



# ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL VILLA DE ZAACHILA, OAXACA



**MEDIO AMBIENTE**  
SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



**INECC**  
INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA Y  
CAMBIO CLIMÁTICO

# **ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL VILLA DE ZAACHILA, OAXACA**

**Enero 2023**



## DIRECTORIO

### **Dr. Agustín Ávila Romero**

Director General de Políticas para la Acción Climática, SEMARNAT y Encargado de Despacho de la Dirección General del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático

### **Ing. Luis Felipe Abreu García**

Coordinador General de Contaminación y Salud Ambiental

## Elaborado por

### **Dr. Luis Daniel Sifuentes Vázquez**

Director de Investigación de Contaminantes, Sustancias, Residuos y Bioseguridad

### **Dr. Abraham Ortíz Álvarez**

Director de Economía Sectorial

### **Dra. Ania Mendoza Cantú**

Subdirectora de Investigación sobre Sustancias y Residuos

### **Mtra. Alejandra Joy Campos Rivera**

Jefe de Departamento de Administración de Laboratorios

# ÍNDICE

<b>ANTECEDENTES.....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVO.....</b>	<b>2</b>
<b>ESTADO ACTUAL DEL SITIO.....</b>	<b>2</b>
<b>EMISIONES DE BIOGÁS POR EL SDF Y AFECTACIONES A LA POBLACIÓN.....</b>	<b>8</b>
<b>METODOLOGÍA.....</b>	<b>10</b>
PARÁMETROS DE CÁLULO.....	11
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>17</b>
MODELO MEXICANO DE BIOGÁS.....	17
MODELO DEL PANEL INTERGUBERNAMENAL DE CAMBIO CLIMÁTICO.....	20
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>21</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>21</b>
RELACIONADAS CON EL CUMPLIMIENTO DE LA NOM-083- SEMARNAT-2003.....	21
RELACIONADAS CON LAS APROXIMACIONES EMPLEADAS EN LA MODELACIÓN DE BIOGÁS.....	22
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>24</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	Localización del SDF de Villa de Zaachila, Oaxaca.....	1
FIGURA 2.	Imágenes del SDF de Zaachila, en donde se presenta las celdas estabilizadas de la zona poniente y la entrada original del sitio.....	3
FIGURA 3.	Imágenes de los sistemas de captación de biogás localizados en el SDF de Zaachila.....	3
FIGURA 4.	Frente de trabajo del SDF de Zaachila.....	4
FIGURA 5.	SDF de Zaachila en septiembre de 2022.....	8
FIGURA 6.	Modelación de la dispersión de metano y contaminantes en el radio de impacto para el SDF de Zaachila.....	9
FIGURA 7.	Columna de Metano observada durante el año 2021 en la zona del tiradero de Zaachila.....	10
FIGURA 8	Estimación del área del SDF de Zaachila con cobertura final y sistema de captura de biogás.....	15
FIGURA 9	Estimación del área del SDF de Zaachila sin cobertura final.....	16
FIGURA 10	Afloramientos de lixiviados en el SDF de Zaachila.....	16
FIGURA 11	Proyecciones estimadas de generación y recuperación de biogás para el SDF de Zaachila.....	20

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.	Evaluación de SDF tipo A conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003.....	5
TABLA 2.	Parámetros de cálculo para modelación con metodología IPCC.....	12
TABLA 3.	Parámetros de cálculo del Modelo Mexicano de Biogás v.2.....	13
TABLA 4.	Caracterización de residuos para el Estado de Oaxaca según el Modelo Mexicano de Biogás v.2.....	14
TABLA 5.	Proyecciones de la generación y recuperación de biogás en el SDF de Zaachila según el Modelo Mexicano de Biogás v.2.....	19

## RESUMEN EJECUTIVO

El Sitio de Disposición Final (SDF) de Villa de Zaachila, Oaxaca, ha dado servicio por 42 años a la Ciudad de Oaxaca de Juárez y a 24 municipios de su conurbación para los residuos sólidos urbanos (RSU) y los residuos de manejo especial (RME) generados en la región. A lo largo de su historia ha sido sujeto a diversas etapas de operación con un desempeño muy heterogéneo y se ha ido rodeando de varias colonias y asentamientos humanos. Durante sus primeros 30 años de vida operó como un sitio no controlado y luego fue rehabilitado a un sitio controlado (SC), funcionando como tal desde marzo de 2012.

En una visita realizada al sitio el 21 de diciembre de 2022, se encontraron varias irregularidades. Entre ellas, las más importantes son falta de compactación, de cobertura diaria y de cobertura final de los residuos en la parte sur del sitio, así como afloramientos de lixiviados en los linderos, lo cual ha resultado en quejas por parte de la comunidad y, finalmente, en su cierre, debido a las problemáticas ambientales originadas por el escurrimiento de los lixiviados hacia las zonas urbanas colindantes. Por otro lado, una modelación efectuada para establecer, en una primera aproximación, el impacto en las emisiones del SDF en la zona aledaña y, con ello, definir puntos potenciales de máxima afectación, se observó que las colonias de los alrededores reciben directamente los gases generados en el sitio, los cuales producen efectos climáticos y ambientales.

Por lo anterior, se desarrolló el presente estudio, cuyo objetivo fue analizar la situación actual del SDF para determinar sus condiciones específicas y, con ello, estimar la generación y potencial de aprovechamiento de biogás, con miras a establecer una estrategia de intervención por parte de las autoridades. Para la estimación de la generación de biogás se emplearon dos metodologías: el Modelo Mexicano de Biogás y el Modelo de Residuos 2006 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).

De acuerdo con el Modelo Mexicano de Biogás, la cantidad estimada de biogás generada en el sitio para 2022 es 10 290.92 t/año de CH<sub>4</sub> y el potencial de recuperación de biogás de 1151.1 m<sup>3</sup>/h, con lo cual se podría manejar un proyecto de reducción de emisiones de 3060.9 t/año de CH<sub>4</sub>, lo cual implicará una reducción de 101 077.1 ton/año de CO<sub>2</sub> eq. Por su parte el modelo del IPCC, mostró una estimación de **11 236.83 t/año de CH<sub>4</sub>**, para ese mismo año. La diferencia observada (9.4%) se atribuye al nivel de detalle de las variables consideradas en ambos modelos. Con estos resultados, se proponen una serie de recomendaciones para cumplir con la NOM-083-SEMARNAT-2003.

## ANTECEDENTES

El Sitio de Disposición Final (SDF, conocido como “Relleno Sanitario de Villa de Zaachila”, en Oaxaca (Figura 1), es un sitio de aproximadamente 19 hectáreas que ha operado desde hace 40 años con el objetivo de dar servicio a la Ciudad de Oaxaca de Juárez y 24 municipios de su conurbación para la disposición final a los residuos sólidos urbanos (RSU) y los residuos de manejo especial (RME).

Considerando lo que se ha descrito por el Colegio de Ingenieros Ambientales de México (CINAM, 2022), el SDF se localiza en la jurisdicción del Municipio de Villa de Zaachila, a 17 km del centro de Oaxaca, y cuenta con un acceso mediante un entronque de 1.5 km de longitud que conecta aproximadamente en el kilómetro 17.5 de la autopista que une a la ciudad de Oaxaca con Ocotlán de Morelos.

**Figura 1.** Localización del SDF de Villa de Zaachila, Oaxaca.



El SDF se encuentra rodeado por colonias de reciente creación, como son las colonias de El Bosque, El Manantial, González Guardado, Lomas de la Cuesta, Casahuates y Nueva Vista Hermosa, así como con las agencias de Renacimiento y Vicente Guerrero. La profundidad de las celdas oscila entre 20 m y 50 m, con una profundidad promedio de 35 m, y una disposición en diversas etapas de operación de residuos de composición variada, incluidos llantas usadas, residuos electrónicos o residuos de la construcción. De acuerdo con lo descrito en el “Resumen Ejecutivo del Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial en el Estado de Oaxaca” (SEMARNAT-SEMAEDES, 2015), por la intervención del Gobierno del Estado de Oaxaca, el SDF de Villa de Zaachila, que operó como un sitio no controlado (SNC) por cerca de 30 años, fue rehabilitado a un sitio controlado (SC) funcionando como tal desde marzo de 2012.

## OBJETIVO

Analizar la situación actual del Sitio de Disposición Final ubicado en Zaachila, Oaxaca, para determinar sus condiciones específicas y, con ello, estimar la generación y potencial de aprovechamiento de biogás, con miras a establecer una estrategia de intervención por parte de las autoridades.

## ESTADO ACTUAL DEL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL

El día 21 de diciembre de 2022 se efectuó una visita al SDF de Villa de Zaachila, con el objetivo de identificar las condiciones en las que actualmente se encuentra. Como resultado de dicha visita, se exponen las siguientes observaciones:

- De acuerdo con los datos proporcionados por los actores entrevistados, hasta el 8 de octubre de 2022 el SDF de Zaachila se encontraba recibiendo un promedio de 800 t/día de residuos, lo cual representa un estimado de 292 000 t/año. Los residuos en un inicio eran dispuestos en la zona poniente del SDF (Figura 2), la cual contemplaba una caseta de vigilancia y una báscula para realizar el pesado de los vehículos de transporte de residuos. El acceso del sitio fue posteriormente modificado a la zona oriente.

ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL  
VILLA DE ZAACHILA, OAXACA

- Considerando las características del lugar, se pudo constatar la disposición organizada de los residuos de acuerdo con un frente de trabajo, así como la cobertura con material térreo en la mayor parte de las celdas que fueron conformadas (Figura 2).

**Figura 2.** Imágenes del SDF de Zaachila, en donde se presenta la entrada original del sitio en la zona poniente y las celdas estabilizadas.



- Existen evidencias de que el sitio estuvo equipado con un sistema de extracción, captación, conducción y control de biogás, así como con un sistema de captación y extracción de lixiviados que, según lo referido por personal del SDF, operaron en 2015 y 2016, siendo posteriormente vandalizados entre 2016 y 2018 (Figura 3).

**Figura 3.** Imágenes del sistema de captación de biogás localizados en el SDF de Zaachila.



ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL  
VILLA DE ZAACHILA, OAXACA

- El SDF ha presentado, en su última etapa ubicada en la zona sur, problemas operativos que incluyen la falta de compactación, de cobertura diaria y de cobertura final de los residuos, así como afloramientos de lixiviados en los linderos del sitio, lo cual ha resultado en quejas por parte de la comunidad y, finalmente, en su cierre, debido a las problemáticas ambientales originadas por el escurrimiento de los lixiviados hacia las zonas urbanas colindantes (Figura 4). Es importante destacar que la problemática de afloramiento y escurrimiento de lixiviados se ve incrementada en las temporadas de lluvias.

**Figura 4.** Frente te trabajo del SDF de Zaachila.



- Se realizó una evaluación de la construcción y prácticas de operación del SDF considerando las especificaciones que se deben cumplir de acuerdo con la cantidad de RSU recibidos en las instalaciones. El SDF de Zaachila recibía hasta el momento de su clausura entre 800 y 850 t/día, por lo que corresponde a un SDF tipo A, con recepción mayor a 100 t/día. En la Tabla 1 se resumen las condiciones actuales del SDF de Zaachila conforme a lo establecido en la NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial (DOF, 2004)

ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL  
VILLA DE ZAACHILA, OAXACA

