que la generación de biogás varía entre 0,05 y más de 0,20 piés cúbicos (pc) al año por cada libra (lb) de basura. Lo que da la siguiente ecuación:

$$\text{Generación anual de biogás (pc)} = 0,10 \text{ pc/lb} \times 2000 \text{ lb/ton} \times \text{cantidad basura depositada (ton)}$$

Este método no considera una serie de características del sitio, entre ellas el tiempo que la basura lleva depositada, el cual tiene una influencia negativa sobre la generación de biogás (después de la etapa de estabilización), por lo que la relación de generación anterior puede ser sólo útil para calcular la generación durante un par de años luego que se comienza a recolectar el gas. De ahí en adelante la EPA recomienda comenzar a aplicarle un factor de disminución anual de entre 2% y 3% a la generación de biogás.

Método B: “Modelo de degradación de primer orden”: El cual sí puede ser usado para contabilizar el cambio en la tasa de generación de biogás de acuerdo a la vida útil del proyecto de relleno. El modelo de degradación de primer orden es más complicado que la gruesa regla anterior y requiere de mayor conocimiento de las características del relleno, al menos en lo que se refiere a las siguientes 5 variables:

- Promedio anual de recepción de basura;
- Número de años que el relleno lleva abierto;
- Número de años que el relleno lleva cerrado, sin recibir basura, si corresponde;
- Potencial de generación de metano de la basura; y

- Tasa de generación anual de metano de la basura.

$$LFG = 2L_0 R(e^{-kc} - e^{-kt})$$

Donde:

LFG = Total de biogás generado en el año corriente (pies cúbicos)

L<sub>0</sub> = Potencial total de generación de metano de la basura (pies cúbico/libra)

k = Tasa anual de generación de metano

R = Tasa promedio de recepción de basura anual durante la vida activa (libras)

t = Años desde que se abrió el relleno (años)

c = Años desde que se cerró el relleno (años).

El potencial de generación de metano, L<sub>0</sub>, representa la cantidad total de metano por peso que la basura generaría durante su proceso de descomposición en un relleno sanitario. La constante de degradación, k, representa la tasa a la cual el metano es liberado de cada libra de basura. El total de biogás que se genera en el relleno es simplemente la multiplicación por 2 de la generación de metano calculada por el modelo (de ahí el factor 2 en la fórmula).

El supuesto es que la mitad del biogás está constituida por metano. Si estos valores fueran conocidos el modelo podría predecir con bastante precisión la generación de metano, puesto que tanto L<sub>0</sub> como k varían mucho de acuerdo a las características de cada relleno y la basura recibida, y el clima afecta especialmente al factor k. En la utilización de este modelo el Landfill Gas for Energy

El Programa de la EPA recomienda utilizar los siguientes rangos de valores:

**Tabla 2.- Potencial de Generación de Metano**

Variable	Rango	Valores sugeridos		
		Clima húmedo	Clima semi-húmedo	Clima seco
L <sub>0</sub> (pies <sup>3</sup> /libra)	0-5	2,25-2,88	2,25-2,88	2,25-2,88
k(1/año)	0,003-0,4	0,1-0,35	0,05-0,15	0,02-0,10
Fuente: EPA, 1996, Turning a Liability into an Asset: A Landfill Gas-to-Energy Project Development Handbook.				

Aunque las mediciones en terreno no son la práctica estándar la información existente demuestra que los valores reales pueden diferir de las estimaciones en varios ordenes de magnitud. La ingeniería y gestión de un relleno influenciará fuertemente cuánto metano puede ser generado y capturado. Los estándares en cuanto a las características constructivas y operacionales de los rellenos son muy variables entre países y regiones, los que pueden ir desde vertederos abiertos abandonados sin ningún tipo de sistema de control de biogás o

gestión hasta rellenos de altos estándares de ingeniería con sistemas de recolección y tratamiento de gases y líquidos percolados que operan como complejos reactores anaeróbicos industriales.

Los sistemas de recolección de gases no son 100% eficientes. Más bien se estima que raramente superan el 70-75% de eficiencia. Los mayores niveles de recolección generalmente no se mantienen parejos durante la vida de un relleno. Al principio de las operaciones no se recolectará prácticamente nada de biogás debido a que los sistemas de recolección no se encuentran totalmente instalados, las condiciones anaeróbicas aún no se comienzan a manifestar como para generar biogás en cantidades apreciables y la mayoría de este se fugará por el frente de carga de basura. En la medida que el sitio envejece, la concentración de metano decaerá y el contenido energético del biogás será cada vez menor al igual que los eventuales peligros y daños que pueda generar.

Por lo anterior, cualquiera de los métodos teóricos para estimar el potencial de generación de biogás de un relleno sanitario tendrá altos grados de imprecisión. Incluso los tests de bombeos en terreno son considerados imprecisos para estimar emisiones a futuro, debido a que representan una medición instantánea en un momento o período dado del tiempo y las condiciones de un relleno pueden variar en plazos más largos. Ni siquiera pruebas repetitivas pueden ser consideradas de mayor precisión para estimar los factores de generación como  $k$  y  $L$ , ya que tanto la basura acumulada como la recibida y las condiciones de operación del relleno cambian en el tiempo. El único método realmente confiable es uno en que se realizan mediciones directas y continuas del biogás en el sistema de recolección del relleno sanitario.

El modelo de degradación de primer orden recomendado por la EPA proveerá de mejores estimaciones mientras mejor sea la información disponible para hacer los cálculos.

## **MANEJO DE LOS GASES**

El gas de relleno se puede evacuar con drenaje activo o pasivo. El drenaje activo consiste en la succión del gas mediante un soplador. Cuando se hace el drenaje pasivo, se controla la difusión natural de los gases, con el fin de evacuarles solamente por los orificios previstos. Se logra una mayor eficiencia con el drenaje activo, pero los costos del drenaje pasivo son mucho más bajos.

### **DRENAJE PASIVO**

#### **DRENAJE PASIVO SIN CHIMENEAS**

En un relleno compactado, el gas de relleno se mueve con preferencia horizontalmente en las capas de basura. Se difunde por la capa superficial del cuerpo de basura o por los taludes



laterales, se mezclan con el aire y se diluyen. La cubierta con tierra tiene un impacto como filtro biológico, es decir que ya existe un cierto tratamiento de los gases de relleno antes de que se mezclen con la atmósfera. Es verdad que en la práctica el drenaje pasivo sin chimeneas provoca algunos problemas, los más importantes son los siguientes:

- En las celdas ya terminadas, cubiertas y planteadas, se puede impedir el suministro de aire de las raíces por causa de la concentración alta de metano en la capa de tierra.
- Cuando existen fisuras en los taludes o la superficie del relleno, los gases se difunden por las fisuras sin pasar por el filtro biológico que constituye la capa de tierra.
- Si se descarga lodo o basura muy húmeda en el relleno, o si el relleno está expuesto a demasiada lluvia, se pierde el impacto de filtro biológico.
- Si se produce una cantidad muy alta de gas de relleno o si el gas se difunde solamente en algunos puntos definidos y no por la superficie entera, hay demasiada carga al filtro biológico y el filtro pierde su eficiencia.
- En el Páramo o en la estación fría en la Sierra no accede suficiente oxígeno a los microorganismos en la capa de tierra y el filtro biológico no funciona adecuadamente.

El drenaje pasivo se puede aplicar en rellenos cerrados o en rellenos operados. En un relleno todavía en operación, la capa actual de superficie sirve como filtro biológico. Para eso es muy importante que se cubra diariamente la basura con una capa suficiente de tierra. Si se implementa en una celda que ya terminó su vida útil, se pueden recomendar 2 tipos de procedimiento:

a) *Orificios sirviendo como filtros biológicos*

La celda se cierra y se cubre con tierra bien compactada. Se dejan orificios en esta cubierta de tierra y se llenan con compost. No se compacta el compost en estos orificios! Debe ser suelto para tener la eficiencia óptima como filtro biológico. El Dibujo 24 muestra la aplicación del drenajepasivo en un relleno cerrado:

b). *Celdas cubiertas con compost*

Si el municipio en cuestión dispone de una planta de compostaje, y las celdas del relleno son relativamente pequeñas, se puede también recomendar la alternativa de no compactar la capa superficial del cuerpo de basura. En este caso, se coloca una capa de compost con el espesor de 50 cm sobre la celda cerrada. Esta capa serviría como filtro biológico. Como la superficie de este filtro es muy extendida, la carga de contaminantes por área es sumamente baja, lo que asegura una eficiencia óptima.

Esta alternativa se recomienda especialmente para rellenos sanitarios manuales con una adyacente planta de compostaje. El Dibujo 25 muestra un relleno sanitario

manual cubierto con una capa de compost que sirve como filtro biológico para los gases de relleno.

Generalmente no se recomienda el drenaje pasivo sin chimeneas. Solamente se puede preferir este método en los siguientes casos:

- Municipalidad pequeña que no tiene los recursos personales para construir chimeneas durante la operación del relleno sanitario.
- Evacuación de gases de relleno en un botadero cerrado que no tiene ningún dispositivo para el drenaje.
- Relleno pequeño manual con mala compactación. Aquí hay un mayor porcentaje de gas que se difunde por la superficie del cuerpo de basura, ya que la difusión vertical no se impide por la compactación.

### **DRENAJE PASIVO CON CHIMENEAS**

Si se realiza el drenaje pasivo con chimeneas hay que construir las chimeneas de drenaje durante la operación del relleno sanitario. Aquí se aprovecha de la difusión horizontal del gas de relleno. El gas se difunde hacia la próxima chimenea y por ella de manera controlada hacia afuera. Las chimeneas tienen una alta permeabilidad para el gas y por consecuencia queda muy baja la cantidad de gas que no se difunde por la chimenea, pero por la superficie del cuerpo de basura sí. Las chimeneas de drenaje se pueden construir de dos maneras:

- Jaula de malla con 4 puntales de madera, llenada con piedra bola o grava
- Tubo perforado llenado con piedra bola o grava

Si se realiza el drenaje pasivo con chimeneas, es muy importante que se quemé el gas de relleno que sale de las chimeneas. Si no, las chimeneas constituyen un peligro importante para los obreros y recicladores en el relleno, porque los gases de relleno salen casi sin dilución de las chimeneas.

Se puede quemar el gas de relleno dentro de la chimenea, protegiendo los puntales y la malla con un tubo de hormigón o un capuchón metálico. Este capuchón se puede fabricar de barriles o latas abandonadas. La chimenea donde se incinera el gas no debe ser más elevada que la celda para evitar que se mezcle el aire ambiental con el gas combustible. Con la incineración controlada del gas puro de relleno se evita también el peligro de explosión que siempre existe cuando se mezcla el metano con la atmósfera.

Es más fácil incinerar los gases en una chimenea que se encuentra en una celda ya cerrada, pues se queda igual el nivel de la celda, pero es también posible incinerar los gases en una celda en operación. Aquí hay que apagar el fuego en la chimenea y elevarla paralelamente con el crecimiento de la celda. Este trabajo se debería hacer cada 2 semanas o cada mes, dependiendo del tamaño del relleno.

### **DRENAJE ACTIVO**

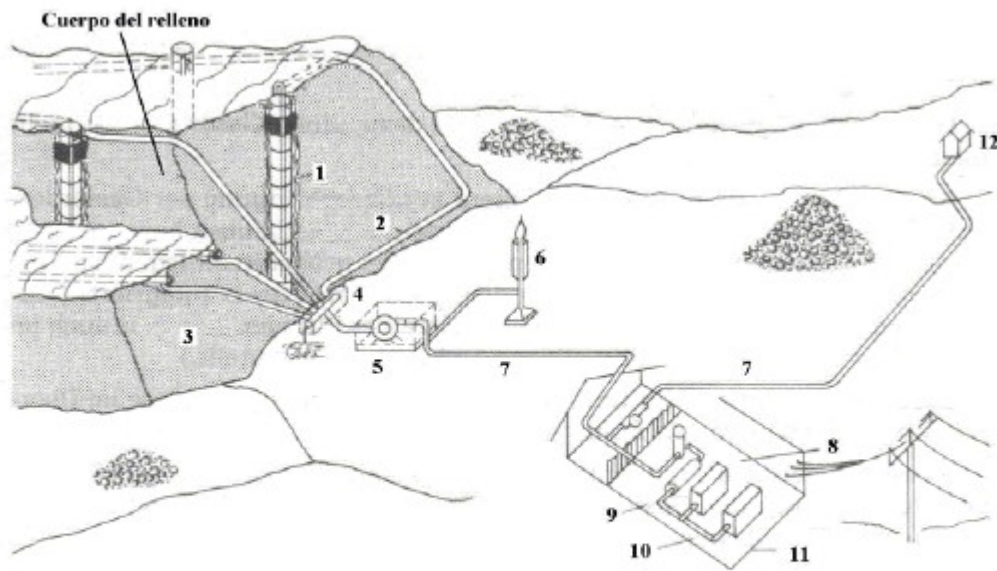
En los sistemas de drenaje activo, se succiona el gas con un soplador que se conecta con las chimeneas. Se conducen los gases hacia el incinerador por un sistema de tubería bajo el cuerpo de basura, como se muestra en el Dibujo.

El sistema de drenaje activo consiste de los siguientes elementos:

- Colectores de gas: Estos son las chimeneas verticales y la tubería horizontal que se colocan en el cuerpo de basura.
- Punto de recolección: El gas aspirado en diferentes chimeneas se conduce a ellas y se junta. El punto de recolección puede ser un tanque o un tubo. Se recomienda ubicar el punto de recolección en un nivel abajo de la tubería y de las chimeneas, con el fin de poder condensar en este lugar las aguas contenidas en el gas de relleno. Se debe colocar equipo de medición y ajuste en el punto de recolección.
- Separador de agua: Las aguas condensadas se separan del flujo de gas mediante un sifón o equipo refrigerador; después se manda con una bomba hacia la planta de tratamiento de las aguas lixiviadas.
- Tubo de aspiración de gas: Este es el tubo que conecta el punto de colección con el soplador. Ajuste de presión y soplador: El soplador produce depresión para succionar los gases del cuerpo de relleno, y sobrepresión para mandar los gases al incinerador. El ajuste de presión mantiene la depresión y la sobrepresión en el nivel óptimo. La presión necesaria para la succión es entre 200 - 300 mbar.
- Casa del soplador: En rellenos medianos o pequeños, el soplador se puede colocar en un galpón semiabierto con techo o en un contenedor. Para rellenos grandes, se recomienda colocar el soplador en el mismo edificio que el incinerador.
- Tubo de transporte: Este es el tubo que conduce los gases con sobrepresión hacia el incinerador.
- Antorcha: Unidad donde se quema el gas bajo control.
- Incinerador: Unidad compuesta de la antorcha, del equipo para aprovechar la energía de incineración y de los equipos auxiliares (tratamiento del gas, separación de gases, ajustes etc.)

El siguiente Dibujo muestra un sistema de drenaje activo con todas las unidades:

Dibujo 30: Unidades del sistema de drenaje activo /25/



1	Chimenea	7	Tubería de transporte
2	Colector de gas	8	Consumidor 1
3	Drenaje de gas	9	Tratamiento del gas
4	Punto de colección	10	Conversión del gas en energía eléctrica
5	Punto de transporte de gas	11	Casa de turbinas
6	Antorcha	12	Consumidor 2

## CHIMENEAS Y TUBERÍA PARA EL DRENAJE ACTIVO

Se deben considerar los siguientes puntos durante el diseño de un sistema de drenaje activo para los gases de relleno:

- La depresión debe ser eficiente en todo el cuerpo de basura.
- Se debe minimizar la cantidad de aire succionado por el soplador.
- El sistema debe tener una larga vida útil.
- La capacidad de succión debe ser apropiada a la cantidad de gas.
- Los tubos de succión deben ser lo más corto posible, para no tener demasiadas pérdidas de presión.

Cuando se diseña el sistema de drenaje activo junto con el relleno, generalmente se utiliza tubería horizontal colocada en diferentes niveles del cuerpo de basura para aspirar los gases. Si se debe añadir el sistema de drenaje activo a un relleno ya cerrado, es posible perforar el cuerpo de basura para poder colocar chimeneas verticales.

Se resumen las informaciones más pertinentes para el dimensionamiento de las chimeneas y la tubería en el Cuadro a continuación:

Con sistemas activos de drenaje, se puede evacuar un 40 - 45 % del gas de relleno. Es importante que la concentración del metano sobre la superficie del relleno no exceda 80 ppm.

## **INCINERACIÓN DEL GAS DESPUÉS DEL DRENAJE ACTIVO**

### **INCINERACIÓN CON ANTORCHA**

Si no se aprovecha el gas de relleno produciendo energía eléctrica, se puede incinerar el gas de relleno con antorchas. La incineración con antorcha es un método similar a la incineración controlada en la chimenea, que no aprovecha de la energía de la incineración para producir electricidad.

Se ha desarrollado antorchas especiales donde se queman los gases de relleno con adición controlada de aire. Las antorchas para la incineración del gas de relleno disponen de encendedores automáticos, un sistema de control de la llama y de la temperatura, una válvula automática para apagar y un ajuste del flujo de aire. En las antorchas convencionales, el gas de relleno se quema con una temperatura de aproximadamente 1000 °C. Existen también antorchas para incineración con alta temperatura, que queman los gases con 1200 °C y con las cuales se logra un mejor control de la generación de dioxinas durante el proceso de incineración. Los costos de inversión y de operación son más altos para las antorchas de alta temperatura. El gráfico presenta una antorcha convencional:

Antorcha convencional

## **RECOLECCIÓN DE BIOGÁS EN RELLENOS SANITARIOS**

Como se ha dicho anteriormente, el biogás es producido en forma natural por la degradación de la materia orgánica de la basura. Se genera debido a la acción de bacterias en condiciones anaeróbicas típicas de la mayoría de los rellenos sanitarios. Este gas es principalmente una mezcla de metano y de dióxido de carbono, pero es el metano el que representa la mayor contribución al efecto invernadero debido a su potencial de calentamiento global que supera en 21 veces al CO<sub>2</sub>, y es el componente que permite que eventualmente se pueda usar el biogás para generar energía. En la siguiente figura se muestra el ciclo de las emisiones de Gas Efecto Invernadero (GEI) en los rellenos sanitarios.

Como se indica en la Figura 1, la materia biodegradable (restos de plantas, alimentos, papel, cartón, restos de podas, etc.) en la basura contiene carbono absorbido de la atmósfera por el proceso de fotosíntesis. Los procesos de descomposición que se dan en un relleno sanitario liberan parte de ese carbono en forma de CO<sub>2</sub> como componente del biogás, otra parte se queda en el relleno en forma de compost (sustancias húmedas estables que pueden secuestrar carbono por cientos de años) y en la madera cuya degradación se ve inhibida por las condiciones anaeróbicas. Al recolectar el biogás y quemar el metano se produce CO<sub>2</sub> en la combustión. También parte del CO<sub>2</sub> del biogás se fuga por la incapacidad de recolectarlo

todo. Todo este carbono liberado no se considera como adiciones de GEI a la atmósfera puesto que es parte del ciclo natural de la descomposición de la basura. La preocupación por el control del gas que se genera en la acumulación de basuras surgió de la aparición en las décadas de los 60 y 70 de nuevas técnicas de disposición desarrolladas en el mundo industrializado para mitigar los impactos ambientales de la disposición de la basura. En estas nuevas técnicas los procedimientos para la disposición de basura consideraban su compactación previa, su depósito en rellenos sanitarios, su cobertura con tierra y finalmente, al completarse el relleno, su recubrimiento con una capa impermeable. Este procedimiento, en general evitaba los problemas tradicionales de la disposición abierta de basura (incendios, moscas, ratones, impactos visuales, focos de infección, actividades de recolección, etc.) y dependiendo de la disponibilidad de tierra se consideraba además una técnica barata. Así, la técnica de rellenos sanitarios fue ampliamente aplicada en los países desarrollados. Sin embargo, esta técnica generó dos problemas adicionales:

- Generación de biogás, que puede causar incendios y explosiones en el relleno y en propiedades aledañas, así como dañar la vegetación y producir olores molestos.
- Generación de líquidos percolados potencialmente contaminantes.

Para extraer el biogás de un relleno sanitario, en general se utilizan las siguientes técnicas:

- Contención: Se instalan barreras impermeables alrededor del relleno de manera de preparación para la extracción y recolección del biogás.
- Ventilación pasiva: Se cavan trincheras rellenas con material granulado (por ejemplo: gravilla) alrededor del relleno. Esto rodea las celdas con un área de alta permeabilidad que permite al gas escapar y ser recolectado.
- Ventilación activa: Se instalan corredores o pozos de alta permeabilidad interconectados mediante una red de tuberías que permite recolectar el biogás, usualmente con la adición de una pequeña presión de succión.

El biogás se puede dejar escapar a la atmósfera, se puede quemar en antorchas o utilizar para generar energía. La literatura especializada sugiere que el sistema se puede instalar durante el proceso de relleno de cada celda o después que la celda se haya completado. Si se lo hace durante el proceso de llenado, normalmente el sistema consiste en drenajes horizontales combinados con pozos de recolección. En estos casos se logran rendimientos mayores de recolección. Sin embargo esta modalidad usualmente acarrea problemas operacionales al interrumpir las operaciones de descarga de los camiones, dificultades para realizar la compactación cerca de los pozos y asentamiento disperejo de la basura alrededor de ellos.

Si se instalan después de que las celdas ya han sido rellenas el sistema consistirá en pozos perforados, lo que facilita la instalación y operación de los equipos, pero reduce el volumen total de biogás recolectado y aumentaría los costos. La capacidad de succión de las bombas es crucial para la extracción óptima del biogás y debiera ser diseñada para obtener un flujo máximo de biogás entre 2 y 7 años después de que la celda ha sido completada. También se recomienda la instalación de unidades de monitoreo para controlar y evitar la infiltración de aire a los pozos de extracción de manera de optimizar la extracción. Además, se sugiere

instalar sistemas de recirculación e inyección, en lo posible en cada celda, de los líquidos percolados de manera de potenciar la generación de gas acelerando los procesos de descomposición. En la Figura N°2 se presenta la forma de un pozo típico de extracción de biogás.

El biogás se puede quemar en antorchas, o se puede instalar sistemas que lo reutilicen de alguna manera y permitan una quema más productiva. Existen varias posibilidades para su reutilización, se puede inyectar a una red de gas urbano o de ciudad, se puede generar energía eléctrica, se puede utilizar para generar vapor para procesos productivos, o en una combinación de calor y energía.

En general, el uso directo del biogás en una red de gas urbano requeriría de procesos adicionales de limpieza y enriquecimiento debido a su menor pureza y a los efectos destructivos sobre los equipos de los demás gases constituyentes de la mezcla. El uso como combustible para vehículos también requeriría de limpieza adicional. La producción de agua caliente y calor podría ser útil si existe demanda cercana.

Por otro lado, la conversión del biogás a energía eléctrica a través de turbinas a gas o motores generadores de combustión interna se puede distribuir a través de la red eléctrica o puede ser utilizada por el consumidor más cercano, reemplazando o desplazando la generación de centrales termoeléctricas más caras y más contaminantes. De ahí se deriva el potencial adicional de reducción de emisiones de GEI de este sector.

Varios elementos atentarían contra la generación de biogás. Por lo pronto, la minimización de la generación de basura es una de ellas, así como su aprovechamiento y valorización a través del reciclaje. Si se evita que un relleno entre a la etapa de descomposición anaeróbica al mantener la basura en permanente contacto con el aire circundante, sin cobertura periódica, lo que se produce es una descomposición aeróbica que sólo genera CO<sub>2</sub> y agua. En ese caso no se genera prácticamente nada de gas metano y por lo tanto la contribución de un relleno sanitario al calentamiento global no sería relevante. Sin embargo, salvo en condiciones muy excepcionales este tipo de manejo es riesgoso para el medio ambiente y la salud pública, por lo que no contribuye al desarrollo sustentable.

El ideal sería entonces, que los rellenos fueran biorreactores lo más eficientes posibles de manera de acelerar la descomposición anaeróbica, maximizar la recuperación de biogás y quemarlo en la forma más eficiente y productiva posible, neutralizando la basura en el menor tiempo posible. Esto permitiría reacondicionar y recuperar los terrenos para usos posteriores del máximo valor para la sociedad. En teoría hasta se podría pensar en rellenos sanitarios tan eficientes como biorreactores, con mínima basura no orgánica y de lenta descomposición, óptima humedad y temperatura, máxima eficiencia en generación y captación de gas, y biodegradación acelerada en cada celda, que podrían ser reutilizados indefinidamente.

## **CONVERSIÓN ENERGÉTICA DEL BIOGÁS Y REDUCCION DE EMISIONES DE GAS DE EFECTO INVERNADERO**

El uso predominante del biogás una vez que este es recolectado ha sido como combustible para la generación de electricidad, la cual se distribuye a través de la red local o se transmite hasta algún consumidor cercano. Para efectos de este estudio parece pertinente estudiar esta posibilidad por estas razones:

- La utilización de biogás como fuente de energía local se presenta como una oportunidad de contribución adicional al desarrollo sustentable y como una fuente de generación de empleo, inversión extranjera y desarrollo local. La venta de energía puede generar ingresos adicionales para rentabilizar la operación de un relleno sanitario y la recolección de biogás más allá del mínimo que se colecta actualmente.
- Adicionalmente, esto podría traer consigo bajas en los costos de la disposición final para los municipios y usuarios, lo que podría des-incentivar la utilización de vertederos y/o basurales de características sub-estándar y la disposición en vertederos ilegales, reduciendo impactos ambientales y económicos para las localidades afectadas. La instalación de sistemas de recolección y plantas de energía generaría empleo adicional a la operación del relleno.
- La utilización de biogás como fuente de energía se presenta como una fuente adicional de reducción de emisiones de GEI. En la medida que el metano capturado en un relleno sanitario es utilizado para generar energía que se incorpora a la matriz energética, esta podría reemplazar fuentes más contaminantes que emiten GEI, lo que produciría reducciones adicionales a la mera captura del biogás. Los ingresos provenientes de la venta de reducciones de emisiones servirían para financiar las inversiones necesarias y/o rentabilizar los rellenos.
- La utilización de biogás como fuente de energía puede servir para compensar algunos de los costos externos de la construcción y operación de rellenos sanitarios. La energía generada en base a biogás puede ser distribuida a localidades aledañas a precios subsidiados para compensarlas por los efectos ambientales que la localización de rellenos sanitarios les puede generar. La generación de energía en base a biogás es ventajosa debido a los potenciales beneficios enumerados arriba, y produce un producto final valioso – energía eléctrica de la basura.

Además, el contenido de metano en el biogás decae en el tiempo, disminuyendo su proporción desde 40-60% en los primeros años de un relleno hasta 25-45% en los años finales. La duración y tasas de producción de gas varían en el tiempo dependiendo del proceso de degradación natural de la basura en cada relleno. La vida útil de los sistemas de recolección puede ser bastante larga (15 años o más), sin embargo la utilización económicamente eficiente de estas instalaciones normalmente se puede sostener sólo entre 3 y 8 años.

El diseño y el método de relleno usado en un sitio determinarán su potencial de generación de energía. Los sitios más profundos, con buena impermeabilización, incentivan las condiciones



anaeróbicas y proveen un mejor medio para la actividad bacteriana que degrada la basura, comparados con los rellenos con menor profundidad y con poca o mala cobertura.

Los rellenos modernos aplican algunas medidas para contrarrestar estas variaciones y minimizar la incertidumbre en el potencial de generación. La instalación de sistemas que recolectan los líquidos percolados, los tratan y recirculan a la basura, es una forma de incentivar la descomposición de la basura aumentando y reduciendo la variabilidad en la humedad. Estos sistemas ayudan a estabilizar más rápido los rellenos y a homogeneizar el flujo de biogás. Toda esta variabilidad agrega incertidumbre a los proyectos de control y aprovechamiento de biogás, la que muchas veces sólo puede ser contrarrestada con inversiones adicionales que apuntan a mejorar las características de los rellenos como biorreactores anaeróbicos para controlar los procesos de degradación de la basura y favorecer la generación de energía.

Existen varias tecnologías para la generación de energía del biogás: microturbinas, motores de combustión interna, turbinas a gas, ciclo combinado, turbinas a vapor de caldera. Adicionalmente, existe una serie de tecnologías experimentales para aprovechar tanto el CO<sub>2</sub> como el gas metano generado en los rellenos sanitarios:

- Uso de celdas de combustible de ácido fosfórico (PAFCs) para la generación de energía eléctrica y calor,
- Conversión del metano en gas comprimido para su uso en vehículos,
- Utilización del metano para evaporar los líquidos percolados y condensados del biogás,
- Operación de rellenos como biorreactores aeróbicos o anaeróbicos,
- Producción de metanol,
- Producción de CO<sub>2</sub> industrial, y
- Uso del biogás para calefacción de invernaderos y para aumentar su contenido de CO<sub>2</sub>.

El motor de combustión interna es la tecnología más utilizada en rellenos sanitarios para la recuperación energética del biogás. Aproximadamente el 80% de los 330 proyectos de energía de biogás de rellenos sanitarios actualmente operando en EE.UU. los usan (Methane Outreach Program, EPA). Este tipo de motores son eficientes y más baratos que otras alternativas, y se recomiendan para aquellos proyectos capaces de generar entre 1 y 3 MW. Además, tienen la ventaja de que se encuentran disponibles en diferentes tamaños los que pueden irse adicionando al sistema respondiendo a los incrementos en la generación de gas.

En el manual “Landfill Gas to Energy” de la EPA (1996) se consigna que la oferta de generadores para proyectos de este tipo varía entre los 800 kW y los 3MW, sin embargo hoy en día proyectos menores también estarían utilizando motores de combustión interna. La EPA señala que hoy en día se pueden instalar microturbinas desde 30 kW a 100 kW, lo que hace posible que rellenos sanitarios pequeños también puedan generar energía eléctrica y reducir emisiones. Este tipo de proyectos normalmente se utiliza para autoconsumo del relleno o para vendérselo a consumidores cercanos (una turbina de 30 kW alcanzaría para alimentar el equivalente a 20 casas). Sin embargo, la inversión requerida para estas turbinas

es bastante alta, entre \$4.000 y \$5.000 para turbinas de 30 kW y entre \$2.000 y \$2.500 para turbinas mayores (200kW).

La desventaja de los motores de combustión interna es que sufren de corrosión debido al contenido de ácidos en el biogás, no así las turbinas a gas. Pero estas últimas son más caras, necesitan un gas de calidad consistente y una mayor presión de entrega, lo que aumenta los costos por concepto de instalación y operación de compresores. Para proyectos que superan los 3 a 4 MW de generación potencial normalmente se instalan turbinas para aprovechar economías de escala, ya que el costo de generación por cada kW cae en la medida que el tamaño de la turbina se incrementa. Proyectos mayores a 8 MW requieren turbinas mayores de ciclo combinado.

La combustión directa del biogás es una buena forma de recuperar energía del biogás – normalmente un 80% del valor calorífico del metano puede ser recuperado. Quemar el biogás es similar a quemar gas natural diluido, por lo que probablemente se deben hacer ajustes para adaptarse al menor poder calorífico del biogás.

## **POTENCIAL DE GENERACIÓN DE ENERGÍA DEL BIOGÁS**

La EPA recomienda utilizar las siguientes relaciones para estimar el potencial de generación de energía del biogás de rellenos sanitarios:

Potencial de generación de energía bruto (kW<sub>B</sub>): Esta es la capacidad instalada de generación que el flujo de biogás obtenido de un relleno puede soportar y está dado por la siguiente fórmula:

$$kW = \text{Flujo de biogás (pie}^3/\text{día)} \times \text{Contenido de energía (Btu/pie}^3) \times 1/\text{tasa calorífica (kWh/Btu)} \times 1\text{d}/24\text{hr}$$

Donde:

- Flujo de biogás se refiere a la cantidad neta de biogás por día que es capturada por el sistema de recolección, procesada y entregada al equipo de generación eléctrica (usualmente se supone que esta alcanza entre el 75% y el 85% del total de gas producido en el relleno) (pie<sup>3</sup>/día).
- Contenido de energía del biogás, aproximadamente 500 Btu/pie<sup>3</sup>.
- Tasa calorífica es 12.000 Btu/kWh en motores de combustión interna y 8.500 Btu/kWh en turbinas de ciclo combinado.
- Potencial de generación de energía neto (kW<sub>N</sub>): Esto equivale al Potencial de generación de energía bruto menos las cargas parasíticas de sistemas auxiliares y equipos, las que alcanzan un 2% para motores de combustión interna y 6% para turbinas de ciclo combinado.

- Factor de capacidad anual: Esta el porcentaje de horas al año que el equipo produce electricidad a su capacidad de diseño. Para el caso de proyectos de biogás se estima entre 80 y 95%, considerando un porcentaje de parada de 4 a 10%. Se asume normalmente un 90% para este factor.

Electricidad anual generada: Este es la cantidad de electricidad generada en un año, medida en kWh, que es igual al potencial de energía neto multiplicado por el número de horas operacionales al año. Osea, kWh = kW<sub>N</sub> x hrs.

El potencial de generación, el valor mínimo de interés comercial es de 0,8 MW considerado por la EPA. También la EPA sugiere ciertas condiciones mínimas para pensar en desarrollar proyectos de generación de energía de biogás:

- Que el relleno tenga más de 1 millón de toneladas de basura acumuladas, o genere más de 625.000 pies cúbicos al día, 4.200 toneladas al año (considerando un poder calorífico de 450Btu/kWh).
- Que el sitio esté recibiendo basura o se encuentre cerrado por menos de 5 años, ya que el pick de generación se alcanza poco después de cerrado un relleno.
- Que tenga una profundidad no menor a 13 m.

## **METODOLOGIA DE MONITOREO**

La metodología de monitoreo esta basado en la medida directa de la cantidad de gas de relleno capturado y destruido por la plataforma de quemado. El plan de monitoreo debe proveer de medidas continuas de la cantidad y calidad de LFG quemado. La principales variables que necesitan ser monitoreadas son la cantidad de residuos que se reciben en el relleno sanitario y la cantidad de metano quemado. Estas variables se monitorean como sigue:

**Residuos recibidos:** La cantidad de residuos recibidos en el relleno sanitario es monitoreado directamente empleando una balanza de pesaje.

**Metano colectado y quemado:** La cantidad de metano quemado será determinado por:

- La cantidad de gas de relleno colectado (m<sup>3</sup>, usando un flujometro y midiendo la temperatura y la presión).
- Porcentaje de gas de relleno que es metano (% , usando un analizador continuo)
- Horas de quemado (horas, empleando un cronómetro)

Esta metodología de monitoreo provee medidas directas y continuas de la cantidad actual de gas de relleno quemado y de metano contenido en el gas de relleno quemado empelando un flujometro y un analizador continuo de metano. El analizador continuo de metano es importante debido a que el contenido de metano del gas de relleno capturado varía por más

del 20% durante un día debido a las condiciones de la red de trabajo de captura (dilución con aire en la fuente, fuga en las tuberías, etc).

La metodología de monitoreo es usado mayormente en rellenos sanitarios con gas para una planta de energía donde es necesario tener un control estricto del combustible para la planta de energía.

## **REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GAS DE EFECTO INVERNADERO DERIVADO DE LA RECOLECCIÓN Y CONVERSIÓN ENERGÉTICA DEL BIOGÁS DE RELLENOS SANITARIOS**

La recolección y conversión energética del biogás de los rellenos sanitarios representa una oportunidad para reducir emisiones de GEI, las que se derivan del incremento en la recolección de biogás en los rellenos y del eventual reemplazo de fuentes más contaminantes del proceso de generación que se podría emprender en cada relleno luego de la recolección de biogás.

Por un lado, se ha indicado anteriormente que de una situación actual donde se ha supuesto que el nivel de recolección y quema de biogás actual en los rellenos estudiados alcanza el 25% para fines de prevención de riesgos e impactos ambientales locales, que se mantiene o duplica en el futuro llegando a un 50% (según los escenarios de línea base considerados), se pasaría a un 75% de recolección con fines de reducción de emisiones de GEI y conversión energética.

Esto conllevaría una eventual reducción de emisiones de GEI del orden de entre 95 y 100 millones de toneladas en un período de 25 años, a un promedio anual de entre 3,8 y 4 millones de toneladas. Eso sucedería si los 53 rellenos estudiados implementaran sistemas de recolección y quema de biogás a partir del año 2007, y ese sería el potencial total estimado para este sector.

Este potencial de conversión energética del biogás permitiría adicionar a la oferta de energía eléctrica del país la proveniente de fuentes termoeléctricas menos contaminantes que las más tradicionales. Cada vez que una unidad generadora a biogás fuese despachada para generar electricidad, esta tendería a reemplazar la generación de una unidad a carbón, petróleo o gas natural, evitándose la contaminación que proviene del ciclo energético del correspondiente combustible, puesto que este no sería utilizado para generar. Para estimar el potencial de reducción de emisiones de GEI que se derivaría de lo anterior, hemos supuesto que en el futuro no se prevé la incorporación de otras fuentes alternativas de generación no contaminantes (viento, termales, solares etc.)

## EXPERIENCIAS DEL APROVECHAMIENTO DEL BIOGÁS

### CHILE

En Chile, prácticamente la totalidad de la basura es recolectada y depositada en rellenos sanitarios, donde en general las emisiones de biogás y los líquidos percolados son sometidos a algún grado de control. Históricamente, se ha utilizado parte del biogás generado en algunos rellenos sanitarios con fines domiciliarios, inyectándolo a la red de gas de ciudad (Renca, Lo Errázuriz y La Feria en Santiago, y El Molle en Valparaíso), o con fines industriales (Lepanto en Santiago) el cual es conducido hasta el usuario final.

### ESTADOS UNIDOS

En EE.UU., las instalaciones que producen electricidad del biogás pueden calificar como “productores menores de energía” bajo la legislación del sector (Public Utilities Regulatory Policy Act), la que le exige a las generadoras la compra de energía a estos productores a una tarifa equivalente al costo evitado de generación. De manera que el productor, en este caso un relleno sanitario, tiene un poder de compra asegurado por ley. En EE.UU., actualmente existen en operación 333 proyectos de recuperación de energía de biogás, distribuidos en 229 proyectos con un total de 977 MW de capacidad de generación de electricidad y 104 proyectos con una potencia total de 45.807.500 MMBtu en uso directo.

Adicionalmente se encuentran en construcción 40 proyectos más con una capacidad de generación de electricidad proyectada de 120 MW (28 proyectos) y 5.110.000 MMBtu (12 proyectos), y se espera que se concreten 184 proyectos en el futuro, con 89 generando electricidad (277 MW) y 95 usándolo directamente (30.112.500 MMBtu) (Atcha y Van Son, World Resources Institute, Sept. 2002). Algunos ejemplos en EE.UU. sobre conversión energética del biogás:

- **El proyecto Elk River** desarrolló una central de 525 kW que provee energía a 250 hogares en la ciudad de Elk River en Minnesota.
- **Green Knight Economics Development Project**, una asociación entre Waste Management Inc. (WMI) y Green Knight Economic Development Corporation, organización sin fines de lucro formada para promover el desarrollo económico del Condado de Northampton en Pennsylvania, trabajaron cooperativamente para desarrollar un proyecto de generación de sólo 10MW en un relleno sanitario de WMI para beneficio de la comunidad.
- **Waste Management, Inc.**, por su parte opera más de 30 centrales eléctricas a biogás en todo EE.UU., algunas de las cuales se encuentran operando desde mediados de los 80. Estas centrales produjeron cerca de 1.2 billones de kWh en el año 2000 usando biogás.

- **AMP-Ohio, Browning Ferris Gas Service, Inc. and Energy Developments, Ltd. (EDI)** se asociaron para desarrollar la producción de energía a base del biogás de cuatro rellenos sanitarios en Ohio, y lograron colocar el total de potencia de 28 MW en el mercado.

**A case study in the development of a landfill gas-to-energy project for the Antioch, Illinois, Community School District**

**Proyectos de Energía a gas desarrollados y candidatos a Rellenos Sanitarios**

**EUROPA**

En Europa por su parte, habría 573 MW de potencia instalada operando y se espera que se amplíe en 700 MW en los próximos años (Bates and Haworth, 2001). Una desventaja del biogás como fuente de energía eléctrica es que el potencial de generación es muy variable.

**Table 7. Operating Valorga plants**

Plant	Plant Start-up Year	Waste Type	Treatment capacity (Ton/year)	Digester Volume (m <sup>3</sup> )	Gas Yield Nm <sup>3</sup> /ton input digestion	Biogas end-use	Compost Use
Amiens, France	1988	MSW		3*2400			
	1996	MSW	85,000	1*3500	140-160	High pressure steam for industrial use (5500 kW)	Agriculture
Engelskirchen( Germany	1998	Biowaste	35 000	2*3000	100-110	Heat & electricity ( 940 kW)	Agriculture
Tilburg, Netherlands	1994	Biowaste Or Biowaste + Paper	52 000 or 40000 + 6000	2*3300	80-85	Biogas treated and injected into Tilburg City distribution network	Agriculture
Hanover, Germany	Start-up 2002	MSW + sewage sludge	100000 +25000	3*4200	90	Heat & electricity	Landfill according to new legislation
Boitrop, Germany	1995	Biowaste	6500	1*1000	100-120	Heat & electricity	Agriculture
Varennes-Jarcy, France	2001	MSW + biowaste	100000	2*4200 1*4500	110-120	Electricity	Agriculture
Cadiz, Spain	2000	MSW	115000	4*4000	145	Heat & electricity	Agriculture
Geneva, Switzerland	Start up phase	Biowaste	10000	1*1300	110-120	Heat & electricity	Agriculture
Mons, Belgium,	2000	MSW + biowaste	23000 +35700	2*3800	110-120	Heat & electricity	Agriculture
Freiburg*, Germany	1999	Biowaste	36000	1*4000	110-120	Heat & electricity	Agriculture
Bassano, Italy	Start up in 2002	MSW+Bio waste+ Sludge	44200 +8200 +3000	3*2400	129	Heat & electricity	NA

Barcelona - Ecoparque II, Spain	Start up in 2003	MSW	120000	3* 4500	114	Heat & electricity	NA
La Coruña, Spain	2001	Mixed MSW	182500	4*4500	130-150	Heat & electricity (5 *1250 kW)	NA

Adapted from The Anaerobic Digestion and the Valorga Process, Jan 1999, Literature and brochures provided by the company

\* thermophilic operation

## CONCLUSIONES

La captura de gas de relleno sanitario y la generación de energía a partir de él crea varios beneficios ambientales, y las utilidades que provienen de la comercialización de la energía y/o créditos de carbono pueden ayudar a catalizar la construcción y operación adecuadas de instalaciones de disposición definitiva.

Directamente reduce las emisiones invernadero. Los rellenos de residuos sólidos municipales son la mayor fuente de emisiones de metano creada por seres humanos. Dado que todos los rellenos sanitarios generan metano, es lógico utilizar el gas para un buen fin como generar energía, siempre que sea lógico en términos económicos.

El metano es un gas de invernadero muy potente, contribuyente clave para el cambio global del clima (más de 21 veces más fuerte que el CO<sub>2</sub>.) La vida atmosférica del metano es corta (10 años). Debido a que el metano es potente y tiene una vida corta, reducir las emisiones de metano de rellenos de residuos sólidos municipales es una de las mejores formas de lograr un impacto benéfico a corto plazo al mitigar el cambio climático global.

Es necesario tener en cuenta los efectos a la salud que pueden resultar de la exposición a niveles bajos de aire contaminado, producto del venteo de los gases de un relleno sanitario ya que existen varios estudios en el mundo que dan cuenta del impacto que pueden tener los rellenos sanitarios en la salud de la población cercana. Que solo un buen mantenimiento y operación de un relleno sanitario no sería un problema de salud pública.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Bitrán & Asociados. *“Estudio de Políticas de Abatimiento de Gas de Efecto Invernadero y Desarrollo Económico: Sinergias y Desafíos en el Sector de los Rellenos Sanitarios en el Caso de Chile”*. Santiago, mayo 2003

Guzzone, B; Muller, D. *“Manual de Usuario Modelo Mexicano de Biogás”*. Versión 1.0. Noviembre del 2003

Röben, Eva. *“Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales”*. Loja, Ecuador - 2002

Municipio de Salvador, *“Greenhouse Gas Emission Reductions through Landfill Gas Capture and Flaring where the Baseline is established by a Public Concession Contract”*. AM0002 / Version 01. September 2003

Torresani, M y Peotter, Ben. *“A case study in the development of a landfill gas-to-energy project for the Antioch, Illinois, Community School District”*. USEPA. Marzo - 2004

Carrillo, Leonor *“Microbiología Agrícola”*. Capitulo 5. 2003

Sara-Lafosse Rios y Javier Edgardo. *“Producción de bio-gas , a partir de la basura procesada en un Relleno Sanitario y su uso como energía mecánica no convencional”*. Universidad nacional “San Luis Gonzaga “de Ica - Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

N.J. Themelis. *“Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes”*. Department of Earth & Environmental Engineering. May 2002

USEPA. *“Landfill Gas Energy in the U.S. and Iowa”*. U.S. Environmental Protection Agency Landfill Methane Outreach Program (LMOP) 2004 BioCycle: Renewable Energy from Organics Recycling Conference.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry. *“Landfill Gas Primer, An Overview for Environmental Health Professionals”*. ATSDR. November 2001