

Reporte de emisiones del Sitio de Disposición Final "Relleno Sanitario San Mateo" y evaluación de tratamiento de residuos orgánicos por medio de Digestión Anaeróbica

Diciembre 2023



WASTEMAP



SOLUCIONES INTEGRALES PARA LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

Reporte de emisiones del Sitio de Disposición Final “Relleno Sanitario San Mateo” y evaluación de tratamiento de residuos orgánicos por medio de Digestión Anaeróbica

Diciembre 2023



WASTEMAP



El presente reporte fue preparado por Soluciones Integrales para la Problemática Ambiental (SIPRA) para el H. Ayuntamiento de Naucalpan, como parte del proyecto Waste Methane Assessment Platform (Waste MAP) en México de Clean Air Task Force (CATF) junto con RMI y con financiamiento del Global Methane Hub.

SIPRA

Nadya Selene Alencastro Larios
Gustavo Solorzano Ochoa
Eduardo Parra Ramos
Jesús Israel Campos Hueso

General

Acrónimos y glosario	4
Resumen Ejecutivo	5
Introducción	7
Descripción del sistema de manejo de residuos del municipio	10
Metodología	12
Visión general de la metodología aplicada	13
Descripción de BAU y escenarios alternativos conforme a BAU	14
Descripción de las emisiones generadas en SDF San Mateo mediante SWEET	15
Descripción de escenarios alternativos en SWEET	16
Descripción del potencial de reducción de emisiones basadas en la habilitación de un sistema de DA con base en ADST	19
Vínculo entre las herramientas SWEET y ADST	20
Escenarios con Digestión Anaeróbica- SWEET	20
Escenarios con Digestión Anaeróbica – ADST	21
Incorporación de ADST en SWEET	21
Resultados y discusión	22
Resultados obtenidos con SWEET	22
Resultados obtenidos de AD Screening Tool	29
Conclusiones	34
Referencias	36
Anexo A: Modelo SWEET	38
Anexo B: AD Screening Tool	47
Anexo C: Comparación de la composición de residuos del municipio de Naucalpan 2017-2023	49
Apéndice D: Caracterización de residuos general	51

ACRÓNIMOS Y GLOSARIO

°C	Grados centígrados
ADST	Herramienta de Detección de Digestión Anaeróbica (por sus siglas en inglés)
Anaerobio	Que se desarrolla en ausencia de oxígeno
Biogás	Gases producidos por la fermentación anaerobia de residuos orgánicos, principalmente metano
BAU	Línea base (Business-as-usual, en inglés)
BC	Black Carbon (carbono negro, en inglés)
DA	Digestión anaerobia
GEI	Gases de efecto invernadero
GRS	Gas de relleno sanitario
CATF	Fuerza de Trabajo para el Aire Limpio (por sus siglas en inglés)
CCAC	Coalición Clima y Aire Limpio (por sus siglas en inglés)
CEMDA	Centro Mexicano de Derecho Ambiental
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente; medida universal del poder contaminante de los GEI en referencia al CO ₂ como unidad
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
Digestato	Material que queda después de la fermentación anaerobia
FO	Fracción orgánica
NDC	Contribución Nacionalmente Determinante (por sus siglas en inglés)
ONU	Organización de las Naciones Unidas
O ₃	Ozono
PM	Material particulado (por sus siglas en inglés)
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas por el Medio Ambiente
RADA	Residuos aptos a Digestión Anaerobia
RSU	Residuos Sólidos Urbanos
RME	Residuos de Manejo Especial
SDF	Sitio de Disposición Final
SWEET	Herramienta de Estimación de Emisiones de Residuos Sólidos (por sus siglas en inglés)
Ton CO ₂ e	Toneladas de dióxido de carbono equivalente. Hace referencia al poder contaminante de los GEI según 1 ton de CO ₂
USEPA	Agencia de Protección de Estados Unidos de América (por sus siglas en inglés)

RESUMEN EJECUTIVO

Los gases de efecto invernadero (GEI) producto de la operación previa y actual del sitio de disposición final (SDF) “San Mateo”, ubicado en el municipio de Naucalpan de Juárez en el Estado de México, representan el 3.9% de los gases contaminantes en sitios de disposición final (SDF) en el país. Entre los principales GEI se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), carbono negro (BC) y carbono orgánico.

El SDF San Mateo recibe alrededor de 616.91 toneladas diarias de residuos sólidos urbanos provenientes del municipio de Naucalpan. Según el estudio realizado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2021), se emitieron 29 millones de toneladas de CO_2 equivalente (CO_2e) provenientes de sitios de disposición final en México en el año 2019, de los cuales aproximadamente 0.30% aporta el SDF San Mateo¹.

El objetivo de este trabajo es analizar las emisiones de GEI producidas en el SDF “San Mateo” mediante la Herramienta de Estimación de Emisiones de Residuos Sólidos (SWEET en inglés) y la Herramienta de Proyección de Digestión Anaeróbica (ADST en inglés) durante los periodos:

- 1) Donde se depositaron residuos sólidos urbanos (RSU) y de manejo especial (RME) de manera clandestina de 1976 al 2006 (SDF 1).
- 2) Sitio de operación oficial actual y cierre previsto en el corto plazo donde se depositan los RSU -del 2006 al 2026- (SDF 2) con la instalación de pozos de venteo con quema de biogás² en el sitio y una propuesta para la desviación de residuos aptos a digestión anaerobia (RADA) a partir del 2024.
- 3) Del 2027 al 2100, al contar con sistema de extracción de gas activa y quema de biogás, simulando los contaminantes que se siguen emitiendo en el sitio tras la clausura (SDF 3).
- 4) Del 2027 al 2100 (SDF 4) se considera la apertura de una nueva celda para el depósito de los residuos en el cual existirá una desviación de RADA a Digestión Anaerobia (AD) y un sistema de captura activa de metano y aprovechamiento desde el 2028.

El primero simula la emisión de GEI del antiguo vertedero que se manejó de manera clandestina; el segundo considera el SDF “San Mateo” con quema del biogás (GEI) en los pozos de venteo a partir del 2018, y una desviación de RADA a partir del año 2024. El tercero considera las mismas situaciones del segundo, con una disposición anual de 33,775 toneladas métricas, con desviación de RADA a partir del 2027 y captura activa y quema de biogás en ese mismo año.

1 Datos comparados con las emisiones de ton CO_2e simulados por en SWEET en el mismo año.

2 La instalación asume el 10% de eficiencia en la captura y quema “pasiva” del biogás desde los pozos de venteo existentes en el SDF San Mateo, de acuerdo con criterio técnico de la empresa consultora y CATE.

Finalmente, el cuarto incorpora una estimación de la generación de biogás y recuperación de metano para aprovechamiento a partir de la disposición final del 20%, y el 50% de RADA en la celda y con ADST. Lo anterior se realiza con el propósito de evaluar las medidas de mitigación simuladas en el SDF para reducir las emisiones de GEI y plantear alternativas para mejorar su gestión ambiental (ver [Tabla 3](#)).

Específicamente, para los SDF 2, 3 y 4 se consideran bajo 4 escenarios alternativos donde se simula una desviación de RADA desde el 2027 ([Tabla 3](#)). El escenario 1 con una desviación de RADA baja (50 % de desviación) y 52,915 ton/año. El escenario 2 con una desviación de RADA alta (80 % de desviación) y 84,665 ton/año. El escenario 3 con desviación alta (80 %) de RADA y con captación y aprovechamiento de metano. El escenario 4 con desviación baja (50 %) de RADA y con captación y aprovechamiento de metano ([Tabla 6](#)).

Este reporte evaluó la reducción de contaminantes por la desviación de RADA en varios escenarios de gestión de residuos en el SDF. El escenario 3 logró la mayor reducción de contaminantes, con 2,574,341 toneladas métricas de CO₂e en 26 años (2024-2050), con una desviación de RADA del 80% en 2024 y la instalación de un sistema de captura activa de biogás y aprovechamiento de metano en 2027 proveniente del 20% no desviado en la celda (SDF 4). Por otro lado, el escenario 1, con una desviación de RADA del 50% en 2024 y la quema de biogás mediante pozos de venteo, en el sitio, obtuvo la menor reducción, con 1,405,054 toneladas métricas de CO₂e en el mismo período de 26 años.