**Tabla 1.** Evaluación de SDF tipo A conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003.

MUNICIPIO OAXACA DE JUÁREZ		ESTADO OAXACA
UBICACIÓN VILLA DE ZAACHILA, OAXACA		
DÍA	21 DE DICIEMBRE DE 2022	HORA 14.00 HRS
MATRIZ DE EVALUACIÓN SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL TIPO A		
Recepción de RSU y RME mayor a 100 t/día		
Sección	Descripción	Cumplimiento
<b>6</b>	<b>Selección del Sitio</b>	
6.1	Restricciones para la ubicación del sitio	
6.1.1	Aeropuertos (>13 km) / estudio de riesgo aviario	0
6.1.2	No estar ubicados en áreas naturales protegidas	1
6.1.3	Zonas Urbanas > 2500 hab; distancia mínima de 500 m	0
6.1.4	Zonas con restricción: marismas, manglares, esteros, pantanos, humedales, estuarios, planicies aluviales, fluviales, recarga de acuíferos, arqueológicas, cavernas, fracturas o fallas geológicas, etc.	ND
6.1.5	Zonas de inundación con periodo de retorno de 100 años/sin obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves.	ND
6.1.6	Cuerpos de agua a distancia mínima de 500 m	0
6.1.7	Pozos, 100 m adicionales a la proyección horizontal de la mayor proyección del cono de abatimiento	0
6.2	Estudios y análisis previos requeridos para la selección del sitio	
6.2.1	Estudio Geológico/Identificación de fallas y fracturas	ND
6.2.2	Estudio Hidrogeológico	ND
6.2.2a	Agua subterránea (manantiales, pozos y norias en la zona de influencia)	ND
6.2.2b	Acuífero (tipo de acuífero y relación entre las diferentes unidades hidrogeológicas.	ND
6.2.2c	Análisis del sistema de flujo (determinar la dirección del flujo subterráneo regional)	ND
6.3	Estudios y análisis en el sitio previos a la construcción y operación de un SDF.	
6.3a	Topográfico /incluyendo planimetría y altimetría.	ND
6.3b	Geotécnico (Exploración y muestro; estudios de laboratorio)	ND
6.3c	Evaluación geológica (Litología y Estratigrafía)	ND
6.3d	Evaluación hidrogeológica (Parámetros hidráulicos, unidades hidrogeológicas)	ND
6.4	Estudios de generación y composición	
6.4a	Generación y composición de RSU y RME	ND
6.4b	Estimación de la generación de Biogás	ND
6.4c	Cuantificar el lixiviado mediante algún balance hídrico	ND

ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL  
VILLA DE ZAACHILA, OAXACA

<b>7</b>	<b>Características constructivas y operativas del sitio de disposición final</b>	
7.1	Barrera geológica natural o sistema de impermeabilización equivalente; espesor de un metro y un Coeficiente de conductividad hidráulica de al menos $1 \times 10^{-7}$ cm/seg.	ND
7.2	Extracción, captación, conducción y control de biogás.	1
7.3	Sistema de captación y extracción del lixiviado,	1
7.4	Drenaje Pluvial para el desvío de escurrimientos pluviales y desalojo de agua de lluvia.	1
7.5	Área de emergencia para la recepción de RSU y RME en caso de alguna eventualidad.	1
7.6	Compactación de acuerdo con tipo de sitio	1
7.7	Frecuencia de cobertura en un lapso menor a 24 horas.	0
7.8	Control para la restricción de la entrada de residuos líquidos (aguas residuales, residuos de aceites minerales, residuos peligrosos, etc.)	0
7.9	Obras complementarias	
	Caminos de acceso	1
	Caminos interiores	1
	Cerca perimetral	0
	Caseta de vigilancia y control de acceso	0
	Báscula	1
	Agua potable, electricidad y drenaje	1
	Vestidores y servicios sanitarios	1
	Franja de amortiguamiento (mínimo 10 metros)	0
	Oficinas	0
7.10	Documentos con los que debe contar el SDF	
7.10a	Manual de operación (procedimientos de operación, control de calidad, perfil de puestos, reglamento interno)	0
7.10b	Control de Registro (ingreso de residuos, secuencia de llenado, generación y manejo de lixiviados y biogás, contingencias)	0
7.10c	Informe mensual de actividades	0
7.11	Programa de monitoreo	
7.11.1	Monitoreo de biogás	ND
7.11.2	Monitoreo de Lixiviados	ND
7.11.3	Monitoreo del Acuífero	ND
7.12	Actividades de separación en el SDF que no afecten el cumplimiento de las especificaciones, ni signifiquen un riesgo a las personas	0

1 = Cumple

0 = No Cumple

ND = Información no disponible al momento de la visita de campo

- El cierre del SDF ha generado un conflicto para la zona conurbada de Oaxaca de Juárez que disponía sus residuos en el lugar, por lo que la administración de este Municipio, en conjunto con las autoridades ambientales estatales y federales, han iniciado la evaluación de la situación que se presenta en términos de la gestión integral de residuos, así como el planteamiento de las posibles estrategias de solución, considerando el muestreo y evaluación de diversos parámetros para determinar la posible contaminación de suelos, mantos freáticos y aire, principalmente derivado de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Actualmente, se considera como una posible solución temporal la reapertura del SDF con el objetivo de estabilizar las celdas del frente de trabajo, el saneamiento de la zona y otras especificaciones a considerar en el programa calendarizado para la clausura final del sitio.
- Considerando información de *Google Earth* (Figura 5), se pudo determinar que, en septiembre de 2022, el acceso de residuos al SDF se estaba dando por el extremo sur, mediante el empleo de un camino de terracería donde se puede identificar que los vehículos de transporte tenían que hacer fila de espera para poder ingresar al sitio y descargar los residuos.
- Considerando la generación y la emisión de biogás que se produce por la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos bajo las condiciones de construcción y operación de un SDF, es importante el desarrollo de información diagnóstica que permita estimar el potencial de generación de biogás, la cantidad de éste que podría ser recuperada, así como las proyecciones estimadas con la finalidad de evaluar la viabilidad económica de proyectos que empleen tecnologías de aprovechamiento o captura de este biogás. Además de los beneficios energéticos del uso del biogás, su captura ayuda a reducir las emisiones al ambiente, disminuyendo la contaminación del aire que potencialmente puede causar daños a la salud pública y problemas como mal olor. Asimismo, un correcto manejo del biogás del sitio minimiza el potencial de migración que puede causar incendios no controlados o explosiones.

**Figura 5.** SDF de Zaachila en septiembre de 2022.



- Finalmente, es importante destacar que el correcto manejo del biogás (principalmente compuesto por metano ( $\text{CH}_4$ )) contribuye a disminuir el impacto que tiene el sitio en el cambio climático, ya que el  $\text{CH}_4$  es el gas de efecto invernadero con mayor contribución a este fenómeno.

## EMISIONES DE BIOGÁS POR EL SDF Y AFECTACIONES A LA POBLACIÓN

Las emisiones de biogás generadas por los residuos orgánicos son consideradas una de las principales fuentes antropogénicas de gases de efecto invernadero, incluidos el  $\text{CH}_4$  y de otros contaminantes como son los compuestos orgánicos volátiles (COV). Los compuestos químicos emitidos dependen ampliamente de la composición de los residuos dispuestos en el SDF, pero entre los más importantes se encuentran el sulfuro de hidrógeno, el tricloroetileno, el benceno, el cloruro de vinilo y algunos otros contaminantes tóxicos (AlAhmad *et al.*, 2012).

En los últimos años, no solo las emisiones de gases de efecto invernadero se han convertido en un problema asociado con el manejo de los SDF, sino que también los compuestos orgánicos en general; ya que, por su baja solubilidad y alta volatilidad, han sido detectados en diversas mediciones (Allen *et al.*, 1997) y se han convertido en una preocupación de salud ambiental, principalmente por encontrarse cerca de localidades urbanas y rurales, siendo las comunidades pobres y más vulnerables altamente susceptibles a los efectos tóxicos de estos compuestos.

**Figura 6.** Modelación de la dispersión de CH<sub>4</sub> y contaminantes en el radio de impacto para el SDF de Zaachila.



Considerando lo anterior, se realizó una primera modelación de la dispersión del biogás del SDF de Zaachila, para establecer, en una primera aproximación, el impacto en la zona aledaña al sitio y definir zonas potenciales de máxima afectación. En la figura 6 se puede observar que la marca en azul oscuro representa la zona con mayores concentraciones, la verde la de concentraciones intermedias y la azul turquesa corresponde al radio de influencia de las emisiones del SDF en la localidad de Zaachila.

Con respecto a la generación de CH<sub>4</sub> proveniente del SDF, se obtuvo la imagen satelital de la plataforma *Sentinel-Tropomi* para el año 2021, en donde se puede observar en el cuadro más oscuro de la Figura 7 la mayor acumulación de la columna de CH<sub>4</sub> en la zona ubicada alrededor del SDF, siendo un claro indicador de la liberación y presencia de este gas.

**Figura 7.** Columna de Metano observada durante el año 2021 en la zona del tiradero de Zaachila, Oaxaca



Es importante destacar que, al observar el  $\text{CH}_4$  de forma satelital, se puede establecer que se está liberando en la zona sin pasar por procesos de manejo o captura y, por ello, estar ocasionando impactos climáticos y ambientales que deben ser abordados de manera inmediata para su reducción o mitigación.

## METODOLOGÍA

La estimación del  $\text{CH}_4$  generado por los RSU en un SDF se puede realizar utilizando metodologías como el Modelo de Residuos 2006 del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (IPCC,2006) o el Modelo Mexicano de Biogás (USEPA, 2009), los cuales son modelos teóricos que emplean una ecuación de primer orden para describir la degradación de la materia orgánica bajo las circunstancias específicas del SDF y considerando las condiciones climáticas regionales.

Para la modelación de la generación de biogás en el SDF de Villa Zaachila se usaron las siguientes herramientas metodológicas:

- **Modelo del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).** Metodología y base de cálculo empleados para el Inventario de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero desarrollado por el INECC. Esta estimación del IPCC clasifica los residuos orgánicos en cuatro categorías considerando parámetros como el carbono orgánico degradable ( $DOC$ ) y la fracción de carbono orgánico degradable ( $DOC_F$ ).
- **Modelo Mexicano de Biogás (versión 2.0).** Este modelo es una herramienta de estimación automatizada para cuantificar la generación y la recuperación de biogás en rellenos sanitarios en todos los estados de México. El modelo fue desarrollado por *SCS Engineers* bajo un contrato con el programa *Landfill Methane Outreach (LMOP)* de la USEPA. Este modelo puede ser utilizado para estimar la generación y la recuperación de biogás en rellenos sanitarios que cuenten o planeen tener un sistema de recolección de biogás e incorpora datos de caracterización de residuos de ciudades y de los rellenos sanitarios mexicanos y la estructura del Modelo IPCC con algunas revisiones para reflejar de mejor forma las condiciones del clima y de los sitios en el país. El modelo aplica ecuaciones separadas para calcular la generación de cada uno de los cuatro grupos de residuos orgánicos agrupados de acuerdo con su índice de degradación: 1) Residuos de degradación muy rápida (residuos alimenticios y otros orgánicos, incluida la fracción orgánica de los pañales desechables (20% de su composición); 2) Residuos de degradación moderadamente rápida (residuos vegetales, poda de casas y parques municipales, papel higiénico); 3) Residuos de degradación moderadamente lenta (papel, cartón, textiles); y 4) Residuos de degradación muy lenta (madera, caucho, piel, huesos, paja).

## PARÁMETROS DE CÁLCULO

La cantidad de biogás generado en un SDF se calcula en función de datos de actividad como los índices de disposición anual y la composición detallada de los residuos orgánicos, el año de apertura y clausura del SDF; su ubicación y aspectos climatológicos como es la precipitación anual para estimar el contenido de humedad; y parámetros técnicos que describen el tipo de construcción y operación del sitio, como son la profundidad de las celdas o el tipo y la extensión de la cobertura de residuos (USEPA, 2009).

Los datos que se emplearon en el modelo que aplica la metodología del IPCC se presentan en la Tabla 2. La herramienta implementada para el cálculo de las emisiones de CH<sub>4</sub> por SDF define automáticamente los parámetros de cálculo predeterminados considerando la entidad federativa en donde se ubica el sitio. Así mismo, se realizan cálculos retrospectivos y proyectivos para determinar los históricos de residuos dispuestos a partir del año base. Los parámetros de operación se definen de acuerdo con los identificadores asignados tomando en cuenta las características de operación del SDF.

**Tabla 2.** Parámetros de cálculo para modelación con metodología IPCC.

<b>Datos generales</b>	
Identificador único por sitio	Oaxaca583
Estado	Oaxaca
Clave	20566
Municipio	Villa de Zaachila
Coordenadas geográficas	Latitud: 16.924569; Longitud: -96.686095
<b>Datos de actividad</b>	
Volumen recibido (ton/año)	292 000
Año de referencia	2022
Tipo de sitio (de acuerdo IPCC)	No gestionado profundo
Tipo de sitio (de acuerdo NOM-083-SEMARNAT-2003)	Sitio controlado
Año de inicio de operaciones	1980

Por su parte, los datos empleados en el caso del Modelo Mexicano de Biogás (v.2) son los que se muestran en la Tabla 3. El Modelo puede calcular los índices de disposición anual usando la información proporcionada por el usuario y asignando automáticamente los parámetros de cálculo basándose en la información del clima y caracterización de los residuos en la región. El clima esta categorizado en cinco regiones considerando la precipitación anual promedio y la temperatura. Los tipos de residuos están categorizados en cinco grupos distintos, incluidos los 4 grupos orgánicos ya mencionados y un grupo inorgánico. Adicionalmente a los parámetros de cálculo asignados de acuerdo con la ubicación del sitio, es posible precisar los datos específicos del sitio.

**Tabla 3.** Parámetros de cálculo del Modelo Mexicano de Biogás v.2.

Datos de entrada empleados		
1	Nombre del Sitio	Relleno Sanitario
2	Ciudad	Zaachila
3	Estado	Oaxaca
4	Región	Oeste
5	Datos de caracterización de residuos específicos en SDF	No
6	Año de apertura del sitio	1980
7	Disposición anual del año más reciente	292,000 Mg
8	Año de disposición (arriba)	2022
9	Año de clausura o año de clausura proyectado	2024
10	Incremento anual estimado de la disposición	1.6%
11	Profundidad promedio del relleno sanitario	35 m
12	¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?	No
13a	Si la respuesta de 13a es "Si", indique el área del impacto en %	0%
13b	Si la respuesta de 13a es "Si", indique la severidad del impacto	1
13c	Año de arranque del sistema de captura (actual/estimado)	2015
14	Porcentaje del área con residuos con sistema de captura	60%
15	Porcentaje del área con residuos con cubierta final	60%
16	Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia	35%
17	Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria	0%
18	Porcentaje del área con residuos sin cobertura	5%
19	Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana	60%
20	¿Se compactan los residuos regularmente?	Sí
21	¿La disposición de residuos se hace en un área específica?	Sí
22	Existen afloramientos/brotos de lixiviado en la superficie del relleno sanitario?	Sí
23a	¿Esto ocurre solo después de llover?	No
23b	¿Ha habido algún incendio en el relleno sanitario?	No

En el caso de los datos utilizados para la aplicación del Modelo Mexicano de Biogás se emplearon los de caracterización asignados de manera predeterminada para Oaxaca, ya que es indispensable contar con información detallada y actualizada de la fracción orgánica de los RSU. Así mismo, se realizaron los ajustes correspondientes por la disposición de RME. Los datos considerados por este modelo se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Caracterización de residuos para el Estado de Oaxaca según el Modelo Mexicano de Biogás v.2.

Categoría de Residuo	Datos específicos del sitio
Comida	25.7%
Papel y Cartón	11.2%
Poda (jardines)	27.4%
Madera	0.9%
Caucho, Piel, Huesos y Paja	0.7%
Textiles	0.9%
Papel Higiénico	0.0%
Otros Orgánicos	0.9%
Pañales (asume 20% orgánico / 80% inorgánico)	3.5%
Metales	28.7%
Construcción y Demolición	0.0%
Vidrio y Cerámica	0.0%
Plásticos	0.0%
Otros Inorgánicos	0.0%

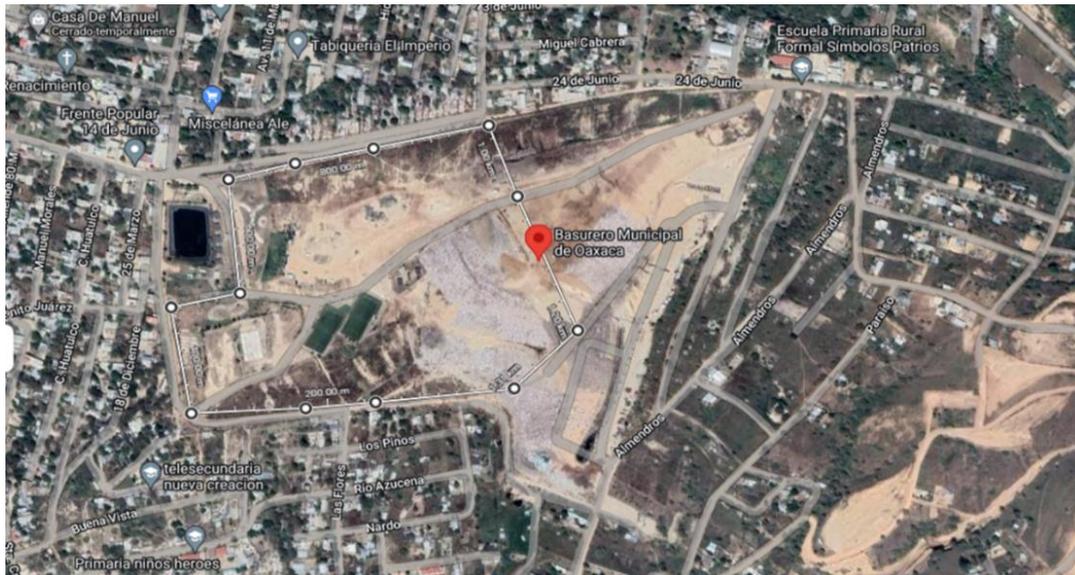
La disposición anual para el año más reciente (2022) se estimó con base en la información obtenida en territorio, a partir de la cual se estableció que el SDF estaba recibiendo en promedio 800 t/día de RSU y RME. Así mismo, se consideró que el SDF sería cerrado definitivamente en el transcurso de 2024, de acuerdo con las recomendaciones emitidas por el Colegio de Ingenieros Ambientales de México. El incremento anual de disposición se asignó a partir de la tasa de crecimiento anual del período 2005-2010 de 1,6%, reportada en el Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial en el Estado de Oaxaca (SEMARNAT-SEMAEDES, 2015). La profundidad promedio del SDF se estimó tomando en cuenta la información descrita por el Colegio de Ingenieros Ambientales de México (CINAM, 2022) en donde se señala que el sitio de Zaachila tiene una profundidad que varía desde los 20 m y 50 m.

Para las prácticas de diseño y manejo del relleno sanitario se asignó el identificador “condición desconocida” por considerarse que el sitio ha presentado a lo largo de su vida útil prácticas de operación muy heterogéneas. El identificador de manejo del sitio asigna un factor de corrección de metano (MCF), el cual es un ajuste de la estimación de generación de biogás en el modelo tomando en cuenta el grado de degradación anaeróbica de los residuos. El MCF varía dependiendo de las prácticas de manejo en el SDF, principalmente aquellas asociadas con la profundidad de la celda y el tipo de manejo, como pueden ser las prácticas de cobertura diaria, la compactación y colocación controlada de los residuos. El MCF aumenta en sitios donde se pueden asegurar las condiciones anaeróbicas y disminuye en sitios sin manejo en donde las condiciones para degradación anaeróbica son

menos apropiadas.

Para los porcentajes del área de residuos con sistema de captura y cubierta final se consideraron las observaciones de campo para poder estimar el porcentaje del área total del SDF que cuenta con instalaciones de extracción, conducción y captura de biogás. La estimación se hizo tomando como base las mediciones realizadas en *Google Maps*, a partir de lo cual se determinó que la superficie con cobertura final y en donde se pudiera tener el sistema de captura de biogás podría ser de 10 hectáreas con respecto a un área total operativa de 16 hectáreas, lo cual representa el 60% del área operativa del SDF. El área contemplada para la estimación se presenta en la Figura 8.

**Figura 8.** Estimación del área del SDF de Zaachila con cobertura final y sistema de captura de biogás.



Empleando la consideración previamente descrita, se estimó el área actual con residuos sin cobertura (Figura 9); la cual, de acuerdo con las observaciones de campo, podría significar 8000 m<sup>2</sup> y representar el 5% del total del área operativa del SDF; por lo tanto, el área que presenta residuos con cubierta intermedia se estimó en el 35% restante del sitio. Para la modelación de la generación de biogás realizada en este trabajo, se estimó que el porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana sería igual al área con cobertura final y sistema de captación de biogás; es decir 60% del área total operativa.

ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL  
VILLA DE ZAACHILA, OAXACA

**Figura 9.** Estimación del área del SDF de Zaachila sin cobertura final.



Los datos empleados en el modelo para la estimación de la eficiencia de captura que están relacionados con la operación del sitio: profundidad de los residuos, el área de cobertura del sistema de captura, la cobertura del recubrimiento inferior, así como la existencia de afloramientos de lixiviados en el sitio, fueron obtenidos considerando la información obtenida en la visita de campo (Figura 10).

**Figura 10.** Afloramientos de lixiviados en el SDF de Zaachila.



## RESULTADOS

Los resultados obtenidos de los ejercicios de modelación realizados con las dos metodologías propuestas y los datos recabados a partir de la visita al sitio se presentan a continuación.

### MODELO MEXICANO DE BIOGÁS

Los resultados obtenidos del Modelo Mexicano de Biogás muestran que para el año 2022 se dispuso una cantidad promedio de residuos de 292 000 t/año. Considerando los históricos calculados, la cantidad de residuos acumulados en el sitio es de 9 168 200 t. Con base en lo anterior y considerando los parámetros de cálculo ya descritos, la cantidad estimada de biogás generada en el SDF de Villa de Zaachila es de aproximadamente **3 277.8 m<sup>3</sup>/h**, lo que implica una generación de **10 290.92 t/año de CH<sub>4</sub>**.

Como resultado, el potencial de recuperación de biogás en el sitio se estima en **1151.1 m<sup>3</sup>/h**, con lo cual se podría manejar un proyecto de reducción de emisiones de **3060.9 t/año de CH<sub>4</sub>**, lo cual implicará una reducción de **101 077.1 ton/año de CO<sub>2</sub> eq**.

De acuerdo con las proyecciones de generación y recuperación estimadas de biogás que se presentan en la Tabla 5 y Figura 11, considerando la estrategia de cierre del SDF a mediados de 2024, se evidencia que la generación máxima de biogás presentará su máximo en 2025, con un valor de **3470.7 m<sup>3</sup>/h**, una recuperación potencial de biogás de **1214.7 m<sup>3</sup>/h**, una reducción de emisiones de **3809.6 ton/año de CH<sub>4</sub>**, y una potencial reducción de **106 667.4 t/año de CO<sub>2</sub> eq**. Bajo las condiciones antes mencionadas, se espera un decremento paulatino en las emisiones y potencial de recuperación en el sitio.

ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL  
VILLA DE ZAACHILA, OAXACA

**Tabla 5.** Proyecciones de la generación y recuperación de biogás en el SDF de Zaachila según el Modelo Mexicano de Biogás v.2.

Año	Disposición (Mg/año)	Disposición acumulada (Mg)	Generación de biogás (m <sup>3</sup> /h)	Eficiencia del sistema de captura (%)	Recuperación de biogás estimada (m <sup>3</sup> /h)	Capacidad máxima de la planta de Electricidad (MW)	Reducción de emisiones estimadas	
							(CH <sub>4</sub> t/año)	(CO <sub>2</sub> eq t/año)
1980	149900	149900	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1981	152300	302200	207.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1982	154700	456900	391.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1983	157200	614100	554.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1984	159700	773800	701.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1985	162300	936100	833.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1986	164900	1101000	954.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1987	167500	1268500	1064.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1988	170200	1438700	1166.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1989	172900	1611600	1261.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1990	175700	1787300	1349.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1991	178500	1965800	1433.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1992	181400	2147200	1512.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1993	184300	2331500	1587.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1994	187200	2518700	1659.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1995	190200	2708900	1728.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1996	193200	2902100	1794.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1997	196300	3098400	1859.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1998	199400	3297800	1921.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1999	202600	3500400	1983.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2000	205800	3706200	2043.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2001	209100	3915300	2101.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2002	212400	4127700	2159.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2003	215800	4343500	2217.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2004	219300	4562800	2273.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

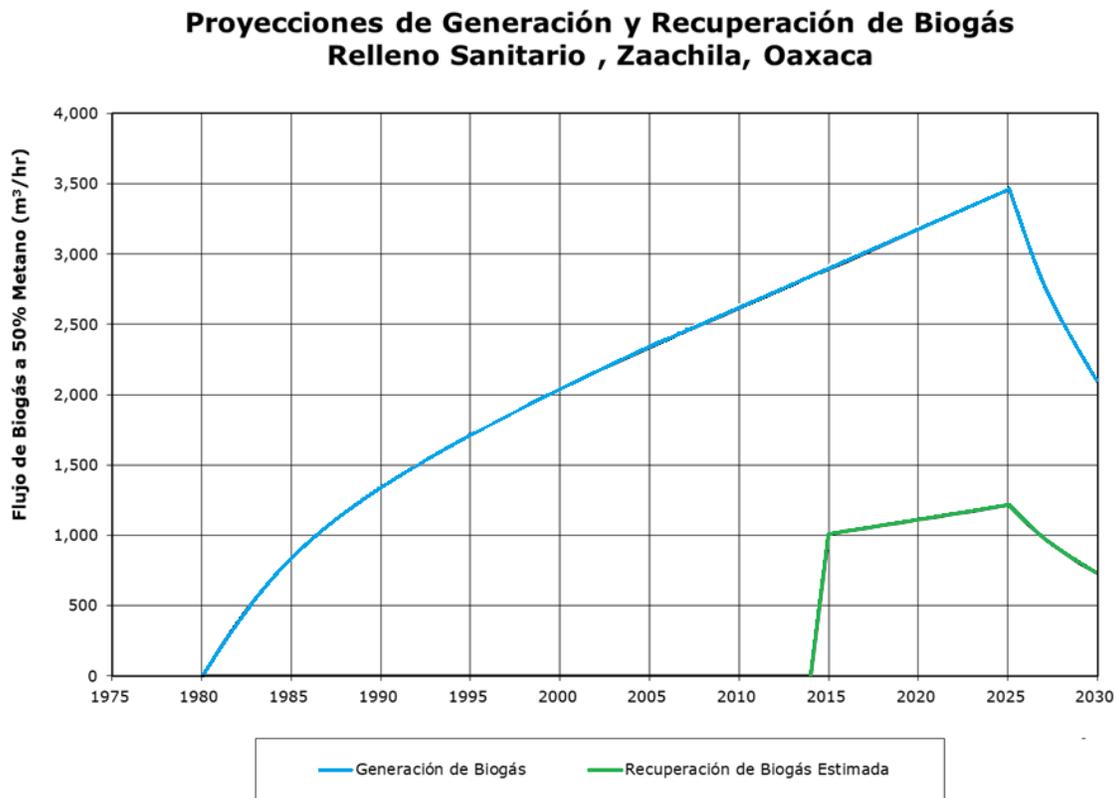


ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE BIOGÁS EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL  
VILLA DE ZAACHILA, OAXACA

2005	222800	4785600	2329.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2006	226400	5012000	2385.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2007	230000	5242000	2441.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2008	233700	5475700	2496.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2009	237400	5713100	2551.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2010	241200	5954300	2607.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2011	245100	6199400	2662.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2012	249000	6448400	2717.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2013	253000	6701400	2773.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2014	257000	6958400	2829.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2015	261100	7219500	2885.2	0.4	1009.8	1.7	3166.9	88673.8
2016	265300	7484800	2941.6	0.4	1029.6	1.7	3228.8	90405.4
2017	269500	7754300	2998.3	0.4	1049.4	1.7	3291.1	92149.4
2018	273800	8028100	3055.4	0.4	1069.4	1.8	3353.7	93904.1
2019	278200	8306300	3113.0	0.4	1089.5	1.8	3416.9	95672.3
2020	282700	8589000	3171.0	0.4	1109.9	1.8	3480.6	97456.5
2021	287200	8876200	3229.7	0.4	1130.4	1.9	3545.0	99258.8
<b>2022</b>	<b>292000</b>	<b>9168200</b>	<b>3288.8</b>	<b>0.4</b>	<b>1151.1</b>	<b>1.9</b>	<b>3609.9</b>	<b>101077.1</b>
2023	296700	9464900	3348.8	0.4	1172.1	1.9	3675.8	102922.1
2024	301400	9766300	3409.5	0.4	1193.3	2.0	3742.4	104786.3
2025	0	9766300	3470.7	0.4	1214.7	2.0	3809.6	106667.4
2026	0	9766300	3108.0	0.4	1087.8	1.8	3411.4	95519.9
2027	0	9766300	2795.5	0.4	978.4	1.6	3068.4	85915.6
2028	0	9766300	2525.0	0.4	883.7	1.5	2771.5	77601.7
2029	0	9766300	2289.7	0.4	801.4	1.3	2513.3	70371.1
2030	0	9766300	2084.1	0.4	729.4	1.2	2287.6	64053.1



**Figura 11.** Proyecciones estimadas de generación y recuperación de biogás para el SDF de Zaachila.



## MODELO DEL PANEL INTERGUBERNAMENTAL DE CAMBIO CLIMÁTICO

Los resultados obtenidos mediante el empleo de la metodología del IPCC (IPCC, 2006) son consistentes con los resultados obtenidos a partir de la aplicación del Modelo Mexicano del Biogás, estimándose una generación de biogás para el año base de 2022 de **11 236.83 ton/año de CH<sub>4</sub>**, que al compararse con las **10 290.92 ton/año de CH<sub>4</sub>** estimadas con el Modelo Mexicano de biogás representa una diferencia de 972. 91 t/año; es decir, un valor relativo del 9.4 %. La diferencia observada entre los métodos de estimación se atribuye a las variables consideradas por el Modelo Mexicano de Biogás que permiten hacer un ajuste más preciso de la generación del CH<sub>4</sub>, al considerar parámetros de operación del lugar más detallados, lo que permite minimizar los errores en los cálculos realizados.

## CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos después de realizar la modelación del SDF de Zaachila, se puede concluir que el SDF es un sitio que ha recibido una cantidad histórica de RSU y RME de magnitudes importantes. Considerando la caracterización de los residuos de la región, así como las variables climáticas, se puede indicar que se tienen las condiciones favorables para la generación de biogás, de CH<sub>4</sub> y de compuestos orgánicos volátiles. Los resultados obtenidos a partir de la aplicación del modelo mexicano de biogás para este sitio fueron de **10 290.92 t/año de CH<sub>4</sub>**, mientras que al aplicar el modelo propuesto por el IPCC el resultado **11 236.83 t/año de CH<sub>4</sub>**. Estos valores exhiben que este sitio en la actualidad está posicionado dentro de los 15 SDF del país que contribuyen con más emisiones de gases de efecto invernadero. De acuerdo con las estimaciones presentadas y las observaciones satelitales, el sitio produce cerca del 1% del total de las emisiones de CH<sub>4</sub> generadas en los SDF del país, por lo que es importante explorar las alternativas de captura para recuperación energética o de quema que tengan mayor viabilidad técnica y económica para su implementación y que permitan disminuir el impacto de estos contaminantes.

## RECOMENDACIONES

### RELACIONADAS CON EL CUMPLIMIENTO DE LA NOM-083-SEMARNAT-2003

#### Características operativas del sitio de disposición final

- a) Es necesario que se implementen medidas de cobertura diaria para los residuos dispuestos en el frente de trabajo, para evitar el eventual esparcimiento a las zonas aledañas de materiales como bolsas de plástico, envases desechables y otros materiales ligeros de fácil dispersión.
- b) Es recomendable que se implementen medidas para el control de fauna nociva, así como la proliferación de fauna local. En el lugar se pudo constatar la existencia de una gran cantidad de perros que se alimentan de los residuos dispuestos en el SDF. Según lo expuesto por los representantes de colonias

aledañas, en la operación regular del sitio, la población de perros llegó a ser hasta de 100 individuos. Con el cierre del sitio muchos de estos animales emigraron a las colonias vecinas en busca de alimentos o fallecieron en la colindancia del lugar, propiciando problemas de salubridad pública que deben ser atendidos.

- c) Es importante que se implementen medidas para el control del acceso al SDF de residuos peligrosos, considerando las medidas para prevenir la entrada de residuos líquidos tales como aguas residuales e industriales, etc.

### **Obras complementarias**

- a) Es importante que se especifique la puerta de acceso por la cual se estará permitiendo la entrada para disposición de los residuos al SDF y que se calculen las capacidades de ingreso de vehículos, tiempos y movimientos, para evitar la aglomeración de vehículos en espera de acceso en las inmediaciones del sitio.
- b) Es importante que se habilite la caseta de vigilancia y la báscula que se encuentra instalada en el lugar, para implementar un sistema de control de acceso de los residuos a ser dispuestos.
- c) Es recomendable considerar la implementación de una cerca perimetral que permita delimitar el SDF, proteger la infraestructura, así como impedir el acceso a fauna nociva, actores del sector informal y otros actores no acreditados.

### **Documentos con los que debe contar el SDF**

- a) Es recomendable que en el sitio se implementen medidas para contar con los documentos administrativos y operativos que considera la NOM-083-SEMARNAT-2003, entre los que figuran: Manual de operación (procedimientos de operación, control de calidad, perfil de puestos, reglamento interno), control de registro (ingreso de residuos, secuencia de llenado, generación y manejo de lixiviados y biogás, contingencias); informe mensual de actividades, programa de monitoreo de biogás, lixiviados y acuíferos, así como los documentos que acrediten el seguimiento de las actividades de monitoreo.

## **RELACIONADAS CON LAS APROXIMACIONES EMPLEADAS EN LA MODELACIÓN DE BIOGÁS**

De acuerdo con las observaciones realizadas en territorio, así como con las modelaciones realizadas en este trabajo, es recomendable que, para tener un cálculo más exacto del potencial de generación de biogás en el SDF de Zaachila, se confirmen los siguientes parámetros de cálculo:

- a) Existencia de algún incendio en el relleno sanitario, el % de área de impacto y la severidad del impacto.
- b) Año de arranque del sistema de captura.
- c) Porcentaje del área con residuos con sistema de captura.
- d) Porcentaje del área con residuos con cubierta final.
- e) Porcentaje del área con residuos con cubierta intermedia.
- f) Porcentaje del área con residuos con cubierta diaria.
- g) Porcentaje del área con residuos sin cobertura.
- h) Porcentaje del área de residuos con recubrimiento inferior de arcilla/geomembrana.
- i) Prácticas generales de diseño y manejo en el sitio de disposición final.

Así mismo, es recomendable que, para afinar el cálculo del potencial de generación de biogás en el SDF de Zaachila, se realicen los siguientes estudios:

- a) Estudios de caracterización de residuos depositados en el SDF.
- b) Estudios de composición de biogás en las distintas fases de construcción y operación del SDF de Zaachila, Oaxaca.

Finalmente, con el objetivo de determinar los posibles riesgos a la población se considera de suma importancia realizar estudios de monitoreo de contaminantes orgánicos volátiles empleando Canisters.

## BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar-Virgen, Q., Taboada-González, P. A., & Ojeda-Benítez, S. (2011). Modelo mexicano para la estimación de la generación de biogás. *Ingeniería*, 15 (1), 37-45.
- ALAhmad, M., Dimashki, M., Nassour, A., Nelles, M. (2012). Characterization, concentrations, and emission rates of volatile organic compounds from two major landfill sites in Kuwait. *Am. J. Environ. Sci.* 8, 56–63.
- Allen, M.R., Braithwaite, A., Hills, C.C. (1997). Trace organic compounds in landfill gas at seven U.K. waste disposal sites. *Environ. Sci. Technol.* 31, 1054–1061.
- Colegio de Ingenieros Ambientales de México (CINAM). (2022). Dictamen sobre las condiciones que guarda actualmente el relleno sanitario de Zaachila, Oaxaca, con miras a su clausura y saneamiento.
- Diario Oficial de la Federación (2004). Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. Fecha de publicación: 20 de octubre de 2004.
- Escamilla García, P. E. (2019). Eficiencia y confiabilidad de modelos de estimación de biogás en rellenos sanitarios. *LA GRANJA. Revista de Ciencias de la Vida*, 29 (1), 32-44.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2006). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Volume 5 (Waste), Chapter 3 (Solid Waste Disposal).
- SEMARNAT-SEMAEDES. (2015). Resumen ejecutivo del Programa Estatal para la Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial del Estado de Oaxaca, (2015-2020).
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2009). Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0, Victoria Ludwig Landfill Methane Outreach Program.



# MEDIO AMBIENTE

SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES



# INECC

INSTITUTO NACIONAL  
DE ECOLOGÍA Y  
CAMBIO CLIMÁTICO