

REPORTE MEXICANO DE CAMBIO CLIMÁTICO
Grupo III Emisiones y Mitigación de Gases Efecto Invernadero

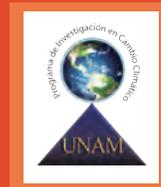
REPORTE MEXICANO DE CAMBIO CLIMÁTICO



Emisiones y Mitigación de Gases Efecto Invernadero

Grupo III

Libros: 1. 2. 3.





REPORTE MEXICANO
de Cambio Climático

GRUPO III

**EMISIONES Y MITIGACIÓN
DE GASES DE
EFECTO INVERNADERO**





Capítulo 7

RESIDUOS

Autores líderes:

María Laura Ortiz Hernández^{16, 17} Enrique Sánchez Salinas¹⁶,
Alexis Joavany Rodríguez Solís¹⁶, María Luisa Castrejón Godínez¹⁷.

Autor colaborador:

José Luis Arvizu Fernández¹⁸.

¹⁶Centro de Investigación en Biotecnología, ¹⁷Programa de Gestión Ambiental Universitario,
Universidad Autónoma del Estado de Morelos, ¹⁸Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Palabras clave: Residuos, gases de efecto invernadero, compostaje, valorización.

Resumen

En este capítulo se proporciona información acerca de la generación, el manejo y la disposición final de los residuos, incluyendo a los residuos sólidos urbanos (RSU) y a los residuos peligrosos. Además, se presenta la información acopiada acerca de la generación, manejo y tratamiento de las aguas residuales en México. Asimismo, se reportan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), de manera diferenciada entre la disposición final de los RSU y los peligrosos, así como por el tratamiento biológico de residuos y por incineración abierta de los RSU. De las emisiones globales, en la categoría de residuos se generan 44,130.8 Gg de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2\text{-eq}$), lo que equivale al 5.9 % de la contribución con respecto a las emisiones nacionales. De éstas, la eliminación de residuos sólidos contribuyó con el 50.1 %, el tratamiento y eliminación de aguas residuales con el 46.2 %, la incineración e incineración abierta con el 2.8 % y el tratamiento biológico de los desechos sólidos con el 0.9 %. Adicionalmente se presentan las opciones tecnológicas para la mitigación de emisiones provenientes de las diferentes corrientes de residuos, incluyendo la reducción, el reuso, el reciclaje (pre y posconsumo), el manejo del metano generado en los rellenos sanitarios, el compostaje, la digestión anaerobia, además de las diferentes tecnologías que se aplican para el tratamiento de las aguas residuales y su relación con la emisión de GEI.

Introducción

El crecimiento de la población, los cambios en los patrones de consumo y las diferentes actividades productivas que desarrollan las sociedades, han llevado necesariamente a la urbanización y a la utilización de los recursos naturales para la obtención de bienes y servicios, lo cual trae como consecuencia la generación de diversos tipos de residuos. Durante los últimos 15 años, los esfuerzos realizados en materia de gestión de residuos en México se han basado fundamentalmente en el manejo convencional: la disposición final. Hoy la gestión de residuos requiere de nuevos enfoques para resolver el problema, que incluya una visión transversal.

En la mayoría de los países, los municipios enfrentan el reto para la recolección, reciclaje, tratamiento y disposición final de residuos sólidos y aguas residuales. Uno de los pilares del desarrollo sostenible es el establecimiento de prácticas asequibles y eficaces de gestión integral de residuos. Las prácticas de la gestión integral de residuos y de las aguas residuales (GIRAR), promueven la salud pública, reducen simultáneamente las emisiones de GEI, mejoran la calidad de vida, previenen la contaminación del agua y del suelo, conservan los recursos naturales y proporcionan beneficios como la generación de energía renovable.

Con respecto a la emisión de GEI y de acuerdo con reportes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés), los residuos son los responsables de la emisión de cerca del 5 % de las emisiones globales, lo cual refuerza la importancia de establecer estrategias para establecer una gestión integral que permita abatir los impactos negativos y la emisión de GEI (IPCC, 2014).

La mitigación de los GEI emitidos por los residuos, debe ser abordada en el contexto de la GIRAR. El aumento constante de la producción de residuos a nivel mundial, establece el reto de buscar la forma de realizar su gestión sin impactar negativamente en el ambiente, pero también una oportunidad, ya que se pueden combinar el desarrollo de tecnologías y estrategias para el manejo de residuos, con políticas públicas que permitan diseñar e implementar estrategias de gestión integral.

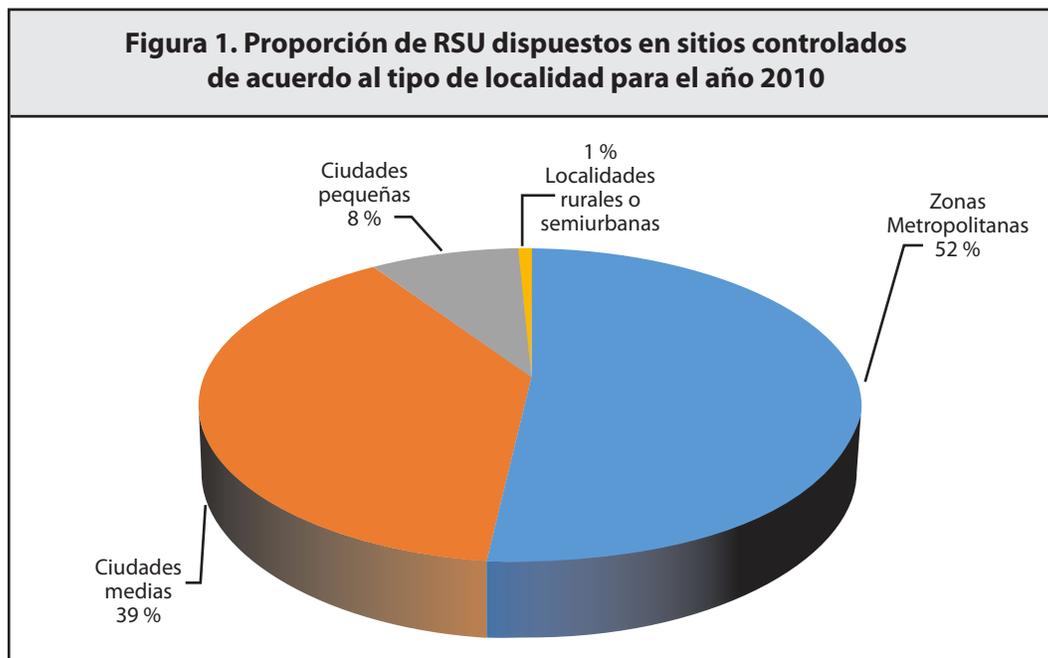
1. Tendencias de las emisiones

1.1. Generación, manejo y disposición final de Residuos Sólidos Urbanos (RSU)

La generación de RSU en el año 1998 fue de 30,550.67 miles de toneladas y para el año 2012 fue de 42,102.745 miles de toneladas (Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SNIARN, SEMARNAT], 2013a), lo que representa un incremento del 37.81 % para el periodo. Lo anterior puede relacionarse principalmente con el acelerado crecimiento de la población, la concentración poblacional en las áreas urbanas, el desarrollo industrial y los cambios de hábitos de consumo (Ojeda y Beraud, 2003; Castrejón et ál., 2015). Cabe señalar que la generación de residuos varía en función del tipo de entidad federativa y/o localidad, ya que es influenciada por factores culturales, niveles de ingreso, dinámicas de movimiento hacia los centros urbanos, entre otros.

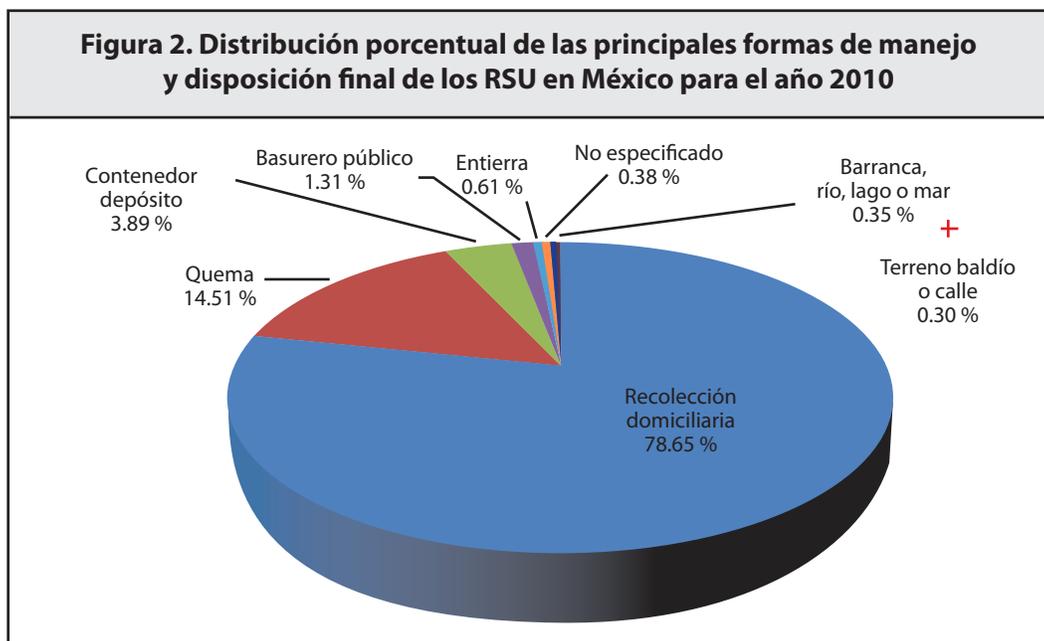
En México, generalmente el manejo de los RSU inicia desde su generación, almacenamiento, transporte y tratamiento, hasta su disposición final en algún sitio. Sin embargo, no se han incorporado en el territorio nacional técnicas relevantes para la solución ante esta problemática, por lo que frecuentemente los residuos se vierten sobre depresiones naturales del terreno. La opción más utilizada para la disposición de RSU son los rellenos sanitarios. En la actualidad pocas entidades cuentan con este tipo de instalaciones operando en condiciones sanitarias adecuadas. En México de 1995 a 2012 el número de rellenos sanitarios se incrementó de 30 a 260 (Diario Oficial de la Federación [DOF], 2013), y la cantidad de RSU que se depositaron en ellos aumentó de 5.95 millones de toneladas para el año 1995 a 27.98 millones de toneladas para el 2012 (SNIARN-SEMARNAT, 2013b).

En la Figura 1, se muestran las proporciones de RSU dispuestas en rellenos sanitarios de acuerdo al tipo de localidad para el año 2010. Como puede observarse, más del 50 % de los RSU nacionales que se disponen en rellenos sanitarios provienen de las zonas metropolitanas, en contraste con el 1 % correspondiente a las localidades rurales o semiurbanas (SNIARN-SEMARNAT, 2013c).



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos publicados en SNIARN-SEMARNAT (2013c)

La Figura 2, muestra la información relacionada con el manejo y la disposición final de los RSU en México. La recolección domiciliar ocupa el primer lugar, seguida de la quema, la disposición en un contenedor, en un depósito o en un basurero público; en entierros, en sitios no especificado, en barrancas, ríos, lagos o mares y en terrenos baldíos o calles.



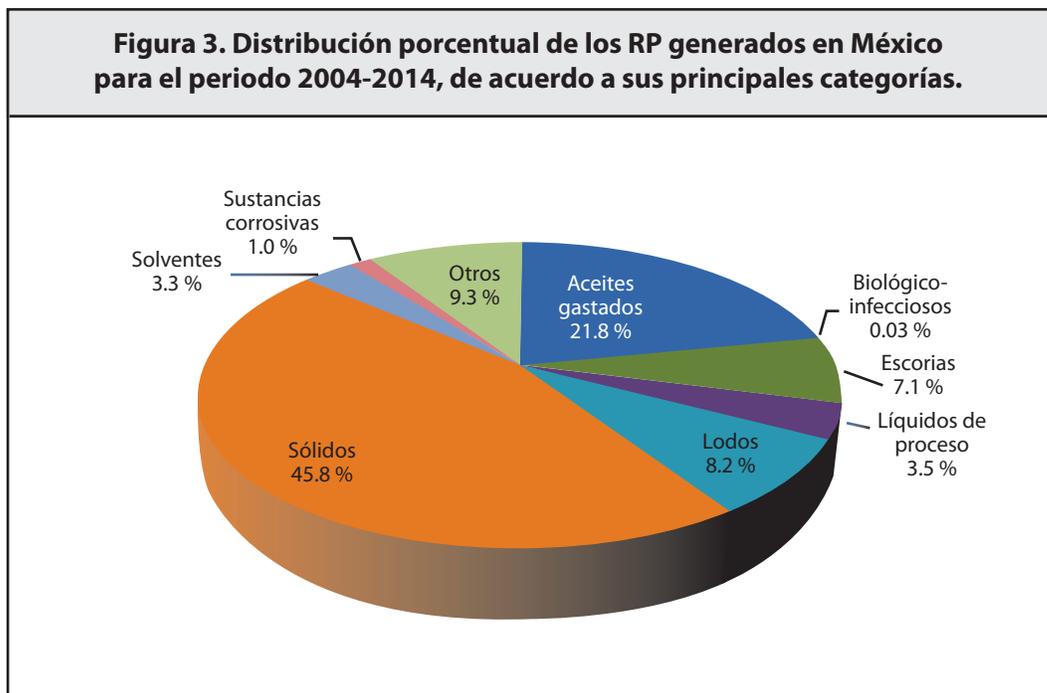
Fuente: elaboración propia a partir de datos publicados en Instituto Nacional de Estadística y Geografía - INEGI (2014)

1.2. Generación y manejo de Residuos Peligrosos (RP)

De acuerdo con los datos reportados por la SEMARNAT (2014), para el periodo comprendido entre el año 2004 y septiembre de 2014 en México se registraron 91, 283 empresas generadoras de RP, ubicadas principalmente en la Zona Metropolitana del Valle de México (14,139), Jalisco (8,788), Baja California (5,715), Estado de México (4,969) y Chihuahua (4,249). Estas empresas en su conjunto generaron cerca de 2.2 millones de toneladas de RP, distribuidas en diez categorías principales: aceites gastados, breas, biológico-infecciosos, escorias, líquidos de proceso, lodos, sólidos, solventes, sustancias corrosivas y otros. Como se observa en la Figura 3, los RP sólidos representan la principal categoría (965,629.1 ton), seguida de los aceites gastados (458,952.2 ton).

Estos RP por categoría de generador para el periodo anteriormente mencionado, corresponde a 12,492 ton para empresas microgeneradoras, 92,585 ton para pequeñas generadoras y 2'076,931 ton para grandes generadoras (SEMARNAT, 2014). Además el inventario nacional de residuos de plaguicidas obsoletos o caducos reporta, para el periodo 2009-2011, la generación de un volumen 44.584 litros y una cantidad de 262.474 kilogramos de este tipo de residuos (SNIARN-SEMARNAT, 2014a).

El manejo y disposición final de los RP en México se aborda mediante la prevención orientada a la reducción de los volúmenes de generación, reciclaje y reuso, y finalmente al tratamiento de los residuos para reducir su peligrosidad o volumen.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos publicados en SEMARNAT (2014)

1.3. Emisiones de GEI por la categoría Residuos

Con la finalidad de ubicar las emisiones de CO₂ de México en el contexto internacional, para la cuantificación de las tendencias globales se requiere de datos nacionales sobre la generación de residuos y prácticas de gestión. Sin embargo, las estimaciones son inciertas debido a la falta de datos, datos inconsistentes o datos incompletos. La mayoría de los países en desarrollo utilizan los datos por defecto sobre la generación per cápita de residuos.

Para estimar la emisión de GEI de la categoría residuos, la metodología de las Directrices del IPCC (2006) considera las siguientes subcategorías: la eliminación de residuos sólidos debido a la descomposición anaeróbica de la materia orgánica contenida en

los residuos; el tratamiento biológico de los residuos sólidos; la incineración e incineración a cielo abierto de residuos; así como el tratamiento y eliminación de aguas residuales, ya que en algunos procesos de tratamiento de agua se produce metano (CH_4) por la degradación de los compuestos orgánicos en condiciones anaeróbicas.

Para el reporte de las emisiones de GEI por la categoría de residuos, primeramente se abordan las diferentes subcategorías en relación con los gases generados y finalmente, se reportan las emisiones globales de la categoría. De acuerdo con lo anterior, las emisiones de GEI se incrementaron en un 167 % durante el periodo 1990-2010, pasando de 16, 529.1 a 44,130.8 Gg de CO_2 -eq, este incremento se atribuye principalmente al crecimiento de la población, de la disposición de residuos sólidos en rellenos sanitarios tecnificados y del impulso dado en las últimas décadas al tratamiento de las aguas residuales municipales e industriales (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [INECC-SEMARNAT], 2012).

1.3.1. Emisiones de GEI por la disposición de RSU

Dentro de la categoría, la disposición de los RSU generó un porcentaje importante de las emisiones de GEI reportadas para el año 2010 (50.1 %), debido a que este proceso libera CH_4 como principal GEI. En la Quinta Comunicación Nacional se establece que las emisiones generadas por eliminación de RSU se incrementaron de manera significativa (232.4 %) en los 20 años correspondientes al periodo de estudio (1990-2010), pasando de 6 653.6 a 22 117.7 Gg de CO_2 -eq y presentando una tasa de crecimiento media anual (TCMA) de 6.2 %. Este incremento en las emisiones son consecuencia del impulso al manejo de los residuos sólidos en México, en particular por la disposición en rellenos sanitarios, donde los procesos anaeróbicos son más frecuentes que en tiraderos a cielo abierto y por el incremento en el tratamiento de aguas residuales en nuestro país, que generan lodos como residuos del proceso (INECC-SEMARNAT, 2012).

1.3.2. Emisiones de GEI generadas por el tratamiento biológico de residuos

En México los RSU contienen una alta proporción de materia orgánica, principalmente en los residuos de jardinería y de los productos comestibles. De acuerdo con los datos de generación de RSU, para el año 2012 la proporción de este tipo de residuos alcanzó un 52 %, unos 22 millones de toneladas (SNIARN-SEMARNAT, 2013d). Estos residuos son susceptibles de tratamiento biológico mediante compostaje aeróbico o mediante digestión anaeróbica, prácticas comúnmente implementadas para el manejo de los residuos, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo. El tratamiento de los lodos provenientes del tratamiento de las aguas residuales también puede ser realizado de la misma manera.

La aplicación de estos procesos de tratamiento biológico presenta ventajas muy importantes, como la reducción del volumen de los materiales de desecho y su estabilización, la destrucción de agentes patógenos presentes en los residuos, la generación de productos finales con potencial para ser reutilizados como fertilizantes y mejoradores de suelos y la producción de biogás, el cual puede ser aprovechado como combustible para procesos de calentamiento o para la producción de energía eléctrica (INECC-SEMARNAT, 2013). Sin embargo, aunque en proporciones menores respecto a la disposición sin tratamiento alguno, estos procesos generan emisiones de gases de GEI principalmente CH_4 y N_2O .

De acuerdo con los datos del Inventario Nacional de GEI 1990-2010, las emisiones generadas por el tratamiento biológico de los RSU y de los lodos del tratamiento de aguas residuales se incrementaron de 328.96 a 376.75 (ambos en Gg de CO_2 -eq) entre los años 1999 y 2010. Este incremento está relacionado directamente con las emisiones de CH_4 , pues las emisiones de N_2O se mantuvieron en un valor de 127.06 Gg de CO_2 -eq durante todo el periodo. El tratamiento biológico representó cerca del 0.9 % de las emisiones totales de la categoría de desechos (INECC-SEMARNAT, 2013).

1.3.3. Emisiones de CO_2 -eq por incineración e incineración abierta de RSU

La incineración de los residuos se define como la combustión de los desechos sólidos y líquidos en instalaciones de incineración controladas (incineradores), mientras que la incineración abierta, se refiere a la combustión de materiales combustibles no de-

seados al aire libre, en donde el humo y otras emisiones se liberan directamente a la atmósfera (INECC-SEMARNAT, 2013).

En México, de acuerdo con la información generada por el INEGI (2014), se estima que el 14.5 % de las viviendas habitadas en el país, ubicadas principalmente en el medio rural, tratan a sus residuos mediante incineración abierta, principalmente en los estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero y Tabasco. Las emisiones de CH_4 , NO_2 y CO_2 relacionadas con la incineración de residuos a cielo abierto fueron de 526.8 Gg de CO_2 -eq para el año 1990 y de 1 212.2 Gg de CO_2 -eq para el año 2010, registrándose un incremento del 130 % para el periodo (INECC-SEMARNAT, 2013).

Por otro lado, únicamente los residuos peligrosos generados en los hospitales son incinerados de manera controlada en hornos regulados y con autorización de la SEMARNAT. Este proceso genera emisiones de 0.8 Gg de CO_2 -eq (que incluye al CH_4 y al CO_2) y de 27.7 Gg de CO_2 -eq (que incluye a los gases CH_4 , N_2O y CO_2). Las emisiones de GEI relacionadas con la incineración de los residuos, se incrementaron en aproximadamente 135 % para el periodo 1990-2010, con emisiones de cercanas a los 527 Gg de CO_2 -eq, para el año base 1990 y a los 1,240 Gg de CO_2 -eq, para el 2010 (INECC-SEMARNAT, 2013).

La quema incontrolada de residuos para la reducción de volumen en países en desarrollo sigue siendo una práctica común que contribuye a la contaminación del aire (Hoornweg, 1999). En México la incineración a cielo abierto se realiza principalmente en zonas rurales. Una práctica reciente es la incineración de desechos sólidos en hornos de las plantas de cementos para la generación de energía. Bogner et ál. (2007) mencionan que la tasa de incineración de residuos está aumentando en países en desarrollo como China, la incineración de residuos en este país aumentó rápidamente de 1.7 % en el 2000 a 5 % en el 2005.

1.4. Generación, manejo y emisiones de GEI de aguas y lodos residuales

En las últimas décadas México ha experimentado un incremento en el consumo de agua y, consecuentemente, en la generación de aguas residuales. Sin embargo, de acuerdo con SNIARN-SEMARNAT (2013e), la generación de aguas residuales a nivel nacional para el año 2003 fue de 255.30 m³/s y para el 2012 fue de 229.73 m³/s lo cual indica una disminución del 10 %. Se requiere especial atención para el conocimiento del volumen total de las aguas residuales generada, transportada y tratada, tanto aquellas de origen municipal como aquellas de origen industrial.

Las emisiones de CH_4 a partir de las aguas residuales municipales experimentó un incremento del 126.6 % en el periodo de 1990 y 2010, con emisiones de 188.0 Gg de metano (equivalente a 3,948.2 Gg de CO_2 -eq) y de 426.0 Gg (que corresponde a 8,946.5 Gg de CO_2 -eq), respectivamente. Mientras que para las aguas residuales de origen industrial el incremento en las emisiones de CH_4 para el periodo fue de 149.7 %, ya que en 1990 se emitieron 181.3 Gg (3,808.1 Gg de CO_2 -eq) y 452.7 Gg (9,507.6 Gg de CO_2 -eq) para el año 2010 (INECC-SEMARNAT, 2012).

Para el caso de las emisiones de N_2O provenientes de las aguas residuales, se reportan emisiones de 1,263.4 Gg de CO_2 -eq, para el año 1990 y de 1,942.3 Gg de CO_2 -eq, para el año 2010, lo cual representa un incremento del 53.7 %. Cabe señalar, que para el caso de las emisiones de N_2O , la Quinta Comunicación Nacional (QCN) no distingue entre aguas residuales municipales e industriales.

En lo que respecta a los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales, se debe prestar atención debido a que en México se carece de información detallada sobre las cantidades generadas y su manejo (Rojas y Mendoza, 2011); debido a que un manejo inadecuado de los lodos puede generar afectaciones al ambiente que tienden a agravarse y generalizarse (Ortiz, Gutiérrez y Sánchez, 1995). La disposición y/o aprovechamiento final de los lodos residuales implica un reto económico y de ingeniería, ya que involucran tanto la inversión en infraestructura como el desarrollo de tecnologías que reduzcan su volumen y los estabilicen; lo anterior con la finalidad de reducir o eliminar sus propiedades contaminantes (Beecher et ál., 2005).

Existen diferentes métodos para reducir el volumen y estabilizar los lodos residuales; los tratamientos para la reducción de su volumen son deshidratación e incineración. El problema con estos tratamientos es que la deshidratación únicamente reduce

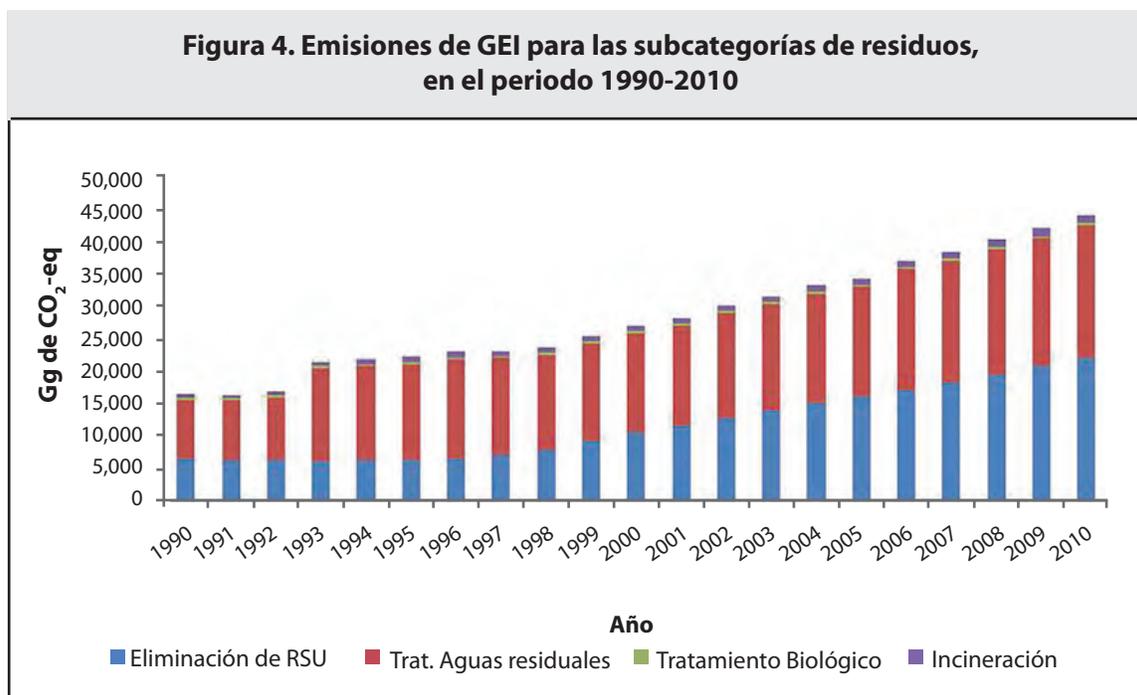
en un 20 % el volumen mientras que la incineración, si bien reduce el volumen en un 80 % y elimina los compuestos orgánicos tóxicos, destruye las bacterias y nutrientes que pudieran ser útiles para usarlo como fertilizante. Además, el proceso genera GEI, provocando contaminación ambiental considerable y altos costos de operación (Cardoso, 2003). Por otra parte, los procesos para la estabilización de lodos residuales son: digestión aeróbica (en donde las bacterias aeróbicas consumen la materia orgánica); digestión anaeróbica (en el cual la materia orgánica es consumida por bacterias anaeróbicas y es posible generar energía eléctrica mediante la utilización del biogás producido durante la digestión); y tratamiento químico (que generalmente consiste en añadir cal a los lodos provocando fermentaciones ácidas que evitan la proliferación de microorganismos). En los tres casos anteriores, la estabilización está enfocada a eliminar o disminuir la materia orgánica presente en los lodos residuales. Sin embargo, otros compuestos como metales pesados, plaguicidas y material inorgánico seguirán presentes, por lo que es importante someter los lodos residuales resultantes a un análisis para determinar si son un residuo peligroso o no y así determinar el tipo de manejo y disposición final adecuado (García, 2006).

Por otro lado, los lodos residuales pueden reutilizarse y aprovecharse para producción de biodiésel (Kargbo, 2010), o ser utilizados como materia prima para construcción de carreteras y edificios (LeBlanc, Matthews y Richard, 2009). Rojas y Mendoza (2011) mencionan que en México se generan alrededor de 640 millones de toneladas por año de lodos provenientes de las 2,029 Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) que tiene registradas la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Así mismo, se menciona que el 64 % de estos lodos generados son depositados como relleno en el suelo (a cielo abierto) generando problemas de contaminación ambiental y salud pública. Además, el 51 % de los lodos residuales es estabilizado mediante digestión anaeróbica; sin embargo no se recupera el biogás generado durante este proceso (Jiménez y Wang, 2006). En lo que respecta a las emisiones de GEI correspondiente a los lodos residuales del tratamiento de aguas, no existen datos de su contribución específica, estas son incluidas en las emisiones respectivas de las aguas residuales de origen municipal o industrial (INECC-SEMARNAT, 2013).

1.5. Emisiones globales de la categoría residuos en México

En México, en la categoría de residuos se generan 44,130.8 Gg de CO₂-eq, lo que equivale al 5.9 % de la contribución del total de las emisiones nacionales. De estas emisiones, la eliminación de residuos sólidos contribuyó con el 50.1 % (22,117.7 Gg de CO₂-eq), el tratamiento y eliminación de aguas residuales con el 46.2 % (20,396.4 Gg de CO₂-eq), la incineración e incineración abierta con el 2.8 % (1,239.9 Gg de CO₂-eq) y el tratamiento biológico de los desechos sólidos con el 0.9 % (376.8 Gg de CO₂-eq). La principal emisión en 2010 de la categoría corresponde al CH₄, que representa el 93.6 % (41,323.4 Gg de CO₂-eq), seguido del N₂O con 5.1 % (2,238.1 Gg de CO₂-eq) y del CO₂ con 1.3 % (569.4 Gg de CO₂-eq) (INECC-SEMARNAT, 2012).

En la Figura 4, se muestra la tendencia de las emisiones de GEI de las subcategorías de residuos, para el periodo 1990-2010.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos publicados en INECC-SEMARNAT (2013)

2. Opciones tecnológicas para la mitigación de las emisiones de residuos

2.1. Reducción, reuso y reciclaje de residuos pre-consumo

La revisión exhaustiva de la literatura especializada disponible, pone en evidencia la carencia de datos respecto a la reducción de residuos pre-consumo. Sin embargo, el Diario Oficial de la Federación (DOF) publicó el 21 de mayo de 2013 la adición de dos fracciones al Artículo 7 de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, estableciendo que son facultades de la Federación (DOF, 2014):

Fracción VI. Expedir las normas oficiales mexicanas que establezcan, entre otros, los criterios de eficiencia ambiental y tecnológica que deben cumplir los materiales con los que se elaborarán productos, envases, empaques y embalajes de plásticos y poliestireno expandido que al desecharse se convierten en residuos. Dichas normas deberán considerar los principios de reducción, reciclaje y reutilización en el manejo de los mismos.

Fracción XXIV. Promover, difundir y facilitar el acceso a la información a todos los sectores de la sociedad sobre los riesgos y efectos en el ambiente y la salud humana de los materiales, envases, empaques y embalajes que al desecharse se convierten en residuos, en colaboración y coordinación con los gobiernos de las entidades federativas, de los municipios, de otras dependencias y entidades involucradas.

No obstante, no existen evidencias de esfuerzos realizados en México en esta materia.

2.2. Reducción, reuso y reciclaje de residuos post-consumo

Actualmente, la opción más utilizada para el manejo de los RSU en México, es la disposición final en los rellenos sanitarios; sin embargo, el esquema de disposición en tiraderos a cielo abierto aún prevalece, principalmente en ciudades pequeñas y comunidades rurales o semiurbanas del país. A nivel mundial se ha establecido que la mitigación de las emisiones de GEI en el sector residuos se realizará a través del manejo integral de los residuos. A lo largo de los años se han desarrollado y establecido alrededor del mundo, diferentes tecnologías para el manejo de los residuos, dentro de las que destacan la implementación de rellenos sanitarios con recuperación de gas para la reducción de las emisiones de CH₄, el reciclado de residuos para disminuir su cantidad, y el compostaje de los residuos orgánicos disminuyendo la generación de GEI. Otros procesos que reducen la generación de GEI en comparación con la disposición de los residuos, son los procesos térmicos como la incineración de los residuos o su combustión industrial, el tratamiento mecánico-biológico de los residuos y la digestión anaerobia. Sin embargo, la aplicación de estas tecnologías de mitigación de la emisiones generadas por los residuos, depende de intereses y posturas locales, regionales o nacionales respecto al manejo de los residuos o la mitigación de GEI (Bogner et ál., 2007; 2008). Estas tecnologías están siendo implementadas gradualmente en el país.

En México existen 841 centros de acopio de residuos valorizables, cuyo objetivo es la reducción del volumen generado en la disposición final de los RSU, así como proteger la salud pública, y preservar y conservar la naturaleza. En el cuadro 1, se muestran las cantidades en kg/día de los residuos valorizables recolectados en centros de acopio.

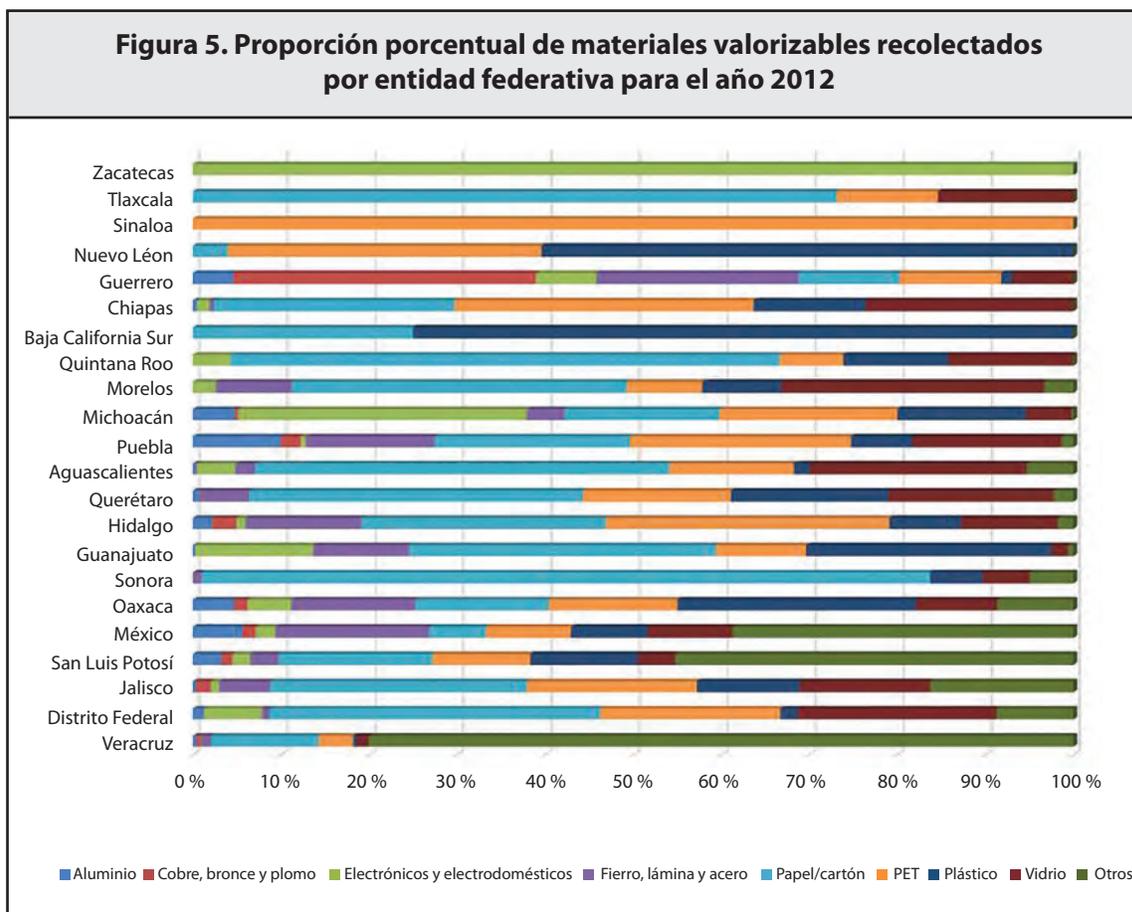
Cuadro 1. Residuos valorizables recolectados en centros de acopio a nivel nacional para el año 2012	
Nombre de residuos	Promedio diario (kg)
Papel/cartón	143,187
Otros	74,364
PET	70,798
Vidrio	62,051
Plástico	41,115
Electrónicos y electrodomésticos	22,842
Fierro, lámina y acero	21,868
Aluminio	6,129
Cobre, bronce y plomo	5,709

Fuente: (SNIARN-SEMARNAT, 2014b)

Sin embargo, aunque el reciclaje se ha incrementado en un 154 % en el periodo 2002-2011 (INECC-SEMARNAT, 2013), en el país aún resulta bajo. Para el año 2011 se recicló el 4.8 % del volumen de RSU generados (SNIARN-SEMARNAT, 2012), aunque esta cifra podrían alcanzar el 10 % en virtud de que muchos de los RSU son susceptibles de reciclarse antes de llegar a los sitios de disposición final, tanto en los contenedores como en los vehículos de recolección.

En la figura 5, se muestran la cantidad porcentual de materiales valorizables recolectados por entidad federativa para el año 2012. Para el caso de papel/cartón, vidrio, PET, electrónicos-electrodomésticos y aluminio es el Distrito Federal quien ocupa el primer lugar con 65,418; 39,285; 35,629; 11,350 y 2.207 kg/día en promedio, respectivamente; para cobre, bronce y plomo el primer lugar lo ocupa Guerrero con 3,000 kg/promedio diario; Guanajuato ocupa el primer lugar en reciclar fierro-lámina-acero y plástico con 5,044, 12,924 kg/promedio diario respectivamente y Veracruz ocupa el primer lugar en otros residuos con un valor de 30,299 kg/promedio diario.

Cabe señalar que de los 32 estados de México, los siguientes: Baja California, Campeche, Coahuila, Colima, Chihuahua, Durango, Nayarit, Tabasco, Tamaulipas y Yucatán, no cuentan con información detallada sobre los RSU reciclados. Actualmente no se cuentan con datos acerca de la proporción de mitigación de GEI con el reciclaje.



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos publicados en SNIARN-SEMARNAT (2014b)

2.2.1. Manejo del metano generado en los rellenos sanitarios y cogeneración de energía

De acuerdo con el reporte del IPCC, en el sector residuos se genera principalmente metano, que proviene de la descomposición anaeróbica de los residuos sólidos urbanos, seguido de dióxido de carbono del tratamiento las aguas residuales (IPCC, 2006). La descomposición anaerobia de los desechos sólidos en los rellenos sanitarios genera principalmente metano, este gas de efecto invernadero tiene un factor de calentamiento global 28 veces mayor al del CO₂ (IPCC, 2014). Por tal motivo la mitigación de las emisiones derivadas del manejo del metano en los rellenos sanitarios, es de suma importancia.

El metano producido por los rellenos sanitarios puede ser usado para generar electricidad mediante máquinas, turbinas y otras tecnologías, incluso puede ser refinado e inyectado en las redes de tuberías de gas natural, generándose múltiples beneficios económicos, ambientales y de salud pública (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [USEPA], 2011). En México el manejo del metano está en un proceso de evaluación y desarrollo, y existen muy pocos ejemplos exitosos de su manejo para la generación de energía.

Los residuos que se disponen en los rellenos sanitarios presentan un componente significativo de materia orgánica, este material al descomponerse libera metano, que puede ser separado para realizar un proceso de compostaje o que permita disminuir su impacto en el volumen de residuos, estrategias que se están explorando en México (Islas, Manzini y Masera, 2007). En general, los rellenos sanitarios se convierten en cementerios de basura sin utilización posterior alguna. Sin embargo, estos sitios de disposición final de residuos cuentan con un potencial poco explotado en México, el relacionado con la recuperación de gas metano y su utilización para la generación de energía eléctrica.

La recuperación y utilización del metano ha sido practicada ampliamente en países desarrollados con experiencias positivas. Además, si no se aprovecha este recurso, puede ser una fuente importante de gas de efecto invernadero, el principal contribuidor para el cambio climático. A partir de 2003, en México, se toma en cuenta la recuperación de metano (equivalente a 1 Gg de CH₄ anual) del relleno sanitario de Salinas Victoria, ubicado en la zona conurbada de Monterrey, Nuevo León (INECC-SEMARNAT, 2012; Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos [SIMEPRODE], 2014), el cual es empleado como combustible para la operación de la primera planta de generación de electricidad de este tipo en nuestro país (Cuadro 2).

Cuadro 2. Proyectos nacionales para la generación de energía eléctrica a partir de metano en rellenos sanitarios

Relleno sanitario	Localidad	Administración	Capacidad de captación de CH ₄ (m ³ /hr)	Capacidad de generación de energía eléctrica (MW)	Año
En operación					
Salinas Victoria	Monterrey	SIMEPRODE		12.7	2003
	Ensenada		560	0.34	2007
	Nuevo Laredo		1,480	1.7	2007
En desarrollo					
	Cautla		842	1.4	2008
	Nogales		1,000	1.5	2008
	Saltillo		1,290	1.8	2008
Potencial de mitigación 281 Mt CO ₂ -eq por año					

Fuente: (INECC-SEMARNAT, 2012; SIMEPRODE, 2014)

2.2.2. Compostaje

La descomposición aeróbica de los residuos orgánicos por compostaje resulta principalmente en la emisión de CO_2 y H_2O . Sin embargo, debido a la naturaleza del proceso, se pueden generar algunas emisiones de CH_4 , aunque la mayoría se oxida a CO_2 cerca de la superficie de la pila de compostaje, abatiendo las emisiones (Bogner et ál., 2007; Brown y Subler, 2007).

Las emisiones derivadas del proceso de compostaje, no se contabilizan en los inventarios de GEI, pues se considera que la mayor emisión del proceso de descomposición, es de CO_2 y de origen biogénico. Sin embargo, dependiendo del proceso que se implemente y de sus operaciones unitarias, los GEI pueden ser emitidos a partir del manejo de las instalaciones, más que del mismo proceso de descomposición (Lou y Nair, 2009). No obstante, el compostaje de los residuos orgánicos puede mitigar las emisiones de GEI mediante la aplicación de composta que genera los siguientes eventos (Lou y Nair, 2009):

- Disminución de los fertilizantes y pesticidas químicos necesarios en el sector agropecuario, lo que reduce las emisiones de GEI al disminuir la cantidad de combustibles fósiles necesarios para su producción y aplicación.
- Favorece el crecimiento de las plantas, lo que incrementa la fijación y almacenamiento de carbono en su interior, removiendo CO_2 de la atmosfera.
- Secuestra el de carbono en el suelo. La USEPA estima que es posible secuestrar 50 kg de carbono (183 kg de CO_2) por tonelada de composta húmeda aplicada, y a gran escala, la mitigación puede ser significativa.
- Aumenta la facilidad de labranza y del manejo del suelo, reduciendo las emisiones generadas por los combustibles fósiles utilizados por la maquinaria de trabajo agrícola.

En México las primeras plantas de compostaje se construyeron a finales de la década 1960 y principios de la década 1970. De acuerdo a un estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología en 2005, existen identificadas en México 61 plantas de compostaje, estas plantas están instaladas principalmente en el Distrito Federal (14) y el Estado de México (22), el resto de la plantas de compostaje se encuentran ubicadas en los estados de Aguascalientes, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Querétaro, Quintana Roo, Tabasco, Veracruz y Yucatán (Instituto Nacional de Ecología [INE], 2005). Sin embargo, no todas se encuentran en operación o inclusive algunas fueron construidas pero jamás operaron (Rodríguez y Córdova, 2006). A la fecha, no existe un inventario oficial que permita tener una mayor certeza sobre este tema. La planta de composta del relleno sanitario de Bordo Poniente, en la Ciudad de México, es posiblemente la única que ha sido constante en su producción: 750 toneladas de composta por día. La planta procesa los residuos orgánicos de la Central de Abastos y parte de los residuos de jardín generados en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (INECC-SEMARNAT, 2013). El tratamiento por compostaje de los residuos se realiza en el país principalmente en las ciudades de México con 247.5 miles de toneladas al año, Zapopan 198.0 miles de toneladas al año, Tonalá 132 miles de toneladas al año, Oaxaca 66.0 miles de toneladas al año y Monterrey 39.6 miles de toneladas al año (INECC-SEMARNAT, 2013).

2.2.3. Digestión anaerobia

El rápido crecimiento de la población, el grado de avance tecnológico, las medidas de conservación, la adopción de tecnologías energéticamente eficientes y el precio de los combustibles, demandan el uso de energías renovables como la biomasa, cuya utilización presenta características singulares y beneficios notables. Además, son una fuente teóricamente inagotable, que se producen cíclica y continuamente.

La digestión anaerobia es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato (residuos animales y vegetales) son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (e.g. H_2O_2). Utilizando el proceso de digestión anaerobia, es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90 % de la energía disponible por oxidación directa se transforma en

metano, consumiéndose sólo un 10 % de la energía en crecimiento bacteriano. En la digestión anaerobia, los microorganismos metanogénicos desempeñan la función de enzimas respiratorios y, junto con las bacterias no metanogénicas, constituyen una cadena alimentaria que guarda relación con las cadenas enzimáticas de células aeróbicas. De esta forma, los residuos orgánicos se transforman completamente en biogás, que está constituido por una mezcla de gases. Su composición depende del tipo de residuo orgánico utilizado para su producción y de las condiciones en que se procesa (Cuadro 3).

Cuadro 3. Composición química del biogás		
Componentes	Formula química	Porcentaje
Metano	CH ₄	60-70
Gas carbónico	CO ₂	30-40
Hidrogeno	H ₂	1.0
Nitrógeno	N ₂	0.5
Monóxido de carbono	CO	0.1
Oxígeno	O ₂	0.1
Ácido sulfhídrico	H ₂ S	0.1

Fuente: (Botero y Preston, 1987)

El uso de este biogás para generación de energía eléctrica, mitiga emisiones de GEI en un rango del 30 % al 90 % en comparación con la generación con combustibles fósiles (80 % carbón y 20 % gas natural) (Schubert et ál., 2009). El costo de cogeneración con biogás se encuentra en un rango de 3 a 10 USD/kWh (Chum et ál., 2011; Ramón, Romero y Simanca, 2013; Fernández, 2012). Dentro de las utilidades que hasta el momento se han dado al biogás en México, se incluyen la producción de electricidad y su uso como combustible (Gas LP). En el cuadro 4 se muestran las entidades federativas que han desarrollado proyectos para generar biogás a partir de residuos.

2.2.4. Valorización energética de los residuos

A nivel mundial, los combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural) han sido empleados para la generación de energía. Sin embargo, la disminución de las reservas mundiales y la problemática ambiental han aumentado la necesidad de encontrar nuevos recursos energéticos. México se ubica en el 9.º lugar por sus reservas de petróleo, 4.º en América por sus reservas de gas natural y es también muy rico en fuentes renovables de energía (solar, viento, hídrica, geotérmica y biomasa). Sin embargo, el potencial energético de estos tipos de fuente no han sido ampliamente explotadas (Aleman et ál., 2014a).

Una forma de generar energía, es a través de la biomasa, que comprende una extensa gama de materia biológica, tales como madera o residuos de madera, productos residuos de la industria alimenticia, aguas residuales, residuos sólidos urbanos (RSU), residuos agrícolas, entre otros. La producción potencial de energía a partir de la biomasa para México, se estima entre 2,635 y 3,771 PJ/año, donde el 77.9 % provendría de la biomasa sólida (plantaciones de eucalipto y residuos agroindustriales), el 20.1 % de los líquidos con potencial energético (caña de azúcar, *Jatropha curcas* y aceite de palma) y el 2 % a partir del biogás (RSU y estiércol del ganado) (Aleman et ál., 2014a). Una alternativa a dicha situación es la generación de energía a través de los residuos y de manera particular lo sólidos municipales, por medio de su combustión directa o mediante los gases generados por los procesos de descomposición (Aguilar, Armijo y Taboada, 2009).

Arvizu, Huacuz y Saldaña (2006) reporta que desde 1991 el Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) desarrolló un proyecto para evaluar la factibilidad técnico-económica de generación con el biogás producido en los rellenos sanitarios del Distrito Federal (DF). En ese año existían en el DF seis sitios clausurados y tres en operación. Como parte del proyecto se instaló una

planta piloto de 20 kW de capacidad de generación eléctrica, que a la vez sirvió para demostrar el concepto, en colaboración con Comisión Federal de Electricidad, Compañía de Luz y Fuerza, y el Departamento del Distrito Federal. Paralelamente se desarrollaron metodologías de laboratorio para la evaluación metanogénica de los residuos sólidos urbanos, modelos matemáticos para predecir la producción de gas y energía de acuerdo con las características de los sitios, y técnicas para adaptar motores diésel para operar con biogás. En cinco de los sitios estudiados se identificó un potencial de 26 MW, con costos de generación entre 2 y 3 centavos de dólar por kWh.

En la República Mexicana existen varios ejemplos de uso de gas metano generado en los rellenos sanitarios, uno de ellos se encuentra en el relleno sanitario de Salinas Victoria, Nuevo León, administrado por el Gobierno del Estado de Nuevo León, a través del Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos (SIMEPRODE) y la participación de la Iniciativa Privada. La capacidad de generación del relleno sanitario para 2003 fue de 7.4 MW, incrementándose a 12.72 MW para 2007 y 15.9 para 2010, con posibilidad de incrementarse a 25 o 30 MW en el 2016. La energía eléctrica generada se aprovecha primordialmente para fines de alumbrado público en siete municipios de Nuevo León, entre los cuales se encuentran Monterrey, San Nicolás de los Garza y Apodaca, utilizando para esto la red del sistema eléctrico nacional de Comisión Federal de Electricidad (Alemán et al., 2014b; Arvizu, 2011; Aguilar et al., 2009).

Cuadro 4. Entidades federativas que han producido biogás a partir de residuos.

Entidad federativa	A partir de que residuo se genera	Tecnología en el cual se generó el biogás	Producción total de biogás	Uso final	Generación total de energía	Autor
Baja California	Relleno sanitario		$L_0=1,152 \text{ m}^3/\text{h}$ (2012 cantidad mayor)	Abastecimiento energía eléctrica pública	Capacidad máxima: 1.90 MW	Aguilar, Taboada y Ojeda, 2011
Guanajuato	Granja ganadera Excretas de ganado doméstico (32,000 Kg/día)	Biodigestor	160 m ³ de biogás con 60 % de metano	90% de abastecimiento energía eléctrica de la granja	90 kw-h/día	Frías, 2009
Estado de México	Establo de ganado vacuno (0.50 m ³ /día de excreta)	Biodigestor piloto	5 m biogás/mes	Sustituto gas LP	Capacidad calorífica del Biogás obtenido= 5,000 Kcal/m ³ de Biogás	Otlica, 2012
Tabasco Inicial)	Contenido gástrico ruminal u54.08 m ³ tipo cúpula	Biodigestor anaerobio hidráulica 90 días	945.9 m ³ Tiempo de retención			Canepa y Olivier, 2013
Estado de México	42 cabras, 28 vacas, 8 becerros, 12 cerdos, 106 borregos y 6 caballos 873 kg/día	Reactor anaerobio	8.43 m ³ biogás/día Tiempo de retención hidráulica 28 días	Generación de energía eléctrica 0.44 kWe		López y Peñaloza, 2013

L_0 : Potencial de generación de metano (m³ CH₄/Mg de RSU)

Fuente: (Aguilar, Taboada y Ojeda, 2011; Frías, 2009; Otlica, 2012; Canepa y Olivier, 2013; López y Peñaloza, 2013)

En otro estudio llevado a cabo en el relleno sanitario de Querétaro por SCS Engineers (2005a), en la recuperación reportada de biogás fue de 3.2 MW en el 2009, ascendente hasta 5.4 MW en el 2016 y descendiendo a 3.8 MW en el 2019. En el mismo año, SCS Engineers estimó la capacidad máxima de generación de energía eléctrica del relleno sanitario de Chihuahua en 3.3 MW para el 2009, ascendiendo hasta 4.3 MW en el 2013 y descendiendo a 2.6 MW en el 2019 (SCS Engineers, 2005b).

El relleno sanitario de Ensenada, Baja California, ha sido objeto de estudio para estimar el potencial de producción eléctrica del biogás generado por los residuos depositados. Aguilar et ál. (2011 y 2013), reportan que se llegará a una capacidad de generación de energía de 1.9 MW en el 2019. Dicha energía podría aumentar la capacidad de generación eléctrica existente en Ensenada aproximadamente en un 3.46 % y abastecer el 60 % de la energía necesaria para alumbrado público, con un ahorro de \$1,423 millones de dólares estadounidenses.

Un estudio realizado por Aguilar et ál. (2014) en cuatro comunidades (dos rurales y dos urbanas) de Mexicali, Baja California, mostraron que el potencial de producción energética usando el biogás generado en los sitios de disposición final para 2013 fue de 4,082.40 y 21,578.40 MW/h para las comunidades urbanas de Mexicali y Tijuana. Esta energía equivale aproximadamente al 6 % y 40 % de la energía requerida para la iluminación de Tijuana y Mexicali respectivamente. Para el caso de las comunidades rurales de Vicente Guerrero y San Quintín el potencial energético fue de 583.2 MW/h para cada una y se estima un ahorro de \$109,000 dólares estadounidenses para cada comunidad.

Durante el periodo de 2013-2030 los cuatros sitios de disposición final de residuos tiene un potencial de generación de 760,492.8 MW/h, lo que equivale a un ahorro de \$142'210,000 dólares estadounidenses. La reducción de emisiones de CO₂ -eq sería de aproximadamente 5'196,492 toneladas en el mismo periodo, con un valor de \$57'160,000 dólares estadounidenses en el mercado de carbono. Alemán et ál. (2014b) reportan diferentes casos de generación de bioenergía exitosos en México a diferentes escalas, destaca un caso en el estado de Nuevo León que consistió en la apertura en 2006 de la granja "El Chanco" en Cadereyta, la primera de las tres plantas de generación eléctrica a partir de biogás (65 kW para 2005). La iniciativa incluye un conjunto de nueve granjas de cerdos en los municipios de Cadereyta, Allende y Montemorelos. Estas granjas han mitigado sus emisiones de metano a la atmósfera a través de la captura y quema de biogás generado por la digestión de estiércol de cerdo. El proyecto pretende utilizar el estiércol de cerdo para: obtener biogás; generar electricidad para el consumo de la granja; vender la energía excedente a la red nacional de la Comisión Federal de Electricidad (CFE); y obtener lodo orgánico utilizable como fertilizante agrícola.

Arvizu et ál. (2006) y Arvizu y Huacuz (2003) señalan que con el biogás que ya producen los residuos sólidos urbanos confinados en los últimos cinco años, sería posible soportar una capacidad de generación eléctrica cercana a los 80 MW, e incorporar 16 MW adicionales con los nuevos residuos que, año con año, se estarán acumulando en los rellenos sanitarios existentes. De esta forma, a lo largo de diez años la capacidad total de generación eléctrica podría ascender a 240 MW. En el caso de que todos los residuos sólidos urbanos actualmente producidos fueran confinados en rellenos sanitarios, la capacidad de generación eléctrica por medio del biogás resultante podría llegar a los 400 MW para todo el país.

2.3. Tecnologías de tratamiento de aguas residuales, ventajas y desventajas con relación a la emisión de GEI

Cuando se generan aguas residuales, que se definen como "aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas" (Ley de Aguas Nacionales, 2013), se hace necesario la aplicación de un tratamiento que permita la remoción de sustancias orgánicas e inorgánicas, que pueden estar en forma de partículas en suspensión y/o disueltas. Lo anterior con el objetivo de alcanzar una calidad de agua que cumpla con la normativa de descarga o por el tipo de reutilización a la que se destinará. Al retirar el material contaminante, se obtienen subproductos residuales, como los lodos y emisiones gaseosas, como son los gases de efecto invernadero (GEI).

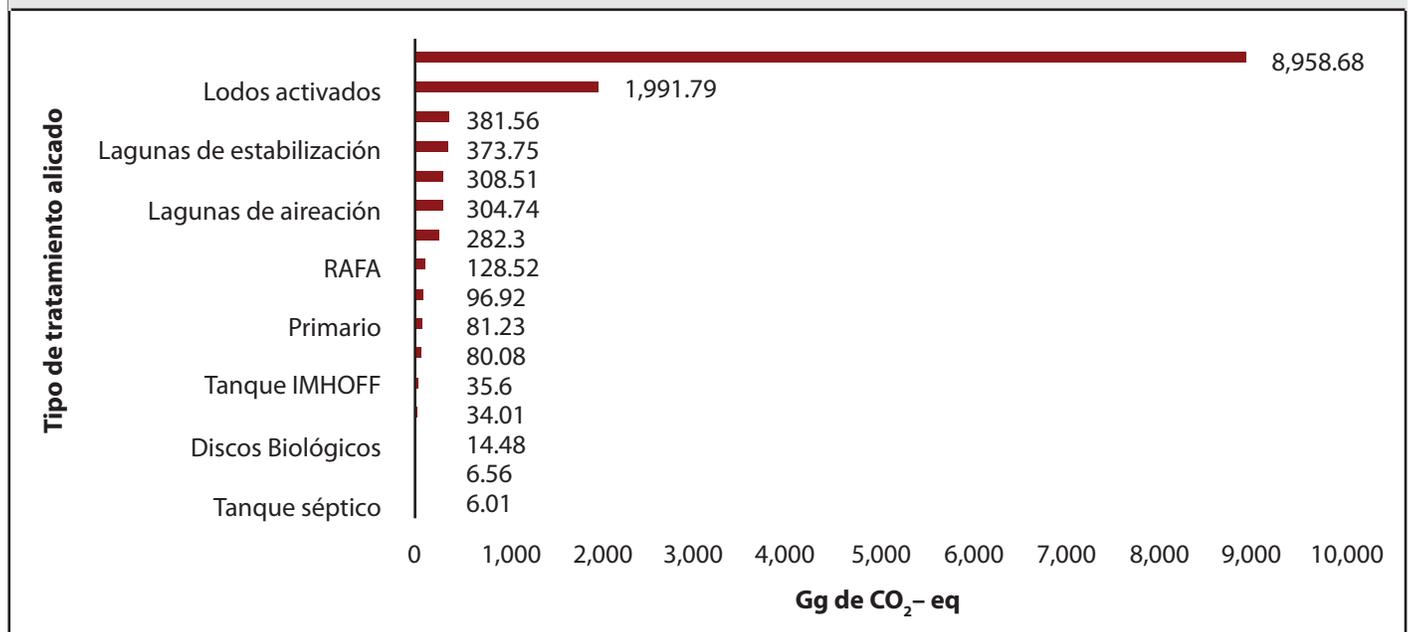
En el año 2012, se contaba con un total de 2,342 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, con un caudal tratado de 99.8 m³/s en el mismo año, la industria trató 60.5 m³/s de aguas residuales, en 2 530 plantas en operación a nivel nacional.

Del total de agua residual que se genera (7.24 miles de $\text{hm}^3/\text{año}$ de municipales y 6.61 miles de $\text{hm}^3/\text{año}$ de industriales), sólo se tratan una fracción de los dos tipos de aguas residuales.

En la selección de tecnologías para el tratamiento se deben tomar en cuenta no solo los aspectos técnicos y económicos sino también, los impactos ambientales generados. En este sentido, las emisiones de GEI constituyen uno de los impactos negativos más relevantes del sector y deben ser considerados en el proceso de selección del tipo de tratamiento a implementar. Se estima que el metano producido por el tratamiento de aguas residuales constituye cerca del 5 % de las fuentes de emisión de metano global (Fadel y Massoud, 2001).

Los subproductos obtenidos del tratamiento de las aguas residuales, depende del tipo de tratamiento que se aplique. En México se han realizado estudios dirigidos a la contabilización de los GEI provenientes de cada tipo de tratamiento de aguas residuales, de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en 2012, el 68.5 % de las emisiones de CH_4 , son aportadas por el agua no tratada que se descarga a un cuerpo receptor. En segundo lugar se encuentran las emisiones del tratamiento por lodos activados con un aporte del 15.2 % (Figura 6).

Figura 6. Emisiones de CH_4 por tipo de sistema de tratamiento y descarga



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos publicados en CONAGUA (2012).

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales pueden incluir etapas de procesos anaerobios. El CH_4 generado en ese tipo de sistemas puede recuperarse para cogeneración de energía o quemarse en antorcha. La cantidad de CH_4 que se quema o se recupera para generar energía debe restarse del total de las emisiones, mediante el uso de un parámetro separado para la recuperación de CH_4 . La cantidad de CH_4 que se recupera se expresa como "R". Cuando no se disponen de estos datos el valor recomendado es cero. En México se cuentan con registros de algunas plantas de tratamiento de agua residual que aprovechan el biogás generado por el tratamiento de los lodos (CONAGUA, 2012), el Cuadro 5, se enumeran las PTAR que realizan este aprovechamiento.

3. Acciones propuestas para la mitigación en la categoría residuos

De acuerdo con la QCN, hasta el año 2011 la categoría de residuos ha contribuido a la mitigación de 1.05 Mt de CO₂-eq/año, 24 % de la meta al año 2012 (4.44 CO₂-eq/año), principalmente relacionadas con la reducción de las emisiones de GEI en los rellenos sanitarios. En esta categoría se identificaron acciones con el potencial para generar un abatimiento de 26 Mt de CO₂-eq al año 2020, que incluyen (INECC-SEMARNAT, 2012):

1. Impulsar la participación del sector privado en proyectos de reciclaje, separación de residuos, reutilización, confinamiento de desechos, y creación de centros de acopio.
2. Desarrollar mecanismos y regulaciones que hagan corresponsables a las organizaciones del manejo de los residuos que generan.
3. Corregir los sistemas tarifarios de los servicios de recolección y tratamiento, de forma que se incentive la reinversión en mejoras tecnológicas y logísticas, y se puedan implementar las mejores prácticas a nivel mundial.
4. Reforzar las campañas educativas e informativas para sensibilizar a la población sobre la importancia de reducir la generación de desechos y el consumo de agua. Los proyectos que deben impulsarse dentro de este sector caen en cuatro categorías básicas.
5. Tratamiento de aguas residuales. Además del beneficio por reducción de emisiones, el agua tratada se puede aprovechar para otras actividades, mientras que el CH₄ se puede aprovechar en la generación de electricidad para la operación de las plantas de tratamiento de aguas residuales.
6. Captura y aprovechamiento de biogás producto de rellenos sanitarios y PTAR. En los rellenos sanitarios de gran capacidad, el aprovechamiento del CH₄ para la generación de electricidad genera ingresos que superan la inversión tecnológica.
7. Reciclaje. Esta actividad incrementó su capacidad en 154 % entre 2002 y 2011, y ofrece grandes oportunidades para el sector industrial por el ahorro de costos asociado. No obstante, se requiere hacer mayores esfuerzos para lograr un mayor proceso de recuperación y reciclaje de los residuos.
8. Composta. Puede ayudar a aumentar la productividad de la producción agrícola, pero aún es necesario analizar con mayor profundidad el valor en el mercado y las alternativas para lograr proyectos viables.

**Cuadro 5. PTAR que actualmente queman o aprovechan el biogás o en proceso de hacerlo**

Entidad	Nombre de la planta	Proceso de tratamiento	Caudal tratado (L/s)	Observaciones
Chihuahua	Norte	Lodos activados	473	Se quema biogás
	Chihuahua Sur		1,749	Se usa en calentamiento de biodigestor
	Norte		1,350	El biogás se envía a otra planta de tratamiento
	Sur		1,650	Quema de biogás en construcción
Coahuila	Principal	Lodos activados	900	Se quema biogás
Guanajuato	León	Primario/biofiltros	1,525	Se usa en calentamiento del biodigestor
	León	Primario avanzado, lodos activados	100	Se quema biogás
Jalisco	El ahogado	Lodos activados	1,500	Se congnera energía
Nuevo León	Norte	Aireación extendida	2,057	Se quema el biogás y cogeneración de energía
	Dulces nombres	Lodos activados	4,440	
Puebla	San Francisco	Primario avanzado	1,100	El lodo se trata en la planta de Atoyac Sur
	Alseseca		500	Se quema biogas
	Atoyac Sur		200	
	Barranca del Conde		180	El lodo se trata en la planta de Atoyac Sur
	Parque Ecológico		80	
Querétaro	San Pedro Mártir	Dual Anaerobio-aerobio	400	Quema de biogás y cogeneración de energía
Sinaloa	Culiacán Norte	Primario avanzado	1,533	
Tamaulipas	Morelos	Biofiltros	100	Se quema el biogas
	Tierra Negra	Lodos activados	800	
Veracruz	FIRIOB	Lodos activados	750	

Fuente: (CONAGUA, 2012).

Se tienen identificados proyectos para el aprovechamiento de biogás para generación de energía en 29 rellenos sanitarios de 19 ciudades de la República Mexicana, con un potencial de abatimiento de 4.4 MtCO₂-eq (INE, 2010).

Conclusiones

Las acciones propuestas para la mitigación y las opciones tecnológicas para la mitigación de las emisiones de GEI en la categoría residuos y su tendencia, dependen fundamentalmente de la precisión de los inventarios realizados de estas emisiones, y la incertidumbre de estos inventarios depende básicamente de tres factores que son: la metodología aplicada; las fuentes de información de los datos de la actividad; y de los factores de emisión empleados en cada actividad.

Las metodologías internacionales en general y del IPCC en particular, proponen el empleo de metodologías y software estandarizado para reducir al máximo la incertidumbre asociada a la metodología, así como valores regionales por defecto para

reducir la incertidumbre de los factores de emisión por defecto, dejando como mayor fuente de incertidumbre la asociada a las fuentes de información, que en países desarrollados es sistemática y transparente, en tanto que en países en desarrollo, son la mayor fuente de incertidumbre en los inventarios.

No obstante el gran esfuerzo desarrollado en los últimos 20 años en nuestro país para realizar los inventarios de este sector, que ha dado como resultado las cifras discutidas en las páginas anteriores, y ante la diversidad de fuentes de emisiones consideradas en la Metodología IPCC 2006, en términos generales no existe información sistemática y ordenada de estas actividades que garantice una baja incertidumbre o una alta confiabilidad de los resultados citados. Sin embargo, han cumplido con el objetivo para informar oportunamente a la Convención Marco de las Naciones Unidas ante el Cambio Climático que periódicamente se han realizado.

Se ha experimentado que el cambio de metodología del IPCC versión 1996 a 2006 trae grandes diferencias en cuantos a las emisiones. La metodología 2006 incorpora el modelo descomposición de primer orden (FOD por sus siglas en inglés) para la estimación de las emisiones de CH₄ provenientes de los desechos sólidos depositados en sitios de disposición final, en lugar del método anterior de equilibrio de masas recomendado por la Metodología 1996. Así mismo, la metodología incorpora para la estimación de emisiones del sector en cuestión nuevas subcategorías, tales como el tratamiento biológico de los desechos, la incineración a cielo abierto y la aportación de fosas sépticas, letrinas y canales de conducción de las aguas residuales, así como los residuos industriales, actividades no registradas en nuestro país.

Si se quiere disponer de inventarios confiables de primer nivel que sustenten las acciones de mitigación y la selección de tecnologías de mitigación al igual que en países desarrollados, se debe disponer de la información continua, transparente y prácticas que garanticen su confiabilidad mediante los registros de calidad que permitan estimar su incertidumbre, y esto solo es posible mediante leyes en la materia que se observen sin tergiversación en beneficio de un verdadero combate al cambio climático.

Referencias

- Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos [USEPA].** (2011). *Guía para el aprovechamiento del gas metano en rellenos sanitarios*. Disponible en: <http://biogas-iclei.pacmun.org.mx/wp-content/uploads/2013/04/g-Guia-Aprovechamiento-Gas-Metano-EPA-COCEF-ICMA-Julio-2011.pdf>. (Agosto de 2014).
- Aguilar, V. Q., Armijo, V. C. y Taboada, G. P.** (2009). El potencial energético de los residuos sólidos municipales. *Ingeniería Revista Académica*, 13(1), 59-62.
- Aguilar, V. Q., Taboada, G. P. y Ojeda, B. S.** (2011). Potencial de producción eléctrica del biogás generado en un relleno sanitario. *Ingeniería e Investigación*, 31(3), 56-65.
- Aguilar, V. Q., Taboada, G. P. & Ojeda, B. S.** (2013). Seasonal analysis of the generation and composition of solid waste: potential use-a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(6), 4633-4645.
- Aguilar, V. Q., Taboada, G. P., Ojeda, B. S. & Cruz, S. S.** (2014). Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with *in situ* parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 412-419.
- Alemán, N. G., Casiano, F. V., Cárdenas, C. D., Díaz, C. R., Scarlat, N. & Mahlkecht, J.** (2014a). Renewable energy research progress in Mexico: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 140-153.
- Alemán, N. G., Sandate, F. L., Meneses, J. A., Díaz, C. R. & Dallemand, J. F.** (2014b). Bioenergy Sources and Representative Case Studies in Mexico. *J Pet Environ Biotechnol*, 5(190), 2.
- Arvizu, J. L.** (2011). La basura como recurso energético. Situación actual y prospectiva en México. *Boletín IIE*. Enero-marzo, 36-44 pp.
- Arvizu, J. L. y Huacuz, J. M.** (2003). Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad. *Boletín IIE*, 27(4), 118-123.
- Arvizu, J. L., Huacuz, J. M. y Saldaña, M. J.** (2006). Evaluación del potencial energético de los rellenos sanitarios. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales: investigación, desarrollo y práctica*, 1(1), 1-14.
- Beecher, N., Harrison, E., Goldstein, N., McDaniel, M., Field, P., & Susskind, L.** (2005). Risk perception, risk communication, and stakeholder involvement for biosolids management and research. *Journal of environmental quality*, 34(1), 122-128.
- Bogner, J., Abdelrafie, A. M., Diaz, C., Faaij, A., Gao, Q., Hashimoto, S., Mareckova, K., Pipatti, R. & Zhang, T.** (2007). Waste Management. In *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 863 pp.
- Bogner, J., Pipatti, R., Hashimoto, S., Diaz, C., Mareckova, K., Diaz, L. & Gregory, R.** (2008). Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation). *Waste Management & Research*, 26(1), 11-32.
- Botero, B. M., y Preston, R. T.** (1987). Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas. *Manual para su instalación, operación y utilización. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Cali, Colombia*, 353-362.
- Brown, S. & Subler, S.** (2007). Composting and greenhouse gas emissions: a producer's perspective. *Bicycle*, 48(3), 37-41.
- Canepa, J. R. y Olivier, J. A.** (2013). Degradación anaerobia del contenido gástrico ruminal bovino para la obtención de biogás, en un biodigestor tipo cúpula. *Ingeniería*, 17(1), 57-65.
- Cardoso, L.** (2003). Manejo de lodos residuales en México. In *XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. (3-8, diciembre: Brasil). Memorias. Puerto Alegre, Brasil*. 1-7.
- Castrejón, G. M., Sánchez, S. E., Rodríguez, A. & Ortiz, H. M.** (2015) Analysis of Solid Waste Management and Greenhouse Gas Emissions in Mexico: A Study Case in the Central Region. *Journal of Environmental Protection*, 6, 146-159.
- Chum, H., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dharmija, P., Dong... Pingoud, K.** (2011). Bioenergy. In: *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. New York, NY, USA.: Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom. 309 pp.
- Comisión Nacional del Agua [CONAGUA].** (2012). *Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento*, México DF. 280 pp.
- Diario Oficial de la Federación [DOF].** (2013). Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2013-2018 (PROMARNAT). Diario Oficial de la Federación 12-12-2013.
- DOF.** (2014). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación 04-06-2014.
- Fadel, M. & Massoud M.** (2001). Methane emissions from wastewater management. *Environmental Pollution*, 114(2), 177-185.
- Fernández, R. T.** (2012). Digestión anaerobia para una sustentable Ciudad de México. Universidad Autónoma Metropolitana, 6 pp.

- Frías, H. J. T.** (2009). Potencial y oportunidades de desarrollo de biocombustibles a partir de materiales no alimenticios en Guanajuato. *Ide@CONCYTEG*, 4(54), 1271-1286.
- García, O. N.** (2006). Lodos residuales: estabilización y manejo. *Caos conciencia*, 1, 51-58.
- Hoornweg, D.** (1999). What a waste: solid waste management in Asia. Report of Urban Development Sector Unit, East Asia and Pacific Region, World Bank, Washington, D.C. 43 pp.
- Instituto Nacional de Ecología [INE].** (2005). Sistematización de la información existente sobre los programas municipales de composteo. Elaborado por Nathalie Jean-Baptiste bajo la coordinación de Ana Córdova. Numero de contrato: INE/ADE-023/2005. México.
- INE** (2010). México, Potencial de mitigación de gases de efecto invernadero en México al 2020 en el contexto de la cooperación internacional.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos** [INECC-SEMARNAT]. (2012). *Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. Primera edición, ISBN 978-607-8246-50-2. México. D.F. 441 pp.
- INECC-SEMARNAT.** (2013). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990–2010*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México.
- INEGI.** (2014). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Estadística, Medio Ambiente. Asentamientos y Actividades Humanas. Recuperado el 29 de julio de 2014. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&c=21385>.
- IPCC.** (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, General Guidance and Reporting. Volume 5. Waste prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., et al. (Ed.).
- IPCC.** (2014). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Islas, J., Manzini, F., & Maser, O.** (2007). A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy*, 32(12), 2306-2320.
- Jiménez, B., & Wang, L.** (2006). Sludge Treatment and Management. Chapter 10 in *Municipal Wastewater Management in Developing Countries: Principles and Engineering*. (pp. 237-292.) Ujang Z. and Henze M. Eds.
- Kargbo, D. M.** (2010). Biodiesel production from municipal sewage sludges. *Energy & Fuels*, 24(5), 2791-2794.
- LeBlanc, R. J., Matthews, P., & Richard, R. P.** (2009). *Global atlas of excreta, wastewater sludge, and biosolids management: moving forward the sustainable and welcome uses of a global resource*. UN-HABITAT. ISBN: 978-92-1-132009-1.
- Ley De Aguas Nacionales** (2013). Diario Oficial de la Federación, México, 07 de junio 2013.
- López, V. M. y Peñaloza, C. T. F.** (2013). *Sistema para generar bioenergía a partir de desechos pecuarios en el centro de investigación de la Facultad de Veterinaria de la UNAM en Chapa de Mota, Estado de México*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 123 pp.
- Lou, X. F. & Nair, J.** (2009). The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions – A review. *Bioresource Technology*, 100(16), 3792–3798.
- Ojeda, B. S. & Beraud, L. J.** (2003). The municipal solid waste cycle in Mexico: final disposal. *Resources Conservation and Recycling*, 39(3), 239–250.
- Ortiz, H. M., Gutiérrez, R. M., y Sánchez, S. E.** (1995). Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la ciudad industrial del valle de Cuernavaca, estado de Morelos, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 11(2), 105-115.
- Otlca, D. J.** (2012). Aprovechamiento de biogás proveniente del abono de ganado vacuno en un establo ubicado en Ixtapaluca Estado de México. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura U. Z. Instituto Politécnico Nacional. 88 pp.
- Ramón, A. J., Romero, F. L., y Simanca, J.** (2013). Diseño de un biodigestor de canecas en serie para obtener gas metano y fertilizantes a partir de la fermentación de excrementos de cerdo. *Revista Ambiental agua, aire y suelo*, 1(1), 15-23.
- Rodríguez, S. M. A. y Córdova, V. A.** (2006). Manual de compostaje municipal: tratamiento de residuos sólidos urbanos. *SEMARNAT, EME y GTZ. México*.
- Rojas, R. R. y Mendoza, E. L. G.** (2011). El potencial de generación de energía eléctrica empleando biosólidos como fuente de materia prima: El caso de la ciudad de Ensenada, Baja California. *Hacia la sustentabilidad: Los residuos sólidos como fuente de energía y materia prima*, 343-349.
- Schubert, R., Schellnhuber H. J., Buchmann N., Epiney A., GrieBhammer R. Kulesa M., Messner D., Rahmstorf S., & Schmid J.** (2009). *Future bioenergy and sustainable land use*. Routledge. USA: 361 pp. ISBN: 978-1-84407-841-7.
- SCS Engineers.** (2005a). Estudio de pre-factibilidad para la recuperación de biogás y producción de energía en el relleno sanitario de Querétaro, Querétaro, México.



SCS Engineers. (2005b). Estudio de pre-factibilidad para la recuperación y utilización en el relleno sanitario de Chihuahua, Chihuahua, México. Disponible en: <http://bva.colech.edu.mx/xmlui/handle/123456789/HASH24184ea5895de884f05cc6>. (20 de junio 2014).

SEMARNAT. (2014). Residuos peligrosos. Recuperado el 20 de junio de 2014, de <http://www.semarnat.gob.mx/temas/gestion-ambiental/materiales-y-actividades-riesgosas/residuos-peligrosos>.

Sistema Integral para el Manejo Ecológico y Procesamiento de Desechos [SIMEPRODE]. (2014). Disponible en: http://www.nl.gob.mx/?P=simeprode_bioenergia. (22 de agosto 2014).

Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SNIARN-SEMARNAT]. (2012). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales, indicadores ambientales y desempeño ambiental. Capítulo 7. Residuos. Recuperado el 18 de junio de 2014, de http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap7_residuos.pdf.

SNIARN-SEMARNAT. (2013a). Indicadores básicos del desempeño ambiental de México. Disponible en: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/indicadores13_cd/conjuntob/indicador/04_residuos/4_2.html. (20 de junio 2014).

SNIARN-SEMARNAT. (2013b). Consulta temática. Resumen de la disposición final estimada de residuos sólidos urbanos. Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RSM01_06_D&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce. (18 de junio 2014).

SNIARN-SEMARNAT. (2013c). Consulta temática. Disposición estimada de residuos sólidos urbanos por tipo de localidad. Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RSM01_08_D&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce. (20 de junio 2014).

SNIARN-SEMARNAT (2013d). Consulta temática. Generación estimada de residuos sólidos urbanos por tipo de residuo. Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RSM01_03&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce. (enero 2015).

SNIARN-SEMARNAT. (2013e). Consulta temática. Agua residual generada, colectada y tratada. Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_AGUA07_15&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce. (20 de junio 2014).

SNIARN-SEMARNAT. (2014a). Consulta temática. Inventario de residuos peligrosos de plaguicidas obsoletos o caducos, por categoría toxicológica, periodo 2009-2011. Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RESIDUOP01_23&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce. (20 de junio 2014).

SNIARN-SEMARNAT. (2014b) Consulta tematica. Centros de acopio y cantidad de materiales valorizables recolectados según tipo de material. Recuperado el 20 de junio de 2014. Disponible en: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_RSM01_15&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce.

Universidad Nacional Autónoma de México
Programa de Investigación en Cambio Climático

Impreso en México, D.F. el 15 de diciembre de 2015
Tiraje: 1,000 libros

Coordinadores del Proyecto:

Carlos Gay y García / José Clemente Rueda Abad

Grupo III

Emisiones y Mitigación de Gases
Efecto Invernadero

Coordinación del grupo III: Xochitl Cruz Núñez



REPORTE MEXICANO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Grupo III Emisiones y Mitigación de Gases Efecto Invernadero

Editores:

Carlos Gay y García / Angelina Cos Gutiérrez / C. Tatiana Peña Ledón