Además, se simuló la producción de biogás en ADST con 80% y 50% de RADA por DA a 15°C (promedio de temperatura de Naucalpan), resultando en 199,830 m³/año de biogás y 99,715 m³/año de metano (80% RADA), y 124,894 m³/año de biogás y 62,322 m³/año de metano (50% RADA). El metano depurado puede generar 1,198 MWh de electricidad, el biogás 810 MWh de electricidad, suficiente para cocinar en 2,281 hogares o brindar calefacción 1,711 hogares al año. Si se incrementa la temperatura del digestor a 30-40°C, la producción de biogás puede aumentar entre 3,408% y 6,210%.

INTRODUCCIÓN

Cada año en el mundo se estima que se recolectan aproximadamente 11.200 millones de toneladas de residuos sólidos (ONU, 2023). Los residuos son la tercera fuente antropogénica de metano (UNEP & CCAC, 2021), y en específico, los residuos sólidos representan el 11% de las emisiones de metano a nivel mundial (Global Methane Initiative, 2023) y su fuente principal es la descomposición de la materia orgánica en sitios de disposición final (SDF).

En particular, el metano (CH_4) es uno de los compuestos más importantes en el aumento de la temperatura global, contaminación atmosférica y el cambio climático, con un potencial de calentamiento global al menos 80 veces mayor³ que el dióxido de carbono durante su tiempo de vida atmosférico, y siendo responsable por el aumento global de 0.5°C (IPCC, 2021).

Reducir las emisiones de CH_4 es una de las vías más eficientes que se tiene para frenar el cambio climático y sus impactos, según evaluaciones realizadas por la Coalición Clima y Aire Limpio (CCAC) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Si se logra reducir en 45% las emisiones de metano causadas por el hombre en la siguiente década, se evitaría el aumento promedio de la temperatura global en 0.3°C para el 2045, contribuyendo a las metas globales establecidas en el Acuerdo de París, el cual limita el aumento de la temperatura global en 1.5°C. (ONU, 2021).

El sector de residuos⁴, contribuye en un 7.37% del total de las emisiones de CO_2e del país, con una emisión anual de 3.47 ton CO_2e per cápita y el gas metano es responsable del 24% de los GEI nacionales. Adicionalmente, el metano es el gas más relevante en dicho sector con un 93.01% de participación, este es producido en buena parte por la eliminación de residuos y el tratamiento y eliminación de aguas residuales. (Gobierno de México, 2022).

Por otra parte, en el país el 53.50% de las emisiones generadas por el sector residuos corresponden a la categoría de “eliminación”, de dicho porcentaje el 48.87% corresponde a las emisiones de rellenos sanitarios, el 32.80% a tiraderos a cielo abierto, y sitios no controlados con 18.33% (Gobierno de México, 2022).

3 Cuenta con una persistencia atmosférica de 12 años y tiene un potencial de calentamiento global 27-30 mayor al CO_2 (EPA, 2023), en términos prácticos es 80 veces más potente como impulsor del calentamiento global (GMH & CATF, 2023), además es precursor del ozono (O_3) (principal componente del smog), su quema produce carbono negro, compuestos orgánicos volátiles (COV) y material particulado ($\text{PM}_{2.5}$) (CEMDA, 2018).

4 De acuerdo con el IPCC, el sector residuos comprende: 1) Eliminación de residuos 2) Tratamiento biológico de residuos sólidos 3) Incineración y quema a cielo abierto de residuos 4) Tratamiento y eliminación de aguas residuales.

A nivel nacional, el porcentaje de la parte orgánica de los residuos puede ir desde un 40.32% hasta un 53.46%. Evaluado los casos de municipios con más de 100 mil habitantes la generación de residuos orgánicos⁵ resulta en 47.01% (DBGIR, 2020).

En el año 2022, México actualizó la NDC en el marco de la COP27 comprometiéndose a cumplir la meta de reducir de un 22 a 35% sus emisiones de GEI con respecto a su línea base y en un 51% las de carbono negro para el 2030 (SEMARNAT & INECC, 2022), para lograr el cumplimiento de estas se consideran 4 medidas relacionadas a los residuos (SEMARNAT & INECC, 2018):

Medidas condicionadas:

- Reducción de emisiones de metano en rellenos sanitarios por captura y quema de biogás, aportando el 96% de la mitigación esperada.
- Cero quemas de residuos sólidos urbanos RSU a cielo abierto que equivale al 4% de la reducción.

Medidas no condicionadas:

- Cero emisiones de metano y generación eléctrica en ciudades con población mayor a 50,000 habitantes.
- Aumento de la eficiencia y el aprovechamiento de CH₄ en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales.

Para el 2030, se estima que como resultado de la captura del biogás en rellenos sanitarios y su aprovechamiento en la generación de energía, el sector tiene un potencial de reducción de 13.82 millones de ton CO₂e. Adicionalmente, se tienen compromisos internacionales específicos, como la Cumbre de líderes de América del Norte, donde México se comprometió a reducir las emisiones de metano del sector de residuos sólidos y aguas residuales en al menos un 15% para 2030 con respecto a los niveles de 2020 (Whitehouse, 2023).

Según datos presentados en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos, más de 77% de los residuos podrían ser aprovechados (compuestos en un 46.42% por residuos orgánicos y en un 31.55% inorgánicos susceptibles de aprovechamiento). Se estima que en México 56,427 ton/día de residuos orgánicos pueden ser tratados mediante compostaje o biodigestión (SEGOB, 2022). Sin embargo, sólo 6.2% son recolectados separadamente y tratados en 19 plantas de compostaje y 5

⁵ El DBGIR considera como residuos orgánicos: cuero, fibra dura vegetal, hueso, madera, residuos alimentarios y residuos de jardinería.

plantas de biodigestión. (DBGIR , 2020). Además, únicamente el 9.7% de los SDF del país cuentan con la infraestructura necesaria para la captura activa de biogás⁶ (SEGOB, 2022).

La generación promedio per cápita RSU en el país asciende a 0.653 kg/hab/día y para la zona centro del país (donde se encuentra Naucalpan de Juárez), este dato corresponde a 0.588 kg/hab/día (DBGIR , 2020).

Los residuos orgánicos y su incorrecta gestión, son una fuente significativa de diversos contaminantes, especialmente de metano y carbono negro; sin embargo, la digestión anaeróbica (DA) es un proceso natural por el cual diferentes tipos de bacterias anaeróbicas producen biogás y digestato (GIZ, 2018), mismos que pueden ser utilizados para la generación de energía y mejoradores de suelo, además, este proceso brinda beneficios ambientales y a la salud pública, ya que permite utilizar los residuos orgánicos como materia prima para la creación de energía, reduce malos olores y destruye patógenos. (Global Methane Initiative, 2022)

En la [Ilustración 1](#), se muestra el proceso por el cual pasan los residuos orgánicos (biomasa) para la producción de biogás, mediante tecnología de biodigestión seca.

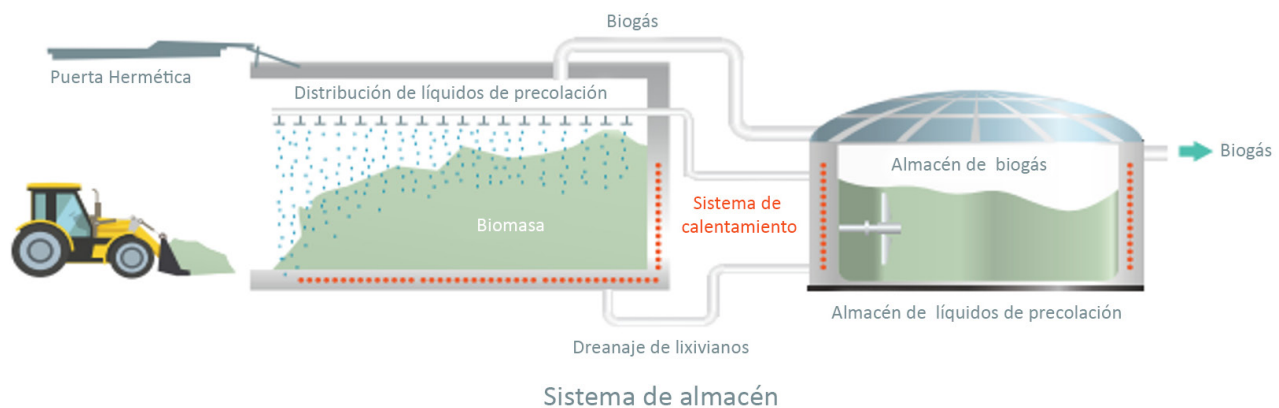


Ilustración 1 Tecnología de biodigestión seca (GIZ, 2018)

El municipio de Naucalpan de Juárez desde el 2016 ha sumado esfuerzos en conjunto con entes como la Agencia de Protección de Estados Unidos de América (USEPA, por sus siglas en inglés) y

⁶ A nivel nacional existen 2,203 SDF ubicados en 1,722 municipios de prácticamente todas las entidades federativas, a excepción de Ciudad de México. Si bien no se cuenta con información precisa sobre el número de sitios que cumplen con la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, se estima que sólo el 14.8% de estos cuentan con geo-membrana, 16.30 % con infraestructura para la captura de lixivianos y el 9.7 % posee infraestructura para la captura de biogás.

actualmente con el Clean Air Task Force (CATF), con el objetivo de incorporar a su manejo actual de residuos orgánicos la digestión anaerobia. Si dichos esfuerzos lograran concretarse, se tendría una reducción considerable de emisión de CH₄ provenientes en la actualidad del Sitio de Disposición Final (SDF) “San Mateo”. (Abt Associates , 2018)

A fin de dimensionar el potencial de captura de metano del SDF y el potencial de generación de biogás mediante una planta de digestión anaerobia en el mismo, se realizó el estudio de caracterización y el presente análisis de emisiones GEI.

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE MANEJO DE RESIDUOS DEL MUNICIPIO

Se estima que en el Estado de México se generan 16,739 ton/día de RSU, de las cuales 12,409 ton/día son recolectadas (DBGIR, 2020). Naucalpan de Juárez cuenta con el 5.21% de la población del Estado⁷, y es responsable en gran medida de la generación de residuos a nivel estatal, dato ligado principalmente a la densidad poblacional.

Resultado del estudio de cuantificación y caracterización de residuos del municipio de Naucalpan de Juárez⁸, realizado en mayo del 2023 por parte de SIPRA, se estima que se depositan aproximadamente 616.91 ton de RSU al día en el relleno sanitario de San Mateo, de los cuales el 47%⁹ son orgánicos. Adicionalmente, con base en la información histórica brindada por la Coordinación de Disposición Final de RSU del municipio, se sabe que en el año 2022 ingresaron al relleno sanitario San Mateo 173,555 toneladas¹⁰, esto representa un aproximado de 554.5 ton/día.

La [Tabla 1](#) en la se muestra una comparación de las diferentes estimaciones de la generación de residuos del municipio a lo largo del tiempo y de acuerdo con la densidad poblacional.

7 El último censo poblacional fue realizado en el año 2020 y se estimó que Naucalpan en dicho año corresponde a 5.21% de la población estatal, sin embargo, para las estimaciones de este estudio se utilizó la estimación poblacional del año 2023, la cual corresponde 934, 557 personas (COESPO, 2019).

8 Este se encuentra basado en los residuos entrantes al SDF “San Mateo”.

9 Residuos alimenticios, residuos verdes (excepto municipales), madera, papel y cartón.

10 El SDF “San Mateo se encuentra abierto de lunes a sábado, por lo que para dicha estimación se toman en consideración 313 días de operación.

Tabla 1. Comparación de generación de residuos de Naucalpan de Juárez (2015, 2022 y 2023)

Año	Población	Generación anual (ton/año)	Generación de residuos per cápita (kg/día)
2015	844,219	492,000	1.60 *
2022	925,411	173,555	0.60
2023	934,557	192,476	0.66

**Nota: la generación per-cápita fue tomada corresponde a la empleada en el estudio de Mexan, 2017.*

Fuente: Elaboración propia con base en datos de (Mexan , 2017), Coordinación de Disposición Final de RSU de Naucalpan de Juárez y (SIPRA , 2023)

El terreno, donde ahora es el SDF San Mateo, se utilizaban como vertedero de basura desde 1976; sin embargo, este no contaba con administración, ni control. Durante el año del 2006 el SDF comenzó formalmente operaciones de acuerdo con las regulaciones pertinentes (NOM-083-SEMARNAT-2003) y sistemas tecnificados con una vida útil de 20 años; se prevé que en el año 2026 se clausure oficialmente la celda donde actualmente se depositan los residuos, y se apertura una nueva celda (predio contiguo) a partir del año 2027.

En el año 2006 se le dio se dio la concesión a la empresa SETASA, y fue hasta el 2018 cuando se le otorgó concesión del SDF a la empresa BIOMERIK. Cabe aclarar que durante los años 2016-2018 se desviaban los residuos a otros SDF por medio del Centro de Transferencia de Naucalpan (CETRAN) debido al cierre temporal del SDF.

El sitio opera de lunes a sábado, y el promedio de profundidad de los residuos es de 30 metros. En el año 2018, se puso en marcha un sistema de extracción, captación, conducción y quema de biogás en el SDF en los pozos de venteo, según lo estipula la norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003¹¹ (SEGOB, 2004), la cual establece la obligatoriedad de quema de biogás, (sin aprovechamiento) y no se cuenta con registro de las cantidades de biogás que están quemando en los pozos de venteo¹².

Por otra parte, el servicio de recolección de RSU es brindado por el gobierno municipal, el cual cuenta con 154 vehículos para desarrollar dichas actividades, siendo que la cobertura de recolección

11 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.

12 Información obtenida por medio de una entrevista con la coordinadora de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos. Deyanira Escobedo Ortiz.

se encuentra en un rango de 74-100%, según la información recopilada en la presente consultoría (Servicios Públicos, 2023).

En cuanto a la composición de residuos, se utilizaron los registros obtenidos del estudio realizado en el 2023 por SIPRA (referidos en la [Tabla 21](#)), para las estimaciones de reducción de emisiones en caso de contar con un sistema de DA, así como la estimación de biogás y digestato¹³, y que se abordan en las siguientes secciones.

Con base en la información referida es relevante mencionar que las categorías susceptibles a DA corresponden al 47%¹⁴, comprendiendo: residuos de comida, residuos verdes, papel y cartón, y madera (ver [Tabla 22](#) del Apéndice D para mayor detalle), siendo los residuos de comida, la corriente más importante con alrededor de 23%.

Existe divergencia en la cantidad de generación de residuos presentadas en los estudios desarrollados en los últimos años para Naucalpan (Mexan, 2017 y SIPRA, 2023), principalmente debido a que dichas estimaciones fueron realizadas bajo distintas circunstancias. En el 2017, las muestras fueron colectadas en el Centro de Transferencia de Naucalpan (CETRAN) que hoy en día no se encuentra en funcionamiento (resultando en una generación equivalente a 1,347.87 ton/día de RSU). la actualización del 2023 obtuvo las muestras directamente de los vehículos una vez que entran al SDF. Las variaciones también se observan en la composición de las muestras de los estudios de caracterización del 2017 y 2023; destacando las diferencias en la cantidad de residuos de comida. En el primero se registró un 30.9% y en el más reciente un 22.33%; la diferencia de la cantidad de papel pasó del 12.2% al 1.03%, y la categoría Otros de 4.8% a 11.27% por mencionar algunos¹⁵.

METODOLOGÍA

En esta sección se encuentra descrita la siguiente información:

- Visión general de la metodología aplicada.
- Descripción de BAU y escenarios alternativos conforme a BAU.
- Descripción de las emisiones generadas en el SDF San Mateo, estimadas mediante la Herramienta de Estimación de Emisiones de Residuos Sólidos (SWEET).

13 Para más detalles favor de consultar la [Tabla 21](#) en [Anexo C](#) donde se muestran la composición de las muestras para ambos estudios.

14 Residuos de comida, residuos verdes (excepto municipales), papel y cartón, y madera.

15 Para más información revisar la [Tabla 21](#) del [Anexo C](#): Comparación de la composición de residuos del municipio de Naucalpan 2017-2023.

- Descripción del potencial de reducción de emisiones basadas en la habilitación de un sistema de DA con base en la Herramienta de Proyección de Digestión Anaeróbica (ADST).
- Vínculo entre las herramientas SWEET y ADST.

Visión general de la metodología aplicada

Para la estimación de las emisiones GEI generadas en el SDF San Mateo, se utilizó la herramienta SWEET; y para la estimación de generación de biogás y digestato, el aprovechamiento de RADA y sus posibles usos, se utilizó la herramienta ADST.

La herramienta **SWEET** está diseñada para calcular las emisiones de GEI de los sistemas de manejo de residuos¹⁶, y fue desarrollada por la USEPA. La versión utilizada para el desarrollo del presente reporte es la 4.0.2 (de julio, 2022). Dicha herramienta es capaz de estimar la emisión de GEI de los residuos depositados en el SDF durante el lapso en el cual se encuentre operativo. Esta considera un escenario inicial o base (BAU), el cual establece el funcionamiento de la disposición del manejo de residuos de Naucalpan de Juárez. Los escenarios alternativos son simulaciones de emisiones de GEI por acciones que se podrían implementar para la gestión integral de residuos sólidos municipales que difieren de la operación vigente.

Por otra parte, la versión empleada de la herramienta **ADST** fue la 2.2 (marzo 2022) y se utilizó para realizar una estimación preliminar del volumen del biogás generado por digestión anaerobia de RADA en el SDF San Mateo. Se realizaron 2 simulaciones en la herramienta de una producción de biogás proveniente del 50 y 80% de la FO de RSU desviados a DA. La herramienta también fue utilizada para estimar la generación de biogás de la parte no desviada de los RADA (50 y 20%), y que continuarían colocándose dentro de la celda en el SDF San Mateo; con la finalidad de comparar la reducción de emisiones GEI de poder aprovechar el biogás generado por la FO de RSU no desviada dentro de la celda.

Cabe aclarar que ADST simula el biogás en un biodigestor, el cual produce 6.4 veces más biogás comparado que una celda de un relleno sanitario (UNDP, 2019). Por lo que se simuló en ADST dos corridas, aplicando un factor de 6.4 veces menos el 50 % y 20% del biogás de los RADA no desviados¹⁷.

16 Generación de residuos, recolección, incineración, disposición final y las generadas por los equipos de manejo en el SDF.

17 Para más información detallada consultar la [Tabla 20](#) del [Anexo B](#).

■ Descripción de BAU y escenarios alternativos conforme a BAU

La línea base o BAU refleja la gestión de residuos en Naucalpan con pozos de venteo y quema de biogás en 2018¹⁸, y sin la implementación de un sistema de DA. Según el estudio de caracterización más reciente ingresan al SDF 616.91 ton/día (SIPRA, 2023), y se considera que esta generación aumenta con una tasa del 2%¹⁹. Algunos de los supuestos considerados para este escenario se encuentran enlistados a continuación:

- La población corresponde a las estimaciones para el año 2023 (934,557 personas). (COESPO, 2019)
- No existe población fuera de las zonas de recolección, por lo tanto, la cobertura es igual al 100% de atención.
- No existe ningún tipo de aprovechamiento de los residuos que llegan a SDF.
- Se considera la composición de residuos presentada en la [Tabla 2](#).

Las categorías presentadas en el estudio de caracterización de residuos del municipio de Naucalpan (SIPRA, 2023) fueron adaptadas a las necesidades de los requerimientos de información del modelo SWEET (representadas en la [Tabla 2](#) mientras que las subcategorías que las componen se pueden apreciar en la [Tabla 22](#)).

Para la estimación de la emisión de contaminantes se reagruparon las subcategorías del estudio “hueso” en residuos de comida, “cuero” y “hule” en la categoría de textiles, “algodón” en la categoría de residuos verdes, y “electrónicos” y “peligrosos” en la categoría de “otros”, tanto para SWEET como para ADST²⁰.

18 Debido a que la quema de gas proveniente de pozos de venteo no representa una combustión continua, ni eficiente, se ajustó el porcentaje de eficiencia a un 10% (con base en la experiencia del equipo consultor) en el modelo SWEET de manera manual.

19 Con base en las consideraciones del estudio (Abt Associates, 2018).

20 Revisar la [Tabla 22](#) del [Anexo D](#) para más información.

Tabla 2. Composición promedio de los residuos recolectados

Categoría ²¹	Porcentaje (%)
Residuos de comida	23
Residuos verdes	15
Madera	1
Papel/cartón	8
Textiles	7
Plástico	12
Metal	2
Vidrio	3
Neumáticos	5
Otros	24
TOTAL	100

Fuente: (SIPRA , 2023)

■ Descripción de las emisiones generadas en SDF San Mateo mediante SWEET

Debido a las alternativas de disposición final que se han operado a lo largo del tiempo para el municipio, se colocaron dentro de la herramienta diferentes SDF con la finalidad de representar la emisión de GEI de cada uno de esos períodos de operación. Los diversos períodos de disposición final para el Municipio de Naucalpan son:

- La primera simulación del SDF corresponde al antiguo vertedero (anterior al inicio del sitio de manera tecnificada).
- La segunda simulación del SDF corresponde a la apertura y cierre oficial de la celda actual donde se depositan los residuos en el relleno sanitario “San Mateo”

21 Estas categorías son las estipuladas por la herramienta SWEET, sin embargo, si se requiere conocer las subcategorías que fueron reagrupadas dentro de estas con respecto al estudio (SIPRA , 2023) consultar la [Tabla 22](#) del [Anexo D](#).

- La tercera simulación del SDF corresponde a la misma celda que la segunda, esto con el propósito de simular los contaminantes que la celda actual sigue generando en un futuro a pesar de haber sido clausurada²².
- La cuarta simulación del SDF corresponde a una nueva celda abierta, con mejor tecnología adecuada a un relleno sanitario²³.

En la herramienta se consideran 4 tipos de SDF correspondientes a cada periodo ([Tabla 3](#)). El **SDF 1** es considerado como *vertedero*, sin desviación de RADA y corresponde al sitio previo a la operación tecnificada de “San Mateo” desde 1976 hasta 2006; el **SDF 2** es considerado como *vertedero controlado*, iniciando operaciones más tecnificadas desde 2006 y con quema de biogás de los pozos de venteo en 2018²⁴ y considera una desviación de RADA desde el 2024, finalmente se prevé el cierre en el año 2026 (Servicios Públicos, 2023). El **SDF 3** es considerado como *relleno sanitario* con captura activa de biogás en 2027²⁵, y desviación de RADA desde 2027. El **SDF 4** considerado como *relleno sanitario* con captura activa de biogás²⁵ y aprovechamiento de metano en 2027, y desviación de residuos aptos a DA desde el 2027 hasta el 2100. Los SDF 3 y 4 son asumidos como rellenos sanitarios bajo las especificaciones de la herramienta²⁶, con el objetivo de explorar las diferencias que se generan bajo diferentes escenarios de captaciones de gas y la cantidad de disposición de RADA.

■ Descripción de escenarios alternativos en SWEET

Con el objetivo de considerar diferentes posibilidades de gestión para el SDF San Mateo, se plantean 4 escenarios alternativos a partir del 2024 ([Tabla 3](#)). El BAU de los periodos del SDF San Mateo es comparada con 4 diferentes escenarios alternativos los cuales contemplan diferentes cantidades de la FO de RSU desviadas a un sistema de DA en diferentes cantidades ([Tabla 3](#)), para profundizar en las cifras ingresadas en la herramienta consultar el [Anexo A: Modelo SWEET](#).

Los escenarios 1 y 4 son considerados con una desviación de los residuos orgánicos a DA baja (50 %), correspondiente a 52,915 ton/año; mientras que los escenarios 2 y 3 contemplan una desviación alta (80 %), correspondiente a 84,665 ton/año. Esto permite evaluar las diferencias de emisiones de GEI dependiendo de la cantidad de residuos que llegaría a la celda actual y la futura.

22 SWEET no genera emisiones de residuos no desviados en ningún escenario alternativo posterior a la fecha de cierre de SDF (2026). Por lo que se tuvo que generar un tercer SDF que simule los contaminantes del 2027-2100 del SDF posterior al cierre.

23 Cumpliendo con la NOM-083-SEMARNAT-2003, y extracción de biogás en la celda.

24 Al cumplir con la NOM-083-SEMARNAT-2003. Se colocó el año 2018 como actualización de vertedero controlado a relleno sanitario en SWEET ([Tabla 16](#) en [Anexo A: Modelo SWEET](#)). Se ajustó la eficiencia de la quema de biogás al 10% en SWEET de manera manual, debido a la intermitencia e ineficiencia de la quema en el pozo de venteo.

25 Se dejó la eficiencia de quema de biogás del 60% en como valor default (en SWEET) debido a que se asume un control de combustión adecuado.

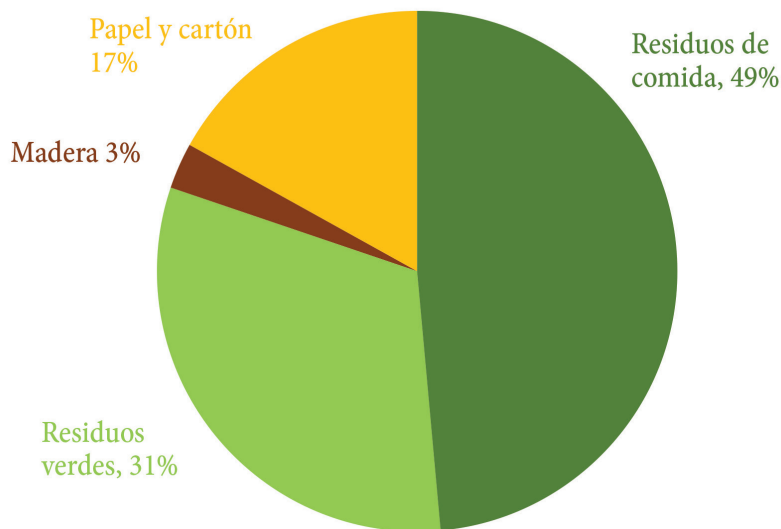
26 Cumplen con la NOM-083-SEMARNAT-2003

Tabla 3. Relación de los SDF supuestos con los escenarios alternativos

		Escenarios alternativos			
		1 Desviación baja (50%)	2 Desviación alta (80%)	3 Desviación alta (80%)	4 Desviación baja (50%)
Sitio de disposición final	SDF 1 Antiguo Vertedero	Sin desviación	Sin desviación	Sin desviación	Sin desviación
	SDF 2 Basurero controlado “San Mateo”	Desviación a partir del 2024. Quema de biogás en pozos de venteo en 2018.	Desviación a partir del 2024. Quema de biogás en pozos de venteo en 2018.	Desviación a partir del 2024. Quema de biogás en pozos de venteo en 2018.	Desviación a partir del 2024. Quema de biogás en pozos de venteo en 2018.
	SDF 3 Celda clausurada	Desviación a partir del 2027. Quema activa de biogás en 2027.	Desviación a partir del 2027. Quema activa de biogás en 2027.	Desviación a partir del 2027. Quema activa de biogás en 2027.	Desviación a partir del 2027. Quema activa de biogás en 2027.
	SDF 4 Nueva Celda	Desviación a partir del 2024. Con aprovechamiento de metano en 2055	Desviación a partir del 2024. Con aprovechamiento de metano en 2055	Desviación a partir del 2024. Con aprovechamiento de metano en 2028	Desviación a partir del 2024. Con aprovechamiento de metano en 2028

Fuente: (SIPRA , 2023)

Es importante resaltar que todos los escenarios incorporados en la herramienta contemplan una quema de gas en SDF desde el 2018, además de considerar que la composición de los residuos de comida que serían enviados a DA corresponde al 49%, 31% residuos verdes (no incluye restos de poda de jardines y parques municipales), 3% madera y 17% papel y cartón ([Gráfica 1](#)).



Gráfica 1 Composición de residuos orgánicos aptos para la digestión anaerobia

Fuente: (SIPRA , 2023)

La [Tabla 4](#) especifica las circunstancias en las que opera cada SDF simulado en SWEET a lo largo del tiempo. Considera los tiempos de operación de las 4 etapas del sitio de disposición final, el año y cantidad de RADA desviados, así como la profundidad del pozo donde se depositan los residuos municipales.

Tabla 4. Especificaciones de los diferentes SDF a través del tiempo cargados en SWEET

SDF	1	2	3	4
Nombre	Antiguo Vertedero	San Mateo (actual)	Celda clausurada	Nueva celda
Fecha de inicio de la desviación a DA	-	2024	2027	2027
Tipo	Basurero	Basurero Controlado	Relleno Sanitario	Relleno Sanitario
Disposición anual total (ton/año)	150,000	225,172	33,775 ²⁷	225,172

²⁷ Esta disposición anual corresponde a una simulación con el 15% de la disposición anual caracterizada por la presente consultoría (SIPRA , 2023), con el propósito de simular los contaminantes de la vieja celda en el tiempo que estuvo sin la desviación de RADA y se depositaron en la celda actual (3 años de gestión con desviación de RADA comparado con los 20 años de operación de la celda).

**Tabla 4. Especificaciones de los diferentes SDF a través del tiempo
cargados en SWEET continuación.**

SDF	1	2	3	4
Nombre	Antiguo Vertedero	San Mateo (actual)	Celda clausurada	Nueva celda
Apertura SDF	1976	2006	2027	2027
Cierre SDF	2005	2026	2100	2100
Profundidad (m)	20	30	30	30

■ Descripción del potencial de reducción de emisiones basadas en la habilitación de un sistema de DA con base en ADST

La herramienta de proyección de escenarios de digestión anaerobia (ADST) permite estimar la cantidad de metano puro y biogás (GEI) que puede ser aprovechado energéticamente para una planta con desviación de los residuos orgánicos. Con el objetivo de realizar una estimación general del volumen de biogás que se podría generar con un sistema de AD, así como sus características, y posibles usos, se utilizó la herramienta ADST y en la cual se introdujo la composición y generación de residuos resultado del estudio realizado en el sitio de disposición final este año por SIPRA.

Los supuestos cargados a ADST consideran una operación entre 15 – 40 % de sólidos totales. Estas características son propias de un sistema de digestión aeróbica “seco”, debido a que la carga de la FO de RSU son sólidos y no provienen de efluentes (<15 % sólidos totales) (Global Methane Initiative, 2022). La temperatura ambiental fijada en un rango de 10 - 20°C (corresponde la temperatura promedio de Naucalpan de 15°C) como lo marca la herramienta. Algunos de los puntos importantes para considerar en esta estimación son:

- El sistema de DA se considera seco.
- El reactor pretende operar a una temperatura promedio de 15 °C. Por lo cual se considera un sistema sin adición de calor.
- Los residuos que se consideran susceptibles para este sistema son los residuos de comida, residuos verdes, papel y cartón y madera²⁸.

²⁸ La herramienta cuenta con un menú predeterminados en los que se tiene que introducir la información de composición y generación, para consultar las mismas favor remitirse al [Anexo B](#).

Dado que ADST es una herramienta para la estimación de generación de biogás (mezcla de los gases) y metano en sistemas de DA, la información de la caracterización de la composición de los RADA es requerida para hacer diferentes corridas con diferentes supuestos o escenarios alternativos. Por lo cual, se realizaron 2 corridas para la producción de biogás en un biodigestor con el 80% (84,665 ton métricas por año) y 50% (52,915 ton métricas por año) de desviación de los RADA del SDF, con la finalidad de visualizar el aprovechamiento energético que pueden lograr los RADA en un biorreactor.

La línea base considera un 100% de RADA con un total de 105,831 ton métricas. Se realizaron 2 corridas para la generación de metano (recuperación asumida) dentro de la celda con el 20 %²⁹ (21,166 ton métricas por año) y 50% (52,915 ton métricas por año) de RADA **no desviada del SDF**. Estas dos corridas fueron realizadas con la finalidad de poder comparar la reducción de contaminantes de captar y aprovechar el biogás en la celda.

■ Vínculo entre las herramientas SWEET y ADST

◆ *Escenarios con Digestión Anaeróbica - SWEET*

- Los residuos orgánicos (residuos de comida, residuos verdes, papel y cartón, y madera) son desviados a biodigestión ([Tabla 5](#)).
- La desviación de residuos orgánicos al sistema de DA comienza en el año 2024.
- Se espera que el sistema de biodigestión se encuentre próximo al SDF, por lo que no serán necesarios vehículos extras.

Para conocer más acerca de los parámetros tomados en consideración dentro de la herramienta SWEET, consultar en [Anexo A](#): Modelo SWEET.

29 Considera que el 80% de los residuos orgánicos es desviado.

Tabla 5. Escenarios generados por el estudio de caracterización SIPRA 2023 en SWEET

Consideraciones	SWEET, 2023				
	Línea base (0 %)	Desviación residuos orgánicos a DA			
		1 50 %	2 80 %	3 80 %	4 50 %
Escenarios (desviación)					
Total, de residuos orgánicos redirigidos DA (ton/año)	0	52,915	84,665	84,665	52,915
Composición de los residuos redirigidos a DA (%)					
Restos de comida	0	49	49	49	49
Residuos verdes	0	31	31	31	31
Madera	0	3	3	3	3
Papel/cartón	0	17	17	17	17

Fuente: (SIPRA , 2023)

◆ Escenarios con Digestión Anaeróbica – ADST

En la primera corrida se cargaron el 20% de RADA de la cantidad no desviada del SDF “San Mateo”, estos datos corresponden con el escenario 3 de la corrida en SWEET. En la segunda corrida el 50% de los residuos son desviados a DA, y corresponden con el escenario 4 de la corrida en SWEET. La [Tabla 19](#) en el [Anexo B](#) muestra los datos cargados a ADST para 2 corridas diferentes para ingresar los datos en SWEET ([Tabla 16](#)).

◆ Incorporación de ADST en SWEET

La herramienta SWEET se centra en la emisión de gases de efecto invernadero en los sitios de disposición final. La ADST se enfoca en la generación de biogás a través del aprovechamiento de residuos orgánicos. Por lo cual, para una mayor precisión en la estimación de la reducción de contaminantes por SWEET a través del aprovechamiento de metano con DA en el sitio, se utiliza ADST.

En la [Tabla 6](#) se presentan la combinación de información proveída por ambas herramientas. En SWEET se corrió el 80 y 50% de RADA desviado del SDF; en ADST se corrieron el 20³⁰ y 50% de RADA respectivamente³¹.

**Tabla 6. Producción de biogás y metano en corridas 1 y 2
(respectivamente) de ADST y su relación con SWEET**

Parámetro	SWEET		ADST	
RADA	Desviada (en SWEET)		No desviada (en SWEET)	
Simulaciones	SDF 3	SDF 4	Corrida 1	Corrida 2
% de RADA	80%	50%	20% ³⁰	50% ³⁰
Resultados	Emisiones de GEI en ton métricas	Emisiones de GEI en ton métricas	Producción de metano en m ³ /año	Producción de metano en m ³ /año
Análisis de información	Se requiere de la generación de metano ³² en m ³ /año	Se requiere la generación de metano ³¹ en m ³ /año	Genera información sobre generación de biogás, metano y sus usos.	Genera información sobre generación de biogás, metano y sus usos.

Fuente: (SIPRA , 2023)

■ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

■ Resultados obtenidos con SWEET

En este apartado se presentan los resultados estimados por la herramienta SWEET bajo los 4 diferentes escenarios, los cuales principalmente muestran diferentes opciones de la cantidad de residuos orgánicos desviados a DA y cómo influye el manejo de residuos en los 4 periodos del SDF.

La [Tabla 7](#) resume las emisiones de los diferentes escenarios, desde la desviación de RADA a partir del año 2024 y hasta el 2050. Las emisiones GEI de la tabla engloban CO₂, NO_x, SO_x, CH₄, BC y carbono orgánico. Se puede observar que el escenario BAU es el que genera la mayor cantidad de

30 Corresponde a los RADA no desviados que fue depositado de la celda.

31 Los datos producidos por ADST ([Tabla 20](#)) se ingresan en la fila antepenúltima de la [Tabla 16](#) en el [Anexo A](#) (en verde) para indicar la producción de metano en m³/año, y en la fila penúltima de la [Tabla 16](#) (en azul) para señalar el año de inicio de la recolección de metano.

32 Recuperación de metano generada por RADA dentro de la celda operativa.

emisiones a largo plazo, en contraste el escenario 3 de menor generación de emisiones debido a la alta cantidad de RADA desviados (80 %) y el sistema de aprovechamiento de metano en el SDF.

Se puede apreciar la diferencia de emisiones si se incorporan acciones para la captura y el aprovechamiento de metano. Para el año 2050 los escenarios con quema de biogás emiten más ton CO_{2e} que los escenarios con aprovechamiento de metano, confirmando que es más favorable el aprovechamiento de metano que solo la quema de biogás.

Se puede observar un incremento de los 4 escenarios en el año 2024 y 2025 ([Tabla 7](#) y [Gráfica 2](#)), debido principalmente a la producción de N₂O tras la gestión de los residuos orgánicos desviados a DA. El tiene un equivalente de 298x CO₂. Sin embargo, por la reducción de CH₄ oxidado a CO₂ por combustión o aprovechamiento, las emisiones globales de GEI de los 4 escenarios disminuyen comparación con el BAU tras el 2026.

Tabla 7. Comparación de emisiones anuales de GEI (Ton CO_{2e}) por escenario desde 2024-2050

Año	BAU	ESCENARIOS			
		1 Bajo	2 Alto	3 Alto c/aprov. metano	4 Bajo C/aprov. metano
2024	141,426	147,622	151,340	151,284	147,622
2025	144,269	143,718	143,388	142,532	143,718
2026	147,176	140,613	136,675	135,031	140,613
2027	150,148	138,195	131,022	128,601	138,195
2028	156,392	138,071	127,083	123,576	137,729
2029	162,378	138,296	123,857	119,291	137,645
2030	168,155	138,828	121,247	115,647	137,896
2031	173,765	139,630	119,169	112,558	138,441
2032	179,244	140,674	117,555	109,950	139,247
2033	184,624	141,932	116,344	107,764	140,285
2034	189,930	143,385	115,488	105,947	141,532
2035	195,185	145,012	114,942	104,454	142,966

Tabla 7. Comparación de emisiones anuales de GEI (Ton CO₂e) por escenario desde 2024-2050 continuación.

Año	BAU	ESCENARIOS			
		1 Bajo	2 Alto	3 Alto c/aprov. metano	4 Bajo C/aprov. metano
2036	200,408	146,800	114,672	103,248	144,570
2037	205,617	148,734	114,645	102,297	146,330
2038	210,824	150,805	114,837	101,572	148,235
2039	216,044	153,003	115,224	101,052	150,272
2040	221,288	155,320	115,789	100,715	152,434
2041	226,564	157,750	116,514	100,544	154,714
2042	231,883	160,288	117,385	100,525	157,105
2043	237,251	162,928	118,392	100,644	159,602
2044	242,675	165,668	119,524	100,892	162,200
2045	248,163	168,505	120,772	101,258	164,898
2046	253,719	171,435	122,129	101,733	167,690
2047	259,350	174,457	123,588	102,312	170,576
2048	265,059	177,569	125,145	102,989	173,554
2049	270,852	180,771	126,795	103,756	176,621
2050	276,733	184,061	128,533	104,612	179,777

***Nota:** La línea base para los años 2024 y 2025 tiene menos emisiones debido a la producción de N₂O tras la gestión de los residuos orgánicos desviados a DA.

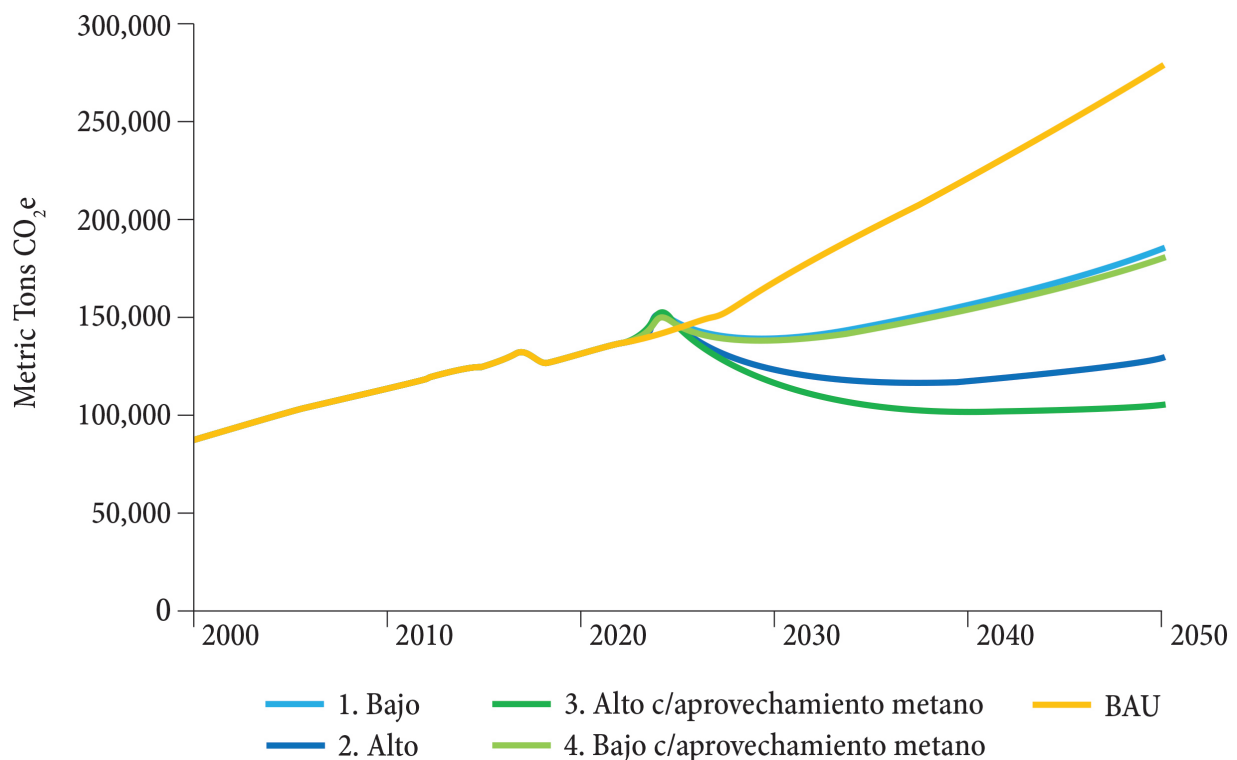
Fuente: (SIPRA , 2023)

Los escenarios 1 y 4 que tienen la misma cantidad de desviación (50 %) emiten la misma cantidad de GEI hasta el año 2027 donde comienza el aprovechamiento de metano en el escenario 4 nueva celda (SDF 4); para el año 2050 el escenario 4 tiene tan solo 5.284 toneladas métricas de CO₂e menos emisiones que el escenario 1 a pesar de que la desviación de RADA. Los escenarios 2 y 3 se comportan de manera muy similar; a partir del año 2027 el escenario 3 empieza a disminuir sus emisiones y existe una diferencia de 23.921 toneladas métricas de CO₂e.

En comparación con BAU en el 2050, el escenario 1 tiene una reducción de 92,672 ton CO₂e, no cuenta con aprovechamiento de metano y tiene baja desviación (50 %) de RADA. El escenario 2 tiene una reducción de 148,200 CO₂e con respecto al BAU y no cuenta con aprovechamiento de metano y tiene alta desviación (80 %) de RADA. El escenario 3 tiene una reducción de 172,121 ton CO₂e en comparación al BAU, cuenta con aprovechamiento de metano y tiene alta desviación (80 %) de RADA. El escenario 4 tiene una reducción de 96,956 ton CO₂e con respecto al BAU, cuenta con aprovechamiento de metano y baja desviación (50 %) de RADA. En conclusión, el escenario 3 es considerado como el ideal por tener un 62% menos emisiones que BAU.

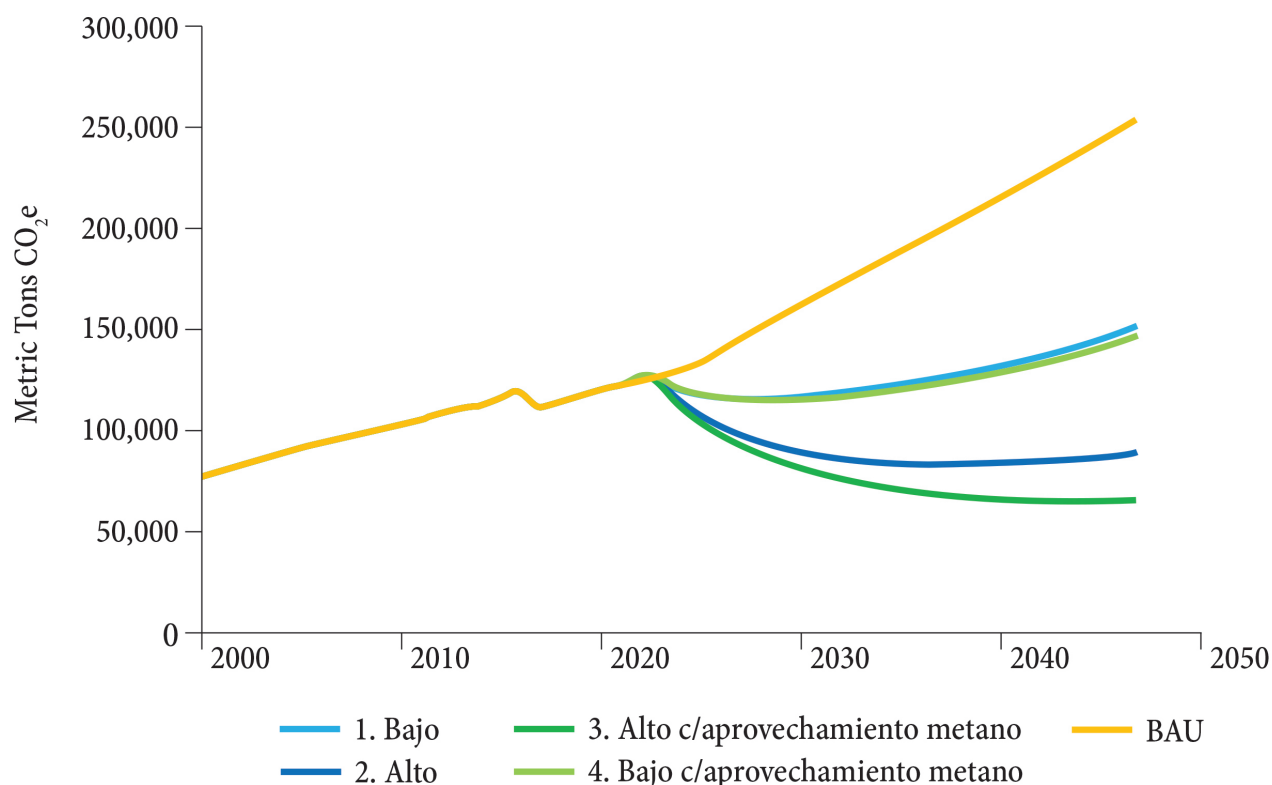
La [Gráfica 2](#) se aprecia que tanto BAU como los 4 escenarios tienen las mismas emisiones en el 2024 ya que se manejan igual (incluida quema de biogás en el 2018); desde ese año hasta el 2050 disminuyen las emisiones de ton de CO₂e significativamente en los escenarios por la desviación de residuos orgánicos a DA.

Se puede apreciar claramente el orden de las acciones de gestión para emitir menos contaminantes desde el 2027 hasta el año 2050 ([Tabla 7](#) y [Gráfica 2](#)) siendo (en orden ascendente): Alto con aprovechamiento de metano (3), alto (2), bajo con aprovechamiento de metano (4), bajo (1), y el BAU.



Gráfica 2 Total de emisiones por escenario en los cuatro escenarios analizados

A continuación, en la [Gráfica 3](#) se presenta el comportamiento de las emisiones exclusivamente de CH₄ (medido en CO₂e). Se observa el mismo impacto de las acciones de gestión de residuos orgánicos que la [Gráfica 2](#), menor contaminación en escenarios con desviación alta de RADA, seguido de escenarios con aprovechamiento de metano en la celda.

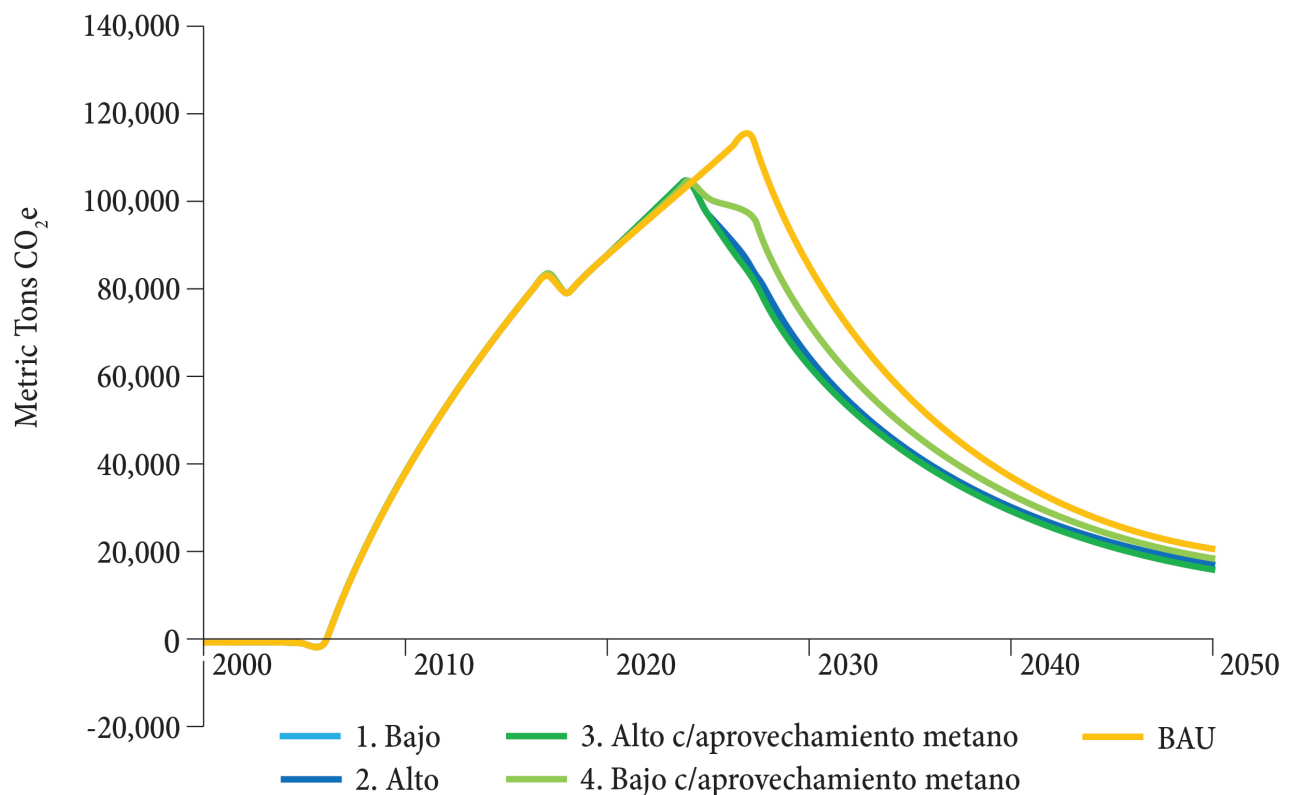


Gráfica 3 Comparación por escenario en el tiempo de emisiones de CH₄ (medido en ton CO₂e)

Ambas gráficas (2 y 3), presentan el mismo incremento en el BAU y los 4 escenarios de 2000 a 2018 por los RSU depositados en los sitios de disposición final. El BAU en los 4 escenarios tienen una caída pequeña de emisiones GEI en el 2018, producto de la quema pasiva de biogás (considerando una eficiencia del 10%), sin embargo, de manera posterior hay incrementos de emisiones en el tiempo, relacionadas principalmente con el incremento poblacional y aceleración de generación de RSU de 2018 a 2024. A partir del año 2024, el BAU se separa del resto de los escenarios, por la desviación de RADA; donde se consideran escenarios con alta desviación y escenarios con baja desviación. A partir del 2027 hasta el 2050 existe una divergencia entre los escenarios, debido principalmente al aprovechamiento de metano.

A pesar de que la [Gráfica 3](#) tiene el mismo comportamiento que la [Gráfica 2](#), el pico ubicado en 2024 por la desviación de RADA y es mucho menos pronunciado (prácticamente inexistente). Ya que las toneladas métricas de CO₂e por el CH₄ no es tan grande como en el caso de la [Gráfica 2](#) por la presencia de N₂O estimado por SWEET.

A continuación, la [Gráfica 4](#) presenta las emisiones de GEI de la celda actual del SDF San Mateo, tomando en consideración su apertura en 2006 y su cierre en 2026. El inicio de quema de gas de pozos de venteo en el 2018 y desviación de fracción orgánica a DA en el 2024.



Gráfica 4 Generación de emisiones GEI del relleno sanitario San Mateo en los diferentes escenarios. Herramienta SWEET³³

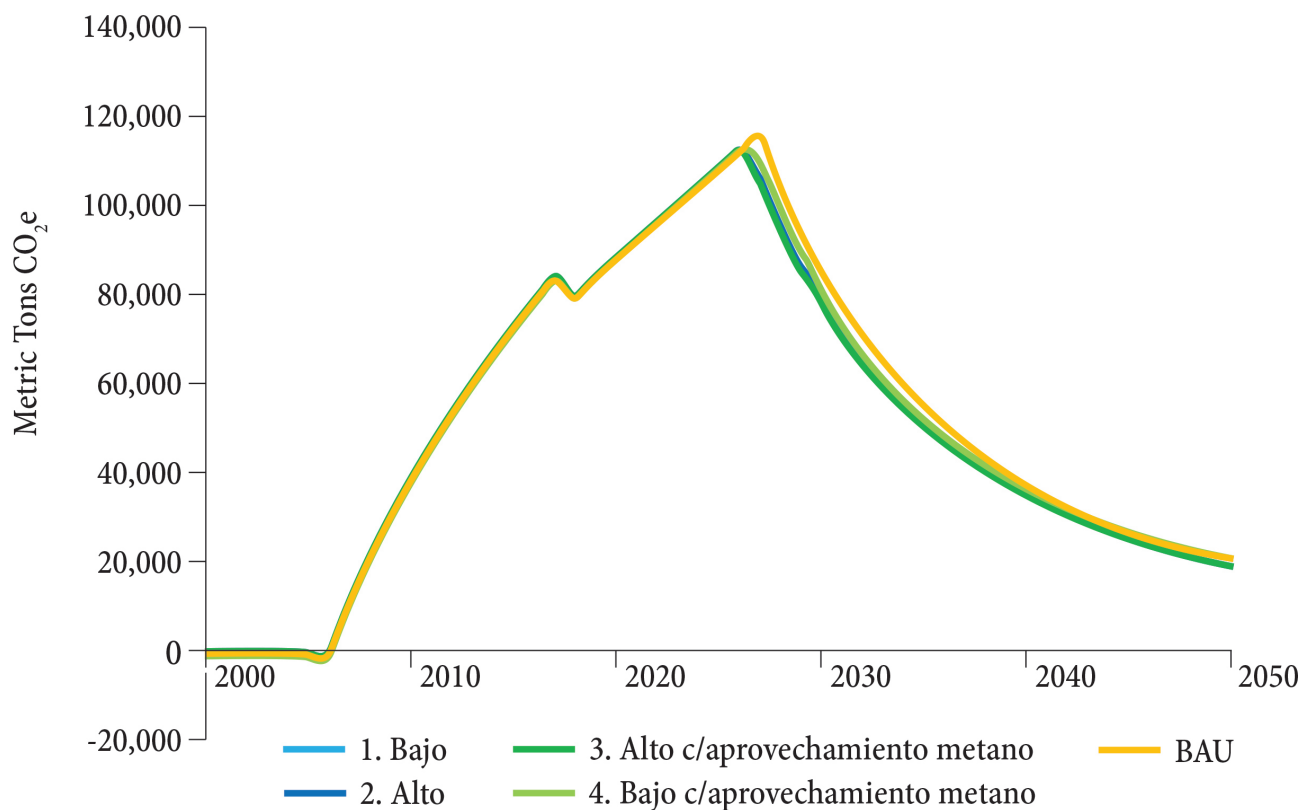
Se puede apreciar en el BAU de la [Gráfica 4](#), se cuenta con dos picos de producción de GEI (en el 2017 y 2027). El primero corresponde a la quema del biogás colectado en pozo de venteo y el

33 Este gráfico incluye las emisiones de CH₄ que no fueron captadas y quemadas.

segundo pico correspondiente al cierre de la celda en 2026. Se muestra una disminución paulatina de las emisiones debido a su clausura.

Los escenarios 2 y 3 se comportan prácticamente igual, comenzando su disminución de emisiones en el 2024 en comparación con el escenario 4 que, a pesar de comenzar la disminución de emisiones en el 2024, lo hace a un ritmo más lento. Todos los escenarios convergen en las 10,000 toneladas métricas incluyendo BAU.

La [Gráfica 5](#) representa la desviación de residuos que tendría la celda actual con la gestión actual hasta el año 2026. Dicha gráfica presenta el mismo comportamiento que la [Gráfica 4](#), sin embargo, empieza la desviación de residuos en el 2026.



Gráfica 5. Generación de emisiones GEI del relleno sanitario San Mateo en los diferentes escenarios con desviación de RADA en 2026. Fuente: Herramienta SWEET³⁴

34 Este gráfico incluye las emisiones de CH₄ que no fueron captadas y quemadas/usadas.

La diferencia entre la [Gráfica 4](#) y la [Gráfica 5](#) radica en el año de desviación de RADA. Mientras que la [Gráfica 4](#) se desvían en 2024, en la [Gráfica 5](#) se desvían en el 2026. Las emisiones de toneladas de CO₂e aumentan en 2.9% en el lapso del 2024 al 2050, si la separación de residuos orgánicos destinados a digestión anaeróbica no se realice.

La [Tabla 8](#) (desglosado en [Tabla 15](#) en [Anexo A: Modelo SWEET](#)) muestra el cambio en el total de emisiones comparado con la línea base al realizar la desviación a la DA. Los valores con signo negativo representan la reducción de toneladas métricas de emisiones GEI en todos los escenarios. