

# Evaluación de los Beneficios Climáticos Potenciales del Proyecto “Manejo y Aprovechamiento de Residuos Orgánicos Mediante Valorización Energética en el Municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México”

Preparado para:

**EL MUNICIPIO DE NAUCALPAN DE JUÁREZ,  
MEXICO**

Julio de 2018



**CLIMATE &  
CLEAN AIR  
COALITION**  
TO REDUCE SHORT-LIVED  
CLIMATE POLLUTANTS



**EPA**  
United States  
Environmental Protection  
Agency



**Evaluación de los Beneficios Climáticos  
Potenciales del Proyecto “Manejo y  
Aprovechamiento de Residuos Orgánicos  
Mediante Valorización Energética en el  
Municipio de Naucalpan de Juárez, Estado  
de México”**

Preparado para:

**EL MUNICIPIO DE NAUCALPAN DE JUÁREZ, MEXICO**

Preparado por:

**LA AGENICA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL DE LOS ESTADOS UNIDOS**  
En representación de  
**INICIATIVA DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES DE LA COALICIÓN  
DE CLIMA Y AIRE LIMPIO**

Asistencia técnica proporcionada mediante el contrato EP-C-13-039 de EPA por:

**ABT ASSOCIATES**  
10 Fawcett Street  
Cambridge, MA 02138

**Julio de 2018**

## Índice

Lista de Acrónimos y Abreviaturas .....	iii
Resumen Ejecutivo .....	iv
1    Introducción .....	1-1
2    Antecedentes.....	2-1
2.1    Caracterización de Residuos de Naucalpan.....	2-1
2.2    Descripción del Sistema de Gestión de Residuos de Naucalpan y el Proyecto DA.....	2-2
3    Metodología y Presupuestos.....	3-1
3.1    Resumen de Metodología.....	3-1
3.2    Escenario de Referencia .....	3-3
3.3    Escenario del Proyecto DA.....	3-4
4    Resultados.....	4-1
4.1    Impactos de la Desviación de Residuos Orgánicos en las Emisiones del Relleno Sanitario ...	4-1
4.2    Impactos del DA en Emisiones .....	4-2
4.3    Total del Cambio en Emisiones .....	4-3
4.4    Limitaciones .....	4-4
4.5    Co-Beneficios del Proyecto DA.....	4-5
5    Conclusiones .....	5-1
6    Referencias .....	6-1
Apéndice A: La Herramienta SWEET.....	A-1
A1.    Factor de Corrección de Metano.....	A-2
A2.    Oxidación.....	A-3
Apéndice B: Características del Vertedero .....	B-1

## Lista de Figuras

Figura 1. Composición de Residuos en Naucalpan.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 2. Cambio en Emisiones (toneladas CO <sub>2</sub> e) por Año (2019–2038).....	4-2

## Lista de Cuadros

Cuadro E.1. Cambio Total en Emisiones Que Resulta de la Instalación DA Propuesta.....	v
Cuadro 1. Supuestos sobre la Diversión de Residuos en SWEET .....	3-5
Cuadro 2. Supuestos Sobre Generación de Electricidad de Biogás .....	3-7
Cuadro 3. Cambios en Residuos y Emisiones Comparados al Escenario de Referencia .....	4-1
Cuadro 4. Producción de Electricidad y Cambios en Emisiones Asociados con la Instalación DA Propuesta .....	4-3
Cuadro 5. Total del Cambio en Emisiones que Resulta de la Instalación DA Propuesta .....	4-4
Cuadro B.1. Comparación de Vertederos de Residuos .....	B-1

## Lista de Acrónimos y Abreviaturas

DA	Digestor Anaeróbico
CH <sub>4</sub>	Metano
CHP	Cogeneración de Calor y Electricidad
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CO <sub>2</sub> e	Equivalentes de Dióxido de Carbono
Coalición	Coalición de Clima y Aire Limpio
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
GMI	Iniciativa Mundial de Metano
GWH	Gigawatt hora
GWP	Potencial de Calentamiento Global
IPCC	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
LFG	Gas de Rellenos Sanitarios
MCF	Factor de Corrección de Metano
MP	Material particulado
RSM	Residuos Sólidos Municipales
NO <sub>x</sub>	óxidos nitrosos
SO <sub>x</sub>	óxidos de azufre
SWEET	Herramienta para la Estimación de Emisiones de Residuos Sólidos ("Solid Waste Emissions Estimation Tool")
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
Iniciativa RSM	Iniciativa de Residuos Sólidos Municipales

## Resumen Ejecutivo

Con casi un millón de habitantes y varias industrias grandes, el Municipio de Naucalpan de Juárez, México (Naucalpan), enfrenta múltiples desafíos relacionados con la gestión de residuos, que incluyen la falta de plantas para tratar los materiales reciclables y residuos orgánicos. Actualmente, la ciudad envía todos los residuos municipales a un relleno sanitario dentro de los límites de municipales,<sup>1</sup> que emite contaminantes atmosféricos dañinos, especialmente metano (CH<sub>4</sub>) y carbono negro. En 2016 Naucalpan se sumó a la Iniciativa de Residuos Sólidos Municipales (Iniciativa RSM) de la Coalición de Clima y Aire Limpio para obtener asistencia para mejorar sus prácticas de gestión de residuos y lograr reducciones de emisiones de metano y carbono negro.

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), como socio principal en la Iniciativa RSM, ha ayudado a Naucalpan a evaluar el potencial de mejorar la gestión de residuos y reducir emisiones. En 2016, la EPA ayudó a Naucalpan a evaluar la factibilidad de un proyecto de gestión de residuos que constaría de instalar un digestor anaeróbico (DA) para procesar residuos orgánicos y producir biogás que se puede usar para generar electricidad.

Este reporte presenta el análisis de las reducciones de emisiones de metano que se podrían lograr a partir de la construcción y operación propuesta del DA en Naucalpan y describe brevemente los co-beneficios adicionales del proyecto. Los ahorros de emisiones resultan principalmente de la diversión de residuos orgánicos del sitio de disposición final y la generación evitada al sustituir el consumo de electricidad de la red con electricidad generada a partir de los residuos. Nuestro análisis también identifica, evalúa, y considera otros cambios significativos en emisiones a lo largo de los 20 años de vida del proyecto analizado.

Las estimaciones de reducciones de emisiones se basan en los supuestos más actualizados con respecto a la configuración y las especificaciones propuestas del proyecto, y el análisis se basa en supuestos conservadores con respecto a los detalles del proyecto que todavía están pendientes.<sup>2</sup> Se evaluaron dos escenarios: un escenario de límite inferior en el que se envían 300 toneladas de residuos orgánicos al digestor cada día y un escenario de límite superior en el que 400 toneladas de residuos orgánicos se desvían cada día. Modelamos las reducciones de

La Iniciativa de Residuos Sólidos Municipales de la **Coalición de Clima y Aire Limpio** une gobiernos nacionales y locales, organizaciones internacionales, y otros socios para reducir emisiones de contaminantes climáticos de vida corta, como metano y carbono negro, del sector de residuos sólidos municipales.

Para más información:

[www.residuos.ccacoalition.org](http://www.residuos.ccacoalition.org)  
[ccac\\_secretariat@unep.org](mailto:ccac_secretariat@unep.org)  
[@CCACoalition](https://www.facebook.com/ccacoalition)  
[facebook.com/ccacoalition](https://www.facebook.com/ccacoalition)

<sup>1</sup> Es importante mencionar que Naucalpan y la Iniciativa Mundial de Metano (GMI, por sus siglas en inglés) usan caracterizaciones de rellenos sanitarios y vertederos controlados que son un poco diferentes. Los vertederos de Naucalpan se clasifican como vertederos controlados a los fines del análisis del presente informe, porque la herramienta de modelo usa las características de GMI; sin embargo, en el texto del informe, cuando nos referimos al vertedero lo llamamos un relleno sanitario para ser coherente con la caracterización del sitio por parte de Naucalpan.

<sup>2</sup> Es decir, cuando existe un rango de valores potenciales para estimar un parámetro usado en el análisis, usamos supuestos que tienden a bajar las estimaciones de reducciones de emisiones.

emisiones esperadas debidas a la desviación de residuos orgánicos usando la Herramienta para la Estimación de Emisiones de Residuos Sólidos ("Solid Residuos Emisiones Estimation Tool", SWEET) de la Iniciativa, y calculamos las emisiones de la red eléctrica evitadas con base en información de Naucalpan y el juicio de expertos.

Con base en la información proporcionada por Naucalpan, la construcción del DA desviaría entre 109,500 y 146,000 toneladas de residuos orgánicos de rellenos sanitarios por año.<sup>3</sup> Como se muestra en el Cuadro E.1, esta desviación reduciría 58,000 a 77,000 toneladas de emisiones de CO<sub>2e</sub> (equivalentes de dióxido de carbono) por año, con ahorros acumulativos de 1.16 a 1.54 millones de toneladas de CO<sub>2e</sub> durante la vida útil esperada de 20 años de la instalación. La reducción de emisiones calculada es derivada principalmente por la reducción de emisiones de CH<sub>4</sub> debida a la desviación de residuos orgánicos del vertedero, que es responsable del 93 por ciento del total de la reducción de emisiones. Además, Naucalpan pretende usar el biogás producido por el DA para generar entre 17 y 23 Gigawatt hora (GWh) de electricidad por año, que se puede usar para reducir la factura eléctrica de la ciudad (i.e., mediante un acuerdo de medición neta). Más allá de estos beneficios, el proyecto también tendría otros co-beneficios, como la disminución de la cantidad de lixiviado generada en el vertedero, el mejoramiento de la calidad del aire y la salud pública, y la creación de empleo a corto plazo para construir la instalación y empleo a largo plazo para operar la instalación.

**Cuadro E.1. Cambio Total en Emisiones Resultantes del Proyecto de Digestión Anaerobia**

Fuente de Emisiones	Cambio en Emisiones Por Año (toneladas CO <sub>2e</sub> )		Cambio en Emisiones Durante la Duración del Proyecto de 20 Años (toneladas CO <sub>2e</sub> )	
	Límite Inferior	Límite Superior	Límite Inferior	Límite Superior
Diversión de Residuos Orgánicos	-54,000	-71,000	-1,072,000	-1,429,000
Generación de Electricidad Desplazada	-7,000	-9,000	-141,000	-188,000
Emisiones del DA	3,000	4,000	55,000	73,000
<b>Total de Emisiones</b>	<b>-58,000</b>	<b>-77,000</b>	<b>-1,158,000</b>	<b>-1,544,000</b>

Notas: 1. Las estimaciones de reducciones de emisiones han sido redondeadas al mil de CO<sub>2e</sub> más cercano. El total de cambios de emisiones ha sido redondeado y por eso es posible que no sea igual a la suma de los componentes. 2. El periodo de 20 años contempla los años 2019 a 2038. 3. El límite inferior refleja 300 toneladas/día de residuos desviados del vertedero al AD y el límite superior refleja 400 toneladas/día de residuos desviados del vertedero al AD.

<sup>3</sup> Se espera que el relleno sanitario actual se mantenga abierto por entre 3 y 7 años más. Posteriormente, se contempla la apertura de un nuevo relleno sanitario, cuya ubicación aún no ha sido determinada.

# 1 Introducción

Los sitios de disposición de residuos,<sup>4</sup> que incluye rellenos sanitarios y tiraderos controlados y abiertos, son la tercer mayor fuente de emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) antropogénico a nivel mundial. El metano, un contaminante climático de vida corta, es un gas de efecto invernadero (GHG) que es 25 veces más poderoso que dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) durante un periodo de 100 años (i.e., 1 tonelada de CH<sub>4</sub> es equivalente a 25 toneladas de equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>e)<sup>5</sup>) (Forster et al., 2007). Además, el CH<sub>4</sub> es un precursor del ozono troposférico, que causa daños respiratorios y es dañino a cultivos, por lo que se considera un riesgo grave para la salud pública y la economía.

Desde 2016, el Municipio de Naucalpan de Juárez (Naucalpan), México, ha participado en la Iniciativa de Residuos Sólidos Municipales (Iniciativa RSM) de la Coalición de Clima y Aire Limpio (Coalición) para obtener ayuda en la mejora de sus prácticas de gestión de residuos. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), como socio principal en la Iniciativa RSM, ha apoyado al municipio en la evaluación de métodos para mejorar la gestión de residuos y reducir emisiones.

Naucalpan actualmente recolecta aproximadamente 1,348 toneladas de residuos sólidos municipales (RSM) por día. Hasta marzo de 2018, estos residuos eran procesados en una estación de transferencia y transportados en camiones pesados de diésel a rellenos sanitarios que se ubican a 36 y 51 kilómetros de distancia. Consciente de los beneficios ambientales y económicos potenciales, el municipio tomó acciones para mejorar este proceso. En abril de 2018, el municipio reabrió un relleno sanitario dentro del municipio que había funcionado previamente, con lo que redujo el tiempo y el costo de transportar residuos. Además, desde 2016 la Iniciativa RSM ha ayudado a Naucalpan a evaluar la factibilidad de un proyecto de gestión de residuos que constaría de instalar un digestor anaeróbico (DA) para procesar residuos orgánicos y producir biogás que se puede usar para generar electricidad. Con la ayuda de EPA, Naucalpan emprendió varias actividades para desarrollar este proyecto, incluyendo la preparación de un estudio de caracterización de los residuos en la estación de transferencia que Naucalpan usó hasta marzo de 2018, y otros estudios de ingeniería y factibilidad técnica.

Este reporte presenta nuestra evaluación de los beneficios climáticos potenciales y otros co-beneficios asociados con el proyecto DA propuesto. En nuestra evaluación, consideramos que las reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub>e son los beneficios climáticos directos del proyecto. También describimos varios co-beneficios sociales, ambientales, y económicos.

---

<sup>4</sup> En nuestra evaluación, distinguimos entre tres tipos principales de tiraderos de residuos – rellenos sanitarios, tiraderos controlados, y tiraderos abiertos (no controlados) – porque cada uno tiene perfiles de emisiones diferentes. En realidad, muchas veces el término “relleno sanitario” se usa genéricamente para referir a todos los tipos de tiraderos. El Apéndice B tiene una descripción de cómo distinguimos entre estos tres términos.

<sup>5</sup> El equivalente de dióxido de carbono considera el potencial de calentamiento mundial (GWP, por sus siglas en inglés) de cada GHG para convertir todos los GHGs a una unidad común. En este documento, usamos el GWP de 100 años de cada gas para proporcionar un valor de CO<sub>2</sub>e.



Este reporte se divide en las siguientes secciones:

- La Sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** proporciona una visión de conjunto del proyecto DA, que incluye una caracterización de los residuos que el proyecto tratará y una descripción del proyecto.
- La Sección 3 describe la metodología y los supuestos utilizados en el desarrollo de las estimaciones de los beneficios del proyecto.
- La Sección 4 reporta los resultados del análisis, incluyendo estimaciones de las reducciones directas de emisiones de CO<sub>2</sub>e, y una descripción de las principales fuentes de incertidumbre y las limitantes asociadas con los resultados. Esta sección también describe los co-beneficios ambientales y económicos del proyecto.
- La Sección 5 proporciona nuestras conclusiones y posteriormente se proporcionan las referencias citadas en el documento.
- El Apéndice A proporciona más información sobre la Herramienta para la Estimación de Emisiones de Residuos Sólidos (SWEET, por sus siglas en inglés) usada en el análisis, particularmente cómo la herramienta calcula emisiones de rellenos sanitarios.
- El Apéndice B proporciona las características de los sitios de disposición final de residuos de la Iniciativa de Metano Global (GMI, por sus siglas en inglés), que se usa para justificar la caracterización del sitio de disposición de Naucalpan en SWEET.

## 2 Antecedentes

Naucalpan planea construir un DA que reducirá emisiones de CH<sub>4</sub> de la disposición final de residuos y desplazará emisiones de la red eléctrica. Este reporte presenta los resultados de un análisis de esas reducciones de emisiones. El análisis utiliza herramientas y recursos desarrollados por la Iniciativa RSM y la EPA, y utiliza trabajos anteriores de planificadores urbanos, científicos, e ingenieros que caracterizaron los residuos de la ciudad y desarrollaron el plan general y las especificaciones del proyecto.

### 2.1 Caracterización de Residuos de Naucalpan

Naucalpan utiliza cuadrillas de personal que operan camiones pesados de diésel para recolectar residuos de todo el municipio. Algunos residuos son separados de manera informal mientras los camiones transportan los residuos al relleno sanitario. Los trabajadores seleccionan manualmente materiales que son reciclables o re vendibles y que incluye metales, plásticos, papel y vidrio. Además, los trabajadores de recolección de residuos frecuentemente separan materiales reciclables mientras recolectan residuos de origen residencial y comercial, removiendo residuos de valor y reduciendo la cantidad depositada en el relleno sanitario (EPA et al., 2017b).

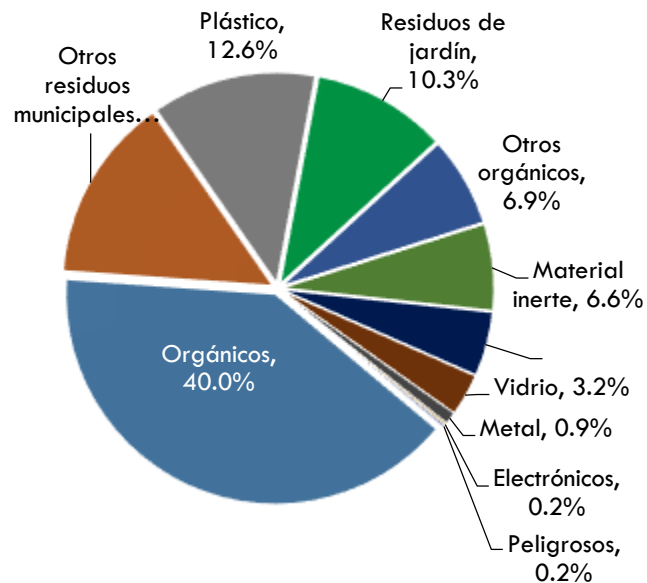
Después de esta separación informal, aproximadamente 1,348 toneladas de RSM por día, o casi 500,000 toneladas por año, son depositadas en un relleno sanitario (Mexan, 2017).<sup>6</sup> Los residuos de Naucalpan han aumentado considerablemente, debido al crecimiento significativo de la industria y la población urbana, y también a cambios en los patrones de consumo. Aunque no hay datos actualizados de Naucalpan en particular, los datos para todo México sugieren que la generación de residuos en el país creció de aproximadamente 29.3 millones de toneladas en 1997 a aproximadamente 42.1 millones de toneladas en 2012, lo que implica una tasa de crecimiento anual de 2.4 por ciento y un crecimiento total de más de 40 por ciento durante este periodo (Mexan, 2017).

---

<sup>6</sup> Cuando el estudio de caracterización de residuos fue realizado, todos los residuos se transportaban a la estación de transferencia. A partir de abril de 2018, los residuos se transportan directamente al relleno sanitario dentro de la ciudad, y Naucalpan confirmó que el proceso y las características de los residuos continúan siendo los mismos.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la composición de residuos de Naucalpan, con base en el estudio de caracterización de residuos realizado por EPA en nombre de la Iniciativa RSM. Los residuos orgánicos (papel compostable y restos de comida), plásticos, y restos del jardín constituyen casi dos tercios del flujo de residuos de Naucalpan, y los residuos orgánicos son la fracción más grande (40 por ciento). Los plásticos y residuos de jardinería constituyen el 13 por ciento y el 10 por ciento del flujo de residuos de la ciudad, respectivamente.

**Figura 1. Composición de Residuos en Naucalpan**



## 2.2 Descripción del Sistema de Gestión de Residuos de Naucalpan y el Proyecto de DA

La ciudad está mejorando sus procedimientos para recolectar, gestionar y disponer de sus residuos. En abril de 2018, Naucalpan reabrió un relleno sanitario<sup>7</sup> dentro del municipio que previamente estaba cerrado y que es operado por una empresa privada mediante un contrato con la ciudad.

La ciudad pretende construir un DA para desviar restos de comida y papel compostable del vertedero. Un análisis de ingeniería y planeación concluyó que el papel no-compostable se reciclará en algún punto en el futuro, debido a su valor más alto en el mercado de reciclaje y que los residuos de jardín no son apropiados para el DA en los planes actuales.

El proceso de digestión anaeróbica cataliza la descomposición de residuos orgánicos sin oxígeno. Este proceso produce biogás (una mezcla de principalmente CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>), que se puede usar directamente como combustible o que se puede quemar y usar como fuente de electricidad, y también digestato o composta, que se puede aplicar a la tierra como fertilizante o desechar en el relleno sanitario.

La composición de residuos se determinó como parte del estudio de caracterización de residuos para Naucalpan, que incluyó la toma y el análisis de muestras en marzo de 2017.<sup>4</sup> Los residuos fueron clasificados y muestreados en la estación de transferencia, después de la separación informal de materiales reciclables y re vendibles.

<sup>7</sup> Con base en la *Guía Internacional de Mejores Prácticas para Proyectos de Energía de Gas de Rellenos Sanitarios* de GMI, el vertedero en Naucalpan se califica como un vertedero controlado en vez de un relleno sanitario (Apéndice B). Esta definición no es coherente con los estándares de México para vertederos. Por eso, nos referimos al vertedero como un relleno sanitario pero modelamos el vertedero como un vertedero controlado en SWEET en este análisis.

Naucalpan planea usar el biogás que resulta para generar electricidad en una planta de cogeneración de calor y electricidad (CHP) que se ubicará en la misma área que el DA. Una parte de la electricidad se utilizará para satisfacer la demanda energética del DA, y la porción restante se inyectará a la red eléctrica nacional. El valor de esta electricidad será acreditado en la factura eléctrica de la ciudad (i.e., neteo). El calor será utilizado para evaporar el digestato en su fracción líquida para producir un fertilizante concentrado y más ligero de forma cristalina. El proceso de evaporación también reducirá la cantidad de digestato producido por la planta, lo cual conllevaría a una reducción en los costos de almacenamiento, transporte, aplicación y disposición.

## 3 Metodología y Supuestos

Esta sección proporciona lo siguiente:

- Un resumen de la metodología del análisis;
- Una descripción de las condiciones actuales en Naucalpan; y
- Una descripción de los cambios en emisiones potenciales debidos a la construcción del DA (escenario “Proyecto DA”) y los supuestos usados en la estimación de reducciones de CO<sub>2</sub>e.

### 3.1 Síntesis de la Metodología

El objetivo de este análisis es estimar los beneficios directos de CO<sub>2</sub>e y evaluar los beneficios indirectos potenciales asociados con la implementación del proyecto DA. Con este fin, nuestro análisis se llevó a cabo en tres pasos:

1. Identificar las condiciones actuales (el escenario de referencia) de la gestión de residuos en Naucalpan, y estimar las emisiones de los componentes claves de este sistema que cambiarán con la implementación del Proyecto DA.<sup>8</sup>
2. Identificar el escenario del Proyecto DA de gestión de residuos en Naucalpan y estimar las emisiones de los componentes claves de este sistema para los cuales las emisiones serán diferentes del escenario de referencia.
3. Desarrollar una estimación de los cambios netos en las emisiones asociadas con el Proyecto DA, lo cual se obtiene restando las emisiones de las fuentes de emisiones relevantes bajo el escenario del Proyecto DA respecto de las emisiones bajo el escenario de referencia.

Nuestro análisis utilizó SWEET Versión 2.1, que fue desarrollado por EPA en nombre de la Iniciativa RSM (Coalición de Clima y Aire Limpio Iniciativa RSM, 2018). La función de SWEET es calcular emisiones de todas las fases de un sistema de gestión de residuos. Esta herramienta utiliza metodologías establecidas para estimar cambios en emisiones de vertederos que resultan de la desviación de residuos, incluyendo algunas desarrolladas por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y el Programa de Metano en Rellenos Sanitarios (*Landfill Methane Outreach Program*) de EPA. Las emisiones de metano de vertederos se estiman como la cantidad de CH<sub>4</sub> generada, menos la cantidad recolectada o destruida en un aparato de combustión, u oxidada en el material de cobertura. El Apéndice contiene mayor información sobre SWEET.<sup>9</sup>

Aunque SWEET calcula las emisiones del funcionamiento de la instalación DA, no es capaz de estimar las reducciones de emisiones asociadas con el desplazamiento de emisiones de la red

---

<sup>8</sup> No tenemos todos los datos necesarios para estimar el total de las emisiones del proceso de gestión de residuos de Naucalpan según el escenario de referencia. Solo estimamos las emisiones de fuentes de emisiones clave que pueden cambiar entre el escenario de referencia y el escenario del Proyecto DA.

<sup>9</sup> Para más información sobre los cálculos de emisiones del relleno sanitario, también véase el manual de usuario de SWEET: <http://www.residuos.ccacoalition.org/document/solid-residuos-emisiones-estimation-tool-sweet-version-20>.

eléctrica. Por ello, estas reducciones se calcularon con base en información proporcionada por Naucalpan y supuestos relevantes de expertos y la literatura relevante.

Aunque hay muchas fuentes de emisiones en un sistema de gestión de residuos, se espera que solamente una fracción de las emisiones potenciales cambie significativamente debido a la construcción y operación del DA. Por ello, nuestro análisis se enfoca en las siguientes fuentes de emisiones:

- **Emisiones del Relleno Sanitario:** Esta fuente incluye emisiones del relleno sanitario, que se basan en la cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario y las características del mismo. Estas emisiones se calculan utilizando SWEET. Como se mencionó anteriormente, suponemos que el vertedero es un tiradero controlado, basado en las características definidas por GMI para diferentes tipos de sitios de disposición final (Apéndice B).
- **Emisiones netas por el desplazamiento de electricidad de la red:** Como se ha mencionado, los DA reciben residuos orgánicos y generan biogás y digestato. Estimamos la cantidad bruta de electricidad que se puede generar a partir de la cantidad de biomasa procesada y la correspondiente producción de biogás, tomando en consideración la eficiencia de la planta CHP. A partir de ello, restamos el consumo de electricidad esperada del DA, la planta de separación, la planta CHP, y las pérdidas potenciales en la distribución. Con ello se estima la generación neta de electricidad que se inyectará a la red eléctrica. Suponemos que la electricidad generada a partir de biogás desplaza aquella que se distribuye en la red y que proviene principalmente de combustibles fósiles, lo que resulta en una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>e.
- **Emisiones directas del funcionamiento del DA:** El proceso de digestión anaeróbica no elimina todas las emisiones, y por lo tanto es razonable incorporar emisiones del funcionamiento del digestor. Contabilizamos estas emisiones adicionales mediante el uso de SWEET, que utiliza factores predeterminados de emisiones para el tratamiento de residuos biológicos de las directrices del IPCC (Pipatti et al., 2006). Esto es usado como un ajuste del total de las reducciones de emisiones esperadas asociadas con el proyecto.

Un sistema de gestión de residuos como el en Naucalpan tiene otras fuentes de emisiones potenciales, que incluye emisiones de la transportación de residuos, las quemas de gas por emergencia y la aplicación de digestato, que se han omitido de este análisis:

- **Emisiones de transporte:** Con base en los planes actuales de la gestión de residuos proporcionados por Naucalpan, suponemos que el cambio en emisiones provenientes del transporte de los residuos es insignificante y que puede ser excluido de nuestro análisis. Esto es justificado porque la ubicación del DA está muy cerca de la ubicación del vertedero controlado, a una distancia de aproximadamente dos kilómetros según los planes recientes de Naucalpan. Por eso, tanto en el escenario de referencia como en el escenario del Proyecto DA, todos los residuos son transportados prácticamente la misma distancia desde su recolección hasta su procesamiento y disposición.
- **Quemas de gas por emergencia:** Se asume que las emergencias son casos raros que contribuyen mínimamente a las emisiones totales del digestor.

- **Aplicación del digestato:** Las emisiones de la aplicación del digestato se excluyeron del análisis debido a la incertidumbre con respecto al uso del digestato y la falta de datos específicos sobre las emisiones provenientes del uso de fertilizante químico que serían potencialmente desplazadas. En general, cuando el digestato sustituye a fertilizantes químicos en una base de aproximadamente uno-por-uno, las emisiones netas se reducen. Por eso, este supuesto es conservador ya que posiblemente subestima las reducciones de emisiones totales del Proyecto DA. Estos beneficios potenciales relacionados con el digestato son descritos de manera cualitativa en la Sección 4.5.

Nuestro análisis asume que la vida del proyecto es de 20 años, desde 2019 hasta 2038. Los resultados en la Sección 4 presentan los cambios promedio anuales y los cambios totales en las emisiones a lo largo de la duración del proyecto.

### 3.2 Escenario de Referencia

El escenario de referencia refleja las condiciones y los procesos para la gestión de residuos en Naucalpan sin la construcción del DA. Según su última evaluación, el relleno sanitario de la ciudad recibe un promedio de 1,348 toneladas de RSM por día durante los 12 meses del año (Mexan, 2017). Asumimos que esta cantidad de residuos aumenta a un ritmo de aproximadamente 2 por ciento al año, basado en el aumento histórico en la generación de residuos sólidos urbanos en todo México, que creció de 29.3 millones de toneladas en 1997 a 42.1 millones de toneladas en 2012 (Mexan, 2017).

En el escenario de referencia, suponemos que todos los residuos recolectados (1,348 toneladas/día) se transfieren directamente al relleno sanitario de Naucalpan.<sup>10</sup> Con base en información proporcionada por Naucalpan, estimamos que el relleno sanitario de Naucalpan operará por cuatro años, de 2018 a 2021. A principios de 2022, esperamos que el vertedero controlado actual se cierre, y que la ciudad empiece a deshacerse de residuos en un segundo vertedero controlado, que también se ubicará en Naucalpan y estará cerca del vertedero actual. Asumimos que el segundo vertedero permanecerá abierto por el resto de la vida del proyecto DA. Suponemos que la profundidad de los residuos del relleno sanitario es 30 metros, basado en rellenos sanitarios similares en el país.<sup>11</sup> Además, suponemos que, en la medida que la quema de residuos o la extracción activa de gas ocurra en cualquier momento en uno de los vertederos, la medida de esta actividad no es impactada por la construcción de un digestor y por eso, serán iguales en el escenario de referencia y en el escenario del Proyecto DA.

---

<sup>10</sup> Debido a que se espera que los rellenos sanitarios utilizados en el escenario de referencia se ubiquen cerca de la instalación DA, no estimamos las emisiones del transporte de residuos desde los puntos de recolección hasta los rellenos sanitarios, porque esta distancia es corta y no se espera que cambie significativamente debido a la operación del DA.

<sup>11</sup> SWEET usa el mismo factor de corrección de metano (MCF; un valor que toma en cuenta la cantidad de residuos que se descompone aeróbicamente en las capas superiores del relleno sanitario) para todos los vertederos (el vertedero se caracteriza como un “vertedero controlado” en SWEET) con una profundidad de más de 5 metros. La descomposición aeróbica resulta en la producción de CO<sub>2</sub>, en lugar de CH<sub>4</sub>. Los vertederos con una profundidad de más de 5 metros tienen una reducción de CH<sub>4</sub> de 20 por ciento, así que SWEET aplica un MCF de 0.8, que indica una reducción de emisiones de CH<sub>4</sub> de 20 por ciento.

### 3.3 Escenario del Proyecto DA

El escenario del proyecto DA refleja las condiciones y procesos de la gestión de residuos en Naucalpan según el supuesto que la ciudad construye la instalación DA conforme a lo planeado. Según este escenario, la ciudad seguirá recolectando un promedio de 1,348 toneladas de RSM por día (después de la separación informal), y la cantidad de residuos aumentará a un ritmo de 2 por ciento por año (Mexan, 2017). Sin embargo, en este escenario la ciudad operará una planta mecánica de tratamiento biológico para separar la fracción orgánica de RSM y procesará por separado una parte de los residuos orgánicos en el DA.<sup>12</sup>

Los residuos que no son canalizados al digestor serán depositados en el relleno sanitario de Naucalpan como se describe arriba (con los mismos supuestos relacionados al vertedero). El único cambio adicional respecto al escenario de referencia es la vida esperada del relleno sanitario. La construcción del DA resultará en una menor cantidad de residuos canalizados para disposición final en el relleno sanitario de Naucalpan, y el vertedero tardará más tiempo en alcanzar su máxima capacidad. Por eso, con base a información proporcionada por Naucalpan, suponemos que en el escenario del Proyecto DA, el relleno sanitario de Naucalpan seguirá abierto por siete años (en lugar de cuatro años), cerrando en 2024 en lugar de 2021.

Con base la información proporcionada por Naucalpan, consideramos dos escenarios que representan el límite inferior (300 toneladas/día) y el límite superior (400 toneladas/día) de las cantidades de residuos orgánicos enviados al digestor, después de que los residuos han sido separados y se ha rechazado el material que no es apto para el DA.<sup>13</sup> Dadas las limitaciones de la modelación en SWEET, suponemos que la cantidad de residuos desviados al DA permanece constante en el tiempo.<sup>14</sup> En realidad, entendemos que puede que la instalación DA empiece a procesar 300 toneladas/día en los primeros años de funcionamiento, y vaya aumentando gradualmente hasta alcanzar 400 toneladas/día durante la duración del proyecto. Esto resultará en reducciones de emisiones que se ubicarían entre las estimaciones del límite inferior y el límite superior. Con base en información de Naucalpan, suponemos que la composición de los residuos orgánicos desviados tendrá una composición de 77 por ciento de restos de comida y 23 por ciento de papeles compostable.<sup>15</sup> También suponemos que la composición de los residuos desviados se mantendrá constante en el tiempo. El Cuadro 1

---

<sup>12</sup> No todas las categorías relevantes de residuos orgánicos serán procesadas por el DA. Aunque estimaciones sugieren que Naucalpan produce aproximadamente 540 toneladas/día de restos de comida y papel compostable, Naucalpan pretende operar el DA a un nivel que recibe entre 300 y 400 toneladas/día. Por eso, los residuos orgánicos restantes serán depositados en el relleno sanitario con las otras fuentes de residuos.

<sup>13</sup> Aunque puede que el DA solo esté en funcionamiento durante el 90 por ciento del año, suponemos que los residuos llevados al digestor en un día en que no se encuentra en funcionamiento pueden ser guardados y luego procesados en días siguientes cuando el digestor esté en funcionamiento.

<sup>14</sup> Nótese que fue necesario hacer algunas modificaciones a SWEET para adecuar la cantidad desviada de 300 toneladas/día y 400 toneladas/día. En su forma original, la herramienta supone que el aumento de la cantidad desviada es coherente con el aumento de residuos totales. En nuestro análisis, suponemos que la cantidad de residuos desviados se mantiene constante en cada escenario (i.e., 300 toneladas/día o 400 toneladas/día).

<sup>15</sup> Esto se base en el supuesto que el flujo de residuos de Naucalpan se compone de 30.9 por ciento de restos de comida y 9.1 por ciento de papel compostable, como se informó en el estudio de caracterización de residuos de Naucalpan (EPA, 2017b).



muestra estos supuestos y otras diferencias claves entre el escenario de referencia y el escenario del Proyecto DA.

**Cuadro 1. Supuestos sobre la Diversión de Residuos en SWEET**

	Referencia	Proyecto DA	
		Límite Inferior	Límite Superior
Total de Residuos Orgánicos Desviados (toneladas/año)	0	109,500	146,000
Papel Compostable Desviado (toneladas/año)	0	25,185	33,580
Comida Desviada (toneladas/año)	0	84,315	112,420
Año de apertura del relleno sanitario de Naucalpan	2018	2018	2018
Año de clausura del relleno sanitario de Naucalpan	2021	2024	2024
Año de apertura del relleno sanitario de reemplazo de Naucalpan	2022	2025	2025
Año de clausura del relleno sanitario de reemplazo de Naucalpan	2100	2100	2100

Notas: 1. La cantidad de papel compostable desviada refleja el 23 por ciento del total de residuos orgánicos desviados, y la cantidad de restos de comida desviados refleja el 77 por ciento del total de residuos orgánicos desviados. 2. Suponemos que la cantidad de residuos desviados al DA se mantiene constante durante el periodo del análisis, de 2019 a 2038. 3. Es posible que nuestro supuesto de que la fecha de clausura del segundo relleno sanitario será 2100 no sea preciso o factible, pero esto no afecta nuestras estimaciones de reducciones de emisiones, a menos que el relleno sanitario de reemplazo cierre antes de 2038, el último año de nuestro análisis.

Estimamos las dos fuentes de cambios de emisiones asociadas con la operación del DA: las emisiones directas del digestor y las emisiones de la red eléctrica desplazadas. Para el primer componente, SWEET estimó la cantidad de CH<sub>4</sub> que el sistema produce por año, con base en supuestos y un factor de emisión desarrollado por el IPCC (Pipatti et al., 2006).<sup>16</sup>

Los supuestos más detallados están relacionados con la estimación de la cantidad de biogás que se puede usar como electricidad, alimentando el sistema y desplazando emisiones de la red eléctrica. En primer lugar, para estimar la cantidad de biogás usable generada, utilizamos un estudio piloto de los residuos orgánicos de Naucalpan, realizado por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) (Mexan, 2017). Este estudio utilizó residuos provenientes de Naucalpan y determinó que cada tonelada de residuos orgánicos procesados resultó en aproximadamente 40.4 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> (aproximadamente 57 por ciento del volumen del biogás) (Mexan, 2017).

Naucalpan supone que la instalación DA incluirá una planta CHP in situ para convertir CH<sub>4</sub> a electricidad. La planta CHP tendrá una capacidad de 2.8 MW (dos motores) durante los primeros años. Un tercer motor será añadido en el tercer año y un cuarto motor será añadido

<sup>16</sup> El factor de emisiones es sobre la base del peso húmedo.

en el quinto año, resultando en una capacidad total de 4.6 MW.<sup>17</sup> Sin embargo, aunque se espera que el tamaño de la planta CHP crezca con el tiempo, suponemos en esta evaluación que la cantidad de residuos orgánicos procesados por año sigue siendo la misma, y por eso también suponemos que la cantidad de electricidad producida por año sigue siendo la misma.<sup>18</sup> En realidad, porque Naucalpan pretende aumentar los residuos orgánicos procesados por la planta de 300 toneladas/día a 400 toneladas/día con el tiempo, la cantidad de electricidad producida por año aumentará hasta que alcance un límite superior. Por ello, nuestro análisis tiene un límite inferior que refleja la generación de electricidad con 300 toneladas procesadas por día por la planta y un límite superior que refleja la generación de electricidad con 400 toneladas procesadas por día.

Utilizando un contenido energético de CH<sub>4</sub> equivalente a aproximadamente 9.6 kWh/m<sup>3</sup>,<sup>19</sup> estimamos la cantidad máxima de energía potencialmente producida de los residuos orgánicos. Con base en la información con respecto a la planta CHP planeada, combinamos esta información con una eficiencia de conversión eléctrica de 40.4 por ciento,<sup>20</sup> que produce una estimación de generación bruta de electricidad. Finalmente, suponemos que el 12 por ciento de la generación de electricidad bruta se utiliza para las operaciones de la planta y el 6 por ciento se pierde en las líneas de transmisión hacia la subestación eléctrica más cercana. Aplicamos un factor de emisión medio de 0.5 toneladas CO<sub>2</sub>e/MWh a la estimación de la generación neta de electricidad disponible a la red, basado en información del Programa GHG de México, un programa nacional para reportar las emisiones del país (Programa GEI México, 2013). Estos supuestos son resumidos en el Cuadro 2 abajo.

---

<sup>17</sup> Nótese que los motores no son del mismo tamaño, y por eso la capacidad total no aumenta de manera lineal el número de motores.

<sup>18</sup> Este supuesto es necesario debido a la estructura de SWEET, que no permite modificaciones de año-a-año a la tasa de crecimiento del procesamiento de residuos orgánicos, y estas modificaciones serían necesarios para reflejar el crecimiento al corto plazo y la estabilización al largo plazo del procesamiento de residuos orgánicos.

<sup>19</sup> El factor de conversión (9.6 kWh/m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>) se basa en las características de CH<sub>4</sub> proporcionadas en Andrews y Jelley (2013) y utilizadas en otras herramientas de modelización de residuos de EPA.

<sup>20</sup> Específicamente, utilizamos la información más reciente de Naucalpan, que la planta planea utilizar los motores de biogás J420 de Jenbacher. Aunque la eficiencia eléctrica exacta del motor dependerá de las especificaciones finales del producto, usamos una estimación conservadora de la eficiencia eléctrica del motor de 40.4 por ciento, basada en la información proporcionada por la fabricante (General Electric, 2018).

**Cuadro 2. Supuestos Sobre Generación de Electricidad de Biogás**

	<b>Límite Inferior</b>	<b>Límite Superior</b>
Residuos orgánicos enviados al digestor (toneladas/año)	109,500	146,000
Generación de metano por tonelada de residuos orgánicos (m <sup>3</sup> /tonelada residuos orgánicos)	40.4	40.4
Contenido energético de CH <sub>4</sub> (kWh/m <sup>3</sup> )	9.6	9.6
Eficiencia de conversión eléctrica (% del total de generación de electricidad potencial)	40.4%	40.4%
Electricidad usada por la instalación (% de generación de electricidad bruta)	12%	12%
Pérdidas de electricidad (% de generación de electricidad bruta)	6%	6%
Factor de emisiones promedio en México (toneladas CO <sub>2e</sub> /MWh)	0.5	0.5

Notas: 1. La generación de CH<sub>4</sub> por tonelada de residuos orgánicos es basada en un estudio de UNAM (Mexan, 2017). 2. El contenido energético de CH<sub>4</sub> es basado en las características de CH<sub>4</sub> proporcionadas por Andrews y Jelley (2013). 3. La eficiencia de conversión eléctrica es basada en información de Naucalpan con respecto al tipo de motor. 4. La electricidad usada por la instalación y las estimaciones de las pérdidas de electricidad se basan en información de Naucalpan. 5. El factor de emisiones promedio de México se basa en información del Programa GHG de México (Programa GEI México, 2013).

## 4 Resultados

Esta sección tiene el siguiente contenido:

- Una estimación de reducciones de emisiones para cada una de las fuentes claves de emisiones (desviación de residuos orgánicos del relleno sanitario, desplazamiento de producción de la red eléctrica, funcionamiento de la instalación DA);
- El total estimado del cambio en emisiones que resulta del proyecto propuesto;
- Las limitaciones de nuestro análisis; y
- Una descripción de los co-beneficios que resultan de la construcción de una instalación DA.

### 4.1 Impactos de la Desviación de Residuos Orgánicos en las Emisiones del Relleno Sanitario

Con base en SWEET, estimamos que la desviación de 300 a 400 toneladas de residuos orgánicos de Naucalpan por día (escenarios de límite inferior y límite superior, respectivamente) ayudaría a que la ciudad evite emisiones de aproximadamente 1.07 a 1.43 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e a lo largo de los 20 años de vida del proyecto (Cuadro 3), comparado con el escenario de referencia.<sup>21</sup> Esta cantidad representa una reducción de 23 a 30 por ciento en emisiones del relleno sanitario en comparación con el escenario de referencia.

**Cuadro 3. Cambios en Residuos y Emisiones Comparados al Escenario de Referencia**

	Cambio en Emisiones Per Año (toneladas CO <sub>2</sub> e)		Cambio Total en Emisiones Durante los 20 Años de Vida del Proyecto (toneladas CO <sub>2</sub> e)	
	Límite Inferior	Límite Superior	Límite Inferior	Límite Superior
Residuos Orgánicos Desviados (toneladas)	109,500	146,000	2,190,00	2,920,000
<b>Cambio en Emisiones de CO<sub>2</sub>e (toneladas CO<sub>2</sub>e)</b>	<b>-54,000</b>	<b>-71,000</b>	<b>-1,072,000</b>	<b>-1,429,000</b>

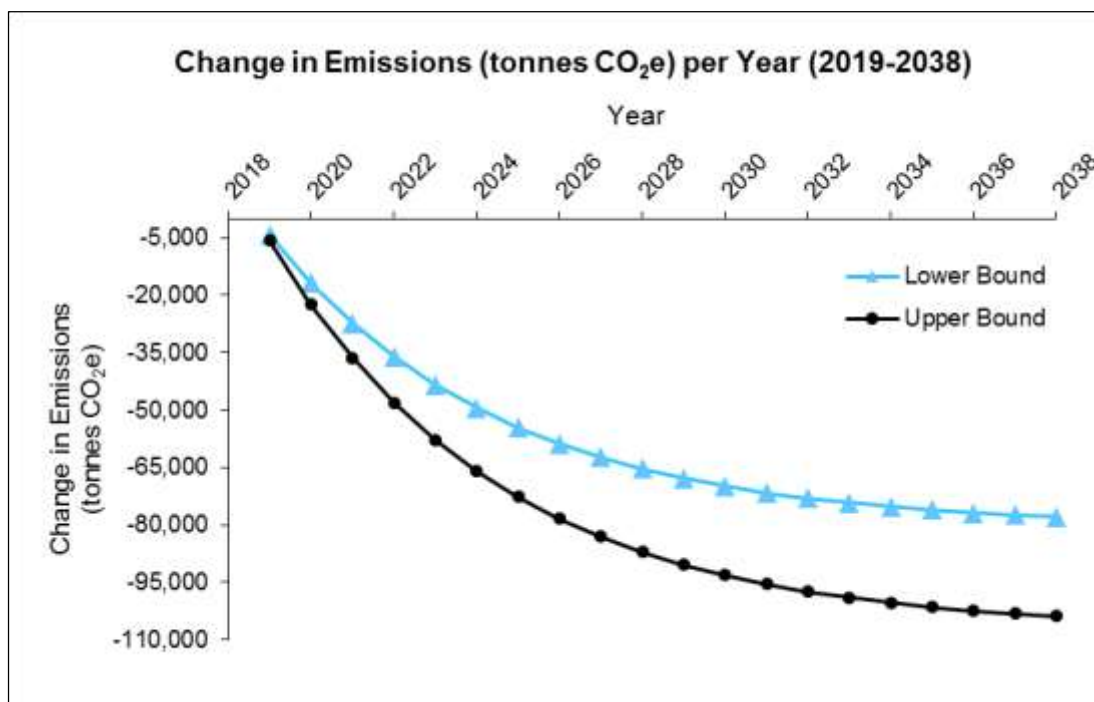
Nota: Los residuos orgánicos desviados refleja 300 toneladas/día o 400 toneladas/día durante un año y durante el periodo de 20 años de 2019 to 2038.

Como se muestra en la Figura 2, las reducciones totales de emisiones no se distribuyen de manera equitativa a lo largo de los años. Los residuos orgánicos depositados en un vertedero generan emisiones de CH<sub>4</sub> durante varios años mientras se descomponen lentamente. Por eso, los residuos desviados al digestor en el primer año de funcionamiento de la instalación DA contribuirán a las reducciones de emisiones no solo en ese año, sino también en años posteriores. La tasa de descomposición de residuos y la generación de CH<sub>4</sub> resultante es una función del tipo de residuos (particularmente su contenido de humedad) y el clima. Esto se describe en más detalle en el Apéndice A. Debido a las tasas a las que se descomponen los

<sup>21</sup> Los resultados asumen que el sitio de disposición final es un tiradero controlado. Véase Apéndice B para más información sobre la diferencia entre un vertedero controlado y un relleno sanitario.

residuos orgánicos, la diferencia entre las emisiones del escenario de referencia y las del escenario del Proyecto DA crece en los primeros años, pero se estabiliza posteriormente (Figura 2).

**Figura 2. Cambio en Emisiones (toneladas CO<sub>2</sub>e) por Año (2019–2038)**



La figura refleja el cambio en emisiones que ocurre en cada año debido al desvío de residuos orgánicos del relleno sanitario. Los triángulos azules representan el límite inferior de desviar 300 toneladas/día al DA, y los círculos negros representan el límite superior de desviar 400 toneladas/día al DA.

## 4.2 Impactos del DA en Emisiones

Usando los supuestos descritos en Sección 3, estimamos que la instalación DA propuesta por Naucalpan tendría una generación de electricidad bruta de 17,200 a 22,900 MWh por año. Con base en la información proporcionada Naucalpan, suponemos de manera conservadora que el 12 por ciento de la electricidad bruta se usará para alimentar la planta de separación, el DA, y la planta CHP. Además, suponemos de manera conservadora que se pierde el 6 por ciento de la electricidad durante la transmisión a la red. Como resultado, estimamos que el procesamiento de 300 a 400 toneladas/día de residuos orgánicos resultarán en última instancia en la cantidad neta de 14,100 a 18,800 MWh/año inyectada a la red, que desplazará una cantidad igual de electricidad de la red. La electricidad neta proporcionada a la red es aproximadamente equivalente a la cantidad de electricidad usada por 6,700 a 9,000 ciudadanos Mexicanos regulares por año (con base en datos del Banco Mundial, 2014). La reducción resulta en emisiones de electricidad evitadas de aproximadamente 7,000 a 9,000 toneladas CO<sub>2</sub>e por año, o 141,000 a 188,000 toneladas de CO<sub>2</sub>e durante la duración del proyecto (2019–2038).

Finalmente, como se mencionó en Sección 3, el funcionamiento del DA también resultará en una cantidad pequeña de emisiones directas. La estimación de reducciones de emisiones fue desarrollada usando SWEET y refleja solo aproximadamente el 40 por ciento del total de las emisiones de electricidad desplazada por la instalación DA. El Cuadro 4 presenta las estimaciones de reducciones de emisiones promedio por año y por la duración total del proyecto (2019 a 2038). Las estimaciones demuestran que el DA puede producir entre 3,000 y 4,000 toneladas de CO<sub>2</sub>e por año.

**Cuadro 4. Producción de Electricidad y Cambios en Emisiones Asociados con la Instalación DA Propuesta**

	Cambio en Emisiones Por Año (toneladas CO <sub>2</sub> e)		Cambio Total en Emisiones Durante los 20 Años de Duración del Proyecto (toneladas CO <sub>2</sub> e)	
	Límite Inferior	Límite Superior	Límite Inferior	Límite Superior
Generación Bruta de Electricidad (MWh)	17,200	22,900	343,100	457,500
Electricidad Neta Proporcionada a la Red (MWh)	14,100	18,800	281,400	375,200
<b>Emisiones de Generación Evitada de Electricidad (toneladas CO<sub>2</sub>e)</b>	<b>-7,000</b>	<b>-9,000</b>	<b>-141,000</b>	<b>-188,000</b>
<b>Emisiones Directas del Funcionamiento del DA (toneladas CO<sub>2</sub>e)</b>	<b>3,000</b>	<b>4,000</b>	<b>55,000</b>	<b>73,000</b>

Notas: 1. La generación bruta y neta de electricidad es redondeada a la centena de MWh más cercano. 2. Los cambios en emisiones de CO<sub>2</sub>e son redondeadas al millar más cercano. 3. Asumimos que el periodo del proyecto es de 20 años (2019–2038). 4. Notamos que el sector de electricidad tiene el potencial de cambiar rápidamente, y por eso nuestra capacidad de predecir la generación y el desplazamiento de emisiones de electricidad en el largo plazo está limitada por la información que tenemos actualmente sobre el sistema eléctrico.

### 4.3 Total del Cambio en Emisiones

La desviación de residuos del relleno sanitario, las emisiones de electricidad de la red evitadas y los ajustes en las emisiones provenientes de la operación del DA pueden reducir las emisiones anuales de Naucalpan en una cantidad de entre 58,000 y 77,000 toneladas de CO<sub>2</sub>e al año, que resulta en un total de emisiones evitadas de entre 1.16 millones y 1.54 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e a lo largo de los 20 años del proyecto (Cuadro 5). Esta reducción es equivalente a evitar la circulación de 12,000 a 16,000 coches por año.<sup>22</sup> La desviación de residuos representa es responsable del 93 por ciento de las reducciones que se lograrían.

Este límite inferior y superior proporciona un rango de reducciones de emisiones esperadas que depende de la cantidad de residuos desviados del vertedero. En realidad, Naucalpan

<sup>22</sup> Valores, determinados con la Calculador de Equivalencia de Gases de Efecto Invernadero de la EPA, fueron basados en las emisiones promedio de CO<sub>2</sub> de la flota de automóviles de pasajeros de los EE.UU. (EPA, 2017a).

pretende empezar a desviar residuos conforme al límite inferior en los primeros años y aumentar esta cantidad conforme la capacidad del digestor crece. Por eso, es probable que Naucalpan alcance el límite inferior de reducciones de emisiones en los primeros años de la duración del digestor y posteriormente logre mayores reducciones de emisiones. Por lo anterior, las reducciones totales de emisiones se encontrarían en algún punto entre el límite inferior y el límite superior.

**Cuadro 5. Total del Cambio en Emisiones que Resulta de la Instalación DA Propuesta**

Fuente de Emisiones	Cambio en Emisiones Per Año (toneladas CO <sub>2</sub> e)		Cambio Total en Emisiones Durante los 20 Años de Duración del Proyecto (toneladas CO <sub>2</sub> e)	
	Límite Inferior	Límite Superior	Límite Inferior	Límite Superior
Desviación de Residuos Orgánicos	-54,000	-71,000	-1,072,000	-1,429,000
Generación de Electricidad Desplazada	-7,000	-9,000	-141,000	-188,000
Emisiones de DA	3,000	4,000	55,000	73,000
<b>Total de Emisiones</b>	<b>-58,000</b>	<b>-77,000</b>	<b>-1,158,000</b>	<b>-1,544,000</b>

Notas: 1. Las estimaciones de reducciones de emisiones han sido redondeadas al millar de toneladas de CO<sub>2</sub>e más cercano. El total de cambios de emisiones ha sido redondeado y por eso es posible que no sea igual a la suma de los componentes. 2. Se supone que el periodo del proyecto es 20 años de 2019 a 2038.

#### 4.4 Limitaciones

Estos resultados son sensibles a varios supuestos y están sujetos a considerables fuentes de incertidumbre. Por ejemplo, nuestra modelación se basa en varios supuestos de los parámetros de los insumos del DA que podrían diferir de las condiciones reales del proyecto. Estos supuestos incluyen los parámetros estimados de la tasa de descomposición de residuos, la tasa de emisiones de CH<sub>4</sub> y las tasas de oxidación del sitio (como se describe en Apéndice A).

Nuestras estimaciones no tienen en cuenta las incertidumbres asociados con condiciones ambientales y socioeconómicas futuras, que incluye cambios en el clima, la población local, emisiones de la red eléctrica nacional, precios y otras variables que afectarán el tipo y cantidad de residuos utilizados en el DA propuesto y por ende, de las reducciones de emisiones resultantes. Por ejemplo, usamos supuestos relacionados a la composición de residuos y la tasa de crecimiento de residuos que reflejan valores históricos. Es improbable que estos valores persistan exactamente como han sido en el pasado. De la misma manera, es posible que cambios en los costos puedan afectar las emisiones. Por ejemplo, si los costos del equipo se redujeran, Naucalpan podría desarrollar su infraestructura DA para procesar más residuos y reducir una mayor cantidad de emisiones. También podría ser que, conforme cambien las condiciones económicas o ambientales, Naucalpan opere el digestor a una capacidad diferente o que altere sus planes con respecto a la escala del proyecto para alcanzar el objetivo del municipio de maximizar las reducciones de emisiones de una forma económicamente viable.

## 4.5 Co-Beneficios del Proyecto DA

El proyecto propuesto generará varios co-beneficios sociales, ambientales y económicos. Los principales co-beneficios son:

- **Reducción de la producción de lixiviado**
  - **Reducción de la contaminación del medio ambiente cercano:** La reducción del contenido orgánico del relleno sanitario también reducirá la cantidad de lixiviado generado y los daños asociados. El lixiviado se genera por la filtración de agua (ej., de la lluvia) que entra en contacto con material orgánico en descomposición. El lixiviado que resulta tiene concentraciones altas de materia orgánica y de contaminantes dañinos, como metales pesados tóxicos. Aun en vertederos como el de Naucalpan que tiene revestimiento, es probable que cierta cantidad de lixiviado se filtre durante episodios de lluvia pesada, contaminando el suelo y agua subterránea. Esto puede generar impactos dañinos en especies acuáticas cercanas y otros animales expuestos a los suelos y aguas contaminadas.
  - **Reducción de costos de gestión de lixiviado:** El control de los lixiviados es caro y puede requerir diferentes tecnologías y enfoques (por ejemplo, sistemas de drenaje, pozos, filtros). Es probable que la disminución de la cantidad de lixiviado disminuya los costos totales de controlar el lixiviado y asegurar su adecuada disposición.
- **Reducción de la ocurrencia de incendios espontáneos:** Una menor cantidad de residuos orgánicos en el tiradero reducirá la generación de CH<sub>4</sub> del relleno sanitario, reduciendo así la probabilidad de incendios espontáneos y también ayudando a estabilizar el relleno sanitario contra posibles deslizamientos de tierra. Por eso, además de los beneficios climáticos de reducir CH<sub>4</sub>, este proyecto puede también mejorar las condiciones de seguridad para los empleados del relleno sanitario y la población que vive cerca del sitio.
- **Reducción de niveles de ozono:** El metano es un precursor del ozono, por lo que reducir las emisiones de CH<sub>4</sub> resultará en el beneficio adicional de reducir los niveles de ozono en la ciudad, con los consecuentes efectos positivos en la salud pública y la economía. El ozono es un irritante respiratorio y es nocivo para los cultivos, ya que reduce su tasa de crecimiento y los hace más susceptibles a enfermedades.
- **Reducción de costos de electricidad:** La instalación DA generará electricidad que se puede usar para reducir la factura eléctrica del municipio. Por ejemplo, Naucalpan estima que la electricidad generada puede reducir hasta en un 80 por ciento su gasto en alumbrado público.<sup>23</sup>
- **Reducciones potenciales de otros contaminantes atmosféricos:** Este proyecto también puede contribuir a la reducción de contaminantes atmosféricos, como óxidos de

---

<sup>23</sup> Esta estimación de la reducción de gastos eléctricos se basa en las calculaciones de la municipalidad, no las calculaciones realizadas por EPA como parte de este análisis.



azufre (SOx), óxidos nitrosos (NOx) y material particulado. Sin embargo, debido a que estos contaminantes son generados principalmente por el transporte y asumimos que el proyecto no conlleva un cambio significativo en el transporte de los residuos, no evaluamos los cambios en las emisiones de estos contaminantes de manera cuantitativa en nuestro análisis.

- **Reducción de emisiones de GHG de la producción de fertilizante químico:** El digestato se puede usar como sustituto de fertilizantes químicos. Producir fertilizantes químicos es un proceso de alto consumo energético. Zhang et al. (2013) sugirió que en Europa, cada tonelada de fertilizante de nitrógeno manufacturada y usada produce 9.7 toneladas de CO<sub>2</sub>e. Este número puede alcanzar 13.5 toneladas de CO<sub>2</sub>e por tonelada de fertilizante de nitrógeno producida en China. Usar digestato puede desplazar emisiones de GHG de la producción de fertilizantes químicos.
- **Reducción de costos de fertilizantes para granjeros:** Generalmente, el digestato tiene un precio más bajo que los fertilizantes minerales u orgánicos, generando beneficios económicos importantes, dado que el fertilizante es frecuentemente uno de los costos más grandes para los agricultores (European Biogas Association, 2015).
- **Reducción de la necesidad de fósforos en la agricultura:** El digestato contiene todos los nutrientes y micronutrientes necesarios para la producción de cultivos y tiene altos contenidos de materia orgánica. Esto reduce la necesidad de aplicar fósforo, un mineral cuyas reservas mundiales están disminuyendo rápidamente. Por eso, sustituir fertilizantes químicos con digestato puede tener impactos positivos a nivel mundial. Además, el municipio puede usar digestato en sus programas de reforestación y enriquecimiento de suelos, así como fertilizante en parques y jardines públicos.
- **Creación de empleo:** En el corto plazo, este proyecto creará múltiples puestos de trabajo temporales durante la construcción del DA. En el largo plazo, también se crearán algunos puestos de trabajo permanentes para operar el digestor.
- **Reducción de olores:** La reducción de residuos orgánicos en el relleno sanitario también reducirá los olores en este sitio, ya que se disminuyen los residuos orgánicos en descomposición y el lixiviado, que produce un olor fuerte.
- **Mejoras estéticas:** La reducción del nivel de residuos que van al relleno sanitario reduce el tamaño y los impactos visuales asociados con el relleno sanitario, reduciendo el impacto estético del relleno sanitario en las áreas aledañas.

## 5 Conclusiones

En México y alrededor del mundo, la sociedad deposita cantidades de residuos significativos en rellenos sanitarios y vertederos, contribuyendo a emisiones de GHG excesivas, especialmente CH<sub>4</sub>. Como se describe más arriba, los sitios de disposición final de los residuos son el tercer factor que más contribuye a las emisiones globales de CH<sub>4</sub>. De hecho, la EPA estima que en 2015, aproximadamente el 15 por ciento de emisiones globales de CH<sub>4</sub> provinieron de RSM, principalmente de relleno sanitarios y tiraderos (EPA, 2018).

Naucalpan ha identificado una oportunidad para reducir las de metano a través de la construcción de un DA. Nuestro análisis de este proyecto propuesto sugiere que la instalación del DA reduciría entre 58,000 a 77,000 toneladas de CO<sub>2</sub>e por año, o entre 1.16 y 1.54 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e a lo largo de la vida del proyecto. Este efecto resulta principalmente de las reducciones de las emisiones del relleno sanitario (93 por ciento de las reducciones totales). Al enviar los residuos orgánicos para ser procesados por el DA en lugar de disponer de ellos en el relleno sanitario, se espera que el proyecto reduzca entre 23 y 30 por ciento las emisiones del relleno sanitario, en comparación con el escenario de referencia.

Reconocemos que, incluso las estimaciones más precisas a futuro retienen un alto grado de incertidumbre. Sin embargo, las estimaciones presentadas en este documento representan la mejor información disponible con base a los planes actuales del proyecto. Este proyecto está encaminado para generar beneficios climáticos significativos para Naucalpan, incluyendo reducciones de más de un millón de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>e. Dadas estas importantes reducciones, este proyecto podría servir como un ejemplo para otras ciudades en todo México y en el mundo que busquen reducir sus emisiones y frenar los efectos del cambio climático.

## 6 Referencias

Andrews, J. and Jelley, N. (2013). *Energy Science: Principles, Technologies, and Impacts* (2nd ed.). Oxford, UK: Oxford University Press.

Climate and Clean Air Coalition Municipal Solid Waste Initiative RSM (2017). Solid Waste Emissions Estimation Tool (SWEET) Version 2.0. Extraído de <http://www.residuos.ccacoalition.org/document/solid-residuos-emisiones-estimation-tool-sweet-version-20>.

EPA (2005). Landfill Gas Emisiones Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. U.S. Environmental Protection Agency. Extraído de <https://www.epa.gov/catc/clean-air-technology-center-products#software>.

EPA (2010). User's Manual: Colombia Landfill Gas Model, Version 1.0. U.S. Environmental Protection Agency. Extraído de <https://www.globalmethane.org/documents/models/pdfs/UsersManualColombiaLFGModelEnglish.pdf>.

EPA (2017a). Greenhouse Gas Equivalencies Calculator. U.S. Environmental Protection Agency. Extraído de <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>.

EPA (2017b). *Waste Characterization Study: City of Naucalpan Transfer Station*. U.S. Environmental Protection Agency.

EPA (2018). Basic Information about Landfill Gas. U.S. Environmental Protection Agency. Extraído de <https://www.epa.gov/lmop/basic-informacion-about-relleno-sanitario-gas#methane>.

European Biogas Association (2015). Digestate Factsheet: the value of organic fertilizers for Europe's economy, society and environment. Extraído de <http://european-biogas.eu/wp-content/uploads/2015/07/Digestato-paper-final-08072015.pdf>.

Forster, P. et al. (2007). Chapter 2: Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York. Extraído de [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html).

General Electric (2018). Jenbacher Type 4 Gas Engines. Extraído de <https://www.gepower.com/gas/reciprocating-engines/jenbacher/type-4>.

GMI (2012). Table 2.1, Chapter 2: Solid Waste Disposal Site Design and Operational Considerations. In *International Best Practices Guide for LFGE Projects*. Global Methane Initiative. Extraído de [http://globalmethane.org/documents/toolsres\\_lfg\\_IBPGch2.pdf](http://globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_IBPGch2.pdf).

Mexan (2017). *Estudio de la situación actual de la generación, gestión, y disposición final de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos*.



Pipatti, R. et al. (2006). Chapter 4: Biological Treatment of Solid Waste. In *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 5: Waste*. Extraído de: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>.

Programa GEI México (2013). Factor de Emisión Eléctrico 2013. Extraído de <http://www.geimexico.org/factor.html>.

SCS Engineers (2009). *Current MSW Industry Position and State-of-the-Practice on LFG Collection Efficiency, Methane Oxidation, and Carbon Sequestration in Landfills*. Extraído de [http://scsengineers.com/wp-content/uploads/2015/03/Sullivan\\_SWICS\\_White\\_Paper\\_Version\\_2.2\\_Final.pdf](http://scsengineers.com/wp-content/uploads/2015/03/Sullivan_SWICS_White_Paper_Version_2.2_Final.pdf).

The World Bank (2014). Electric Power Consumption (kWh per Capita). Extraído de <https://data.worldbank.org/indicator/EG.USE.ELEC.KH.PC?locations=MX>.

Zhang et al. (2013). *New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110(21). Extraído de <http://www.pnas.org/content/110/21/8375>.



## Apéndice A: La Herramienta SWEET

La Iniciativa RSM de la Coalición desarrolló SWEET para apoyar a las partes interesadas a estimar las emisiones de contaminantes climáticos de vida corta del sector de RSM y a comparar los beneficios de reducciones de emisiones de diferentes escenarios de gestión de residuos. La función de la herramienta es informar la toma de decisiones y la definición de prioridades sobre la gestión de RSM, y permite que las ciudades establezcan un punto de referencia y estimen sus emisiones a lo largo del tiempo. Las ciudades pueden examinar sus emisiones bajo un escenario de referencia y hasta cuatro escenarios alternativos.

La herramienta ayuda a los usuarios a elaborar una primera aproximación, a nivel local, de las emisiones anuales de CH<sub>4</sub>, carbono negro, CO<sub>2</sub>, carbono orgánico, óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), PM<sub>2.5</sub>, y PM<sub>10</sub> de las fuentes siguientes:

- Recolección y transporte de residuos
- Quema de residuos (que incluye quema al aire libre y fuegos en relleno sanitarios y tiraderos)
- Relleno sanitarios y vertederos
- Equipo de manipulación de residuos (ej., montacargas, excavadoras)
- Instalaciones para la gestión de residuos orgánicos (ej., instalaciones de compostaje, digestión anaeróbica)
- Equipo para la combustión de residuos (ej., instalaciones de residuos-a-energía)

Para el análisis que realizamos para la ciudad de Naucalpan, nos centramos en cambios en emisiones del vertedero controlado y el digestor anaeróbico de Naucalpan. La herramienta usa datos de un vertedero para calcular las emisiones de CH<sub>4</sub> anuales en el futuro (i.e., hasta 2050) utilizando una metodología desarrollada por la EPA para el modelo de gas de rellenos sanitarios de Colombia, que se describe abajo con más detalle.

Las emisiones de metano de los vertederos se estiman como la cantidad de CH<sub>4</sub> generada, menos la cantidad recolectada o destruida en un aparato de combustión, u oxidada en materiales de recubrimiento. La recolección y medición de las tasas de flujo de metano son el único indicador real de la cantidad relativa de CH<sub>4</sub> que un vertedero genera. Sin embargo, las tasas de emisiones de metano y de oxidación no son directamente medidas en el campo, excepto en algunos sitios de investigación, por lo que las tasas reales de generación de CH<sub>4</sub>, oxidación y emisiones siempre son desconocidas y deben ser estimadas.

La generación de metano se calcula en SWEET usando la ecuación siguiente que es derivada del Modelo de Emisiones de Gas de Rellenos Sanitarios (LandGEM, por sus siglas en inglés) versión 3.02 (EPA, 2005).



**Ecuación A.1. Generación de CH<sub>4</sub> de un Relleno Sanitario**

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n kL_0 M_i (e^{-kt_i}) \text{ (MCF)},$$

$Q_{CH_4}$ =	Tasa máxima de flujo esperada de generación de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /año)	$n$ =	(Año del cálculo) – (año inicial de recepción de residuos)
$i$ =	1-año incremento de tiempo	$k$ =	Tasa de generación de metano (1/año)
$L_0$ =	Capacidad potencial de generación de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /Mg)	$M_i$ =	Masa de residuos sólidos depositados en el año $i$ (Mg)
$t_i$ =	Edad de la masa de residuos $M_i$ depositados en el año $i$	MCF =	Factor de corrección de metano

El metano es generado en un determinado año por los residuos acumulativamente depositados hasta el año anterior, que no han ya descompuesto y generado CH<sub>4</sub>. La tasa de descomposición de residuos y generación de CH<sub>4</sub> se definen como el valor “k” del modelo, que también define la vida media de los residuos. El parámetro k varía significativamente y depende del tipo de residuos orgánicos y el clima, y sobre el cual influye significativamente el contenido de humedad de los residuos. La cantidad total de CH<sub>4</sub> producida por 1 tonelada de residuos es la capacidad potencial de generación de CH<sub>4</sub>, o “L<sub>0</sub>,” que varía según el tipo de residuos orgánicos.

SWEET aplica la ecuación de generación de CH<sub>4</sub> por separado a cada una de las siguientes cinco categorías de residuos orgánicos: comida, plantas, papel (que incluye cartón), madera, y textiles. A cada una de las categorías de residuos orgánicos se le asigna un par de valores diferentes para el k y L<sub>0</sub> que son basados en los valores usados en el modelo de gas de rellenos sanitarios de Colombia, que fue desarrollado por el Programa de Metano de la EPA (EPA, 2010). Este enfoque de múltiples materiales fue desarrollado inicialmente por el IPCC en su modelo de planilla de cálculo (Pipatti et. al., 2006). Los valores k del modelo usados en SWEET para cada categoría de residuos varían por cinco climas, que van desde sitios “muy mojados” que experimentan más que 2,000 mm/año de precipitación a climas “secos” que reciben menos que 500 mm/año de precipitación. La generación total de CH<sub>4</sub> de todos los residuos se calcula como la suma de las cantidades de CH<sub>4</sub> generadas por cada de las cinco categorías de residuos orgánicos.

**A1. Factor de Corrección de Metano**

SWEET también aplica un MCF, que reduce la tasa de generación de CH<sub>4</sub> estimada basada en el grado de condiciones aeróbicas que ocurren (Pipatti et al., 2006). Los rellenos sanitarios no experimentan una reducción de CH<sub>4</sub> estimada (MCF = 1). Los vertederos con una profundidad de más de 5 metros tienen una reducción de CH<sub>4</sub> de 20 por ciento (MCF = 0.8). Los vertederos con una profundidad de 5 metros o menos tienen una reducción de CH<sub>4</sub> de 60 por ciento (MCF = 0.4).



## A2. Oxidación

Las tasas de oxidación de CH<sub>4</sub> no recolectado en el material de recubrimiento de los vertederos dependen del tipo de material de recubrimiento y la profundidad, el clima, y la tasa de flujo de CH<sub>4</sub> al material de recubrimiento por unidad de área. Las directrices del IPCC de 2006 aplican una tasa de oxidación de 10 por ciento para todos los vertederos con material de recubrimiento, pero investigaciones de campo han encontrado que este valor subestima la oxidación en rellenos sanitarios con sistemas de recolección de gas, particularmente cuando los sistemas alcanzan altas eficiencias de recolección (y un bajo flujo de CH<sub>4</sub> hacia el material de recubrimiento) (ej., SCS Engineers, 2009).

SWEET ha modificado el valor predeterminado del IPCC de 10 por ciento para incorporar los efectos de la recolección de gas. Las tasas de oxidación se calculan por medio de las ecuaciones siguientes, que varían según la categoría de vertedero:

- Oxidación en rellenos sanitarios =  $10\% + 15\% \times (\% \text{ eficiencia de recolección})$  que produce un mínimo de 10% y un máximo de 23%.
- Oxidación en vertederos controlados remediados a rellenos sanitarios =  $10\% + 10\% \times (\% \text{ eficiencia de recolección})$  que produce un mínimo de 10% y un máximo de 15%.
- Se estima que la oxidación en vertederos controlados es 0 por ciento sin recolección de gas y 5 por ciento con recolección de gas.
- Se estima que la oxidación en un vertedero (no gestionado) es cero.



## Apéndice B: Características del Vertedero

Para clasificar el tipo de vertedero de Naucalpan, usamos las características explicadas en la *Guía Internacional de Mejores Prácticas para Proyectos de Energía de Gas de Rellenos Sanitarios (International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Project)* de GMI (Cuadro B.1). Nos centramos en las calidades que difieren entre tipos de vertederos y que por ende pueden considerarse como características definitorias, específicamente si el vertedero tiene las siguientes tecnologías y condiciones sociales:

- Sistema de recolección de gas
- Revestimiento
- Sistema para canalizar los escurrimientos pluviales
- Sistema para monitorear los flujos de agua
- Pепенadores o recolectores informales en el sitio<sup>24</sup>

Aunque el vertedero de Naucalpan cumple con algunos requisitos de un relleno sanitario conforme a los estándares de GMI (tiene revestimiento y no hay recolectores informales dentro del sitio), carece de un sistema de recolección de gas y un sistema para monitorear los flujos de agua y sólo canaliza parcialmente el agua hacia afuera del vertedero. Debido a que no cumple con todas las características de un relleno sanitario, consideramos que el vertedero de Naucalpan es un vertedero controlado para los fines de este análisis.

**Cuadro B.1. Comparación de Vertederos de Residuos**

Factor	Vertedero	Vertedero Controlado	Relleno Sanitario
<b>Factores Ambientales</b>			
<b>Atmósfera</b>			
Incendios	Los incendios intencionales son comunes	Limitados, pero pueden presentarse	Improbables
Emisión de Gases Peligrosos	Sí, si no existe un sistema de recolección	Sí, si no existe un sistema de recolección	Sí, si no existe un sistema de recolección
Recolección y control de gas de rellenos sanitarios (LFG, por sus siglas en inglés)	Posible, pero se espera una baja eficiencia de recolección	Probable, la eficiencia de recolección depende de las condiciones del sitio	Probable
Olores desagradables	Sí	Posible, depende de las condiciones del sitio y si el LFG es controlado	Mínimos, si se toman las medidas correctas para cubrir los residuos y controlar el LFG
<b>Suelo/Tierra</b>			
Modificación Topográfica	Sí	Sí	Sí
Contaminación (lixiviado)	Sí	Posible, depende de las condiciones de base y revestimiento	No

<sup>24</sup> Nótese que los trabajadores extraen materiales reciclables y re-vendibles de camiones y potencialmente del sitio antes de que los residuos vayan a la planta de separación. Sin embargo, suponemos que estas personas no extraen residuos después de que los residuos han sido depositados en el vertedero.



**Cuadro B.1. Comparación de Vertederos de Residuos**

<b>Factor</b>	<b>Vertedero</b>	<b>Vertedero Controlado</b>	<b>Relleno Sanitario</b>
Migración de Gas	Sí	Posible, depende de las condiciones del sitio	No
<b>Agua (superficial y subterránea)</b>			
Canalización de escurrimientos	No	Posible, depende de las condiciones del sitio	Sí
Contaminación	Probable del agua superficial y subterránea	Posible si no se usan revestimientos de baja permeabilidad	Mínima
Sistemas de monitoreo presentes	No	No	Sí
<b>Flora</b>			
Alteración de la cobertura vegetal	Sí	Sí	Sí
<b>Fauna</b>			
Cambios en la diversidad	Probable	Sí	No
Control de Vectores	No	Potencialmente, depende de las condiciones del sitio	No
<b>Factores Socioeconómicos</b>			
<b>Paisaje</b>			
Modificación de Condiciones	Sí	Sí, se puede mitigar con amortiguamiento visual (ej., un bosque)	Sí, se puede mitigar con amortiguamiento visual (ej., un bosque)
<b>Humano</b>			
Peligros para la Salud	Sí	Potencialmente, depende de las condiciones del sitio	Potencialmente, depende de las condiciones del sitio
Imagen Negativa	Sí	Sí	Sí, mejorada si hay utilización del área después de la clausura
Educación ambiental	No	Sí, en algunos casos	Sí, con planificación cuidadosa
<b>Economía</b>			
Pérdida de Valor del Suelo	Sí	Sí	Sí
Empleo Formal	No	Sí	Sí
Cambios en el Uso del Suelo	Sí	Sí	Sí
<b>Social</b>			
Recolectores informales	Sí	Sí, en algunos casos	No

Fuente: GMI (2012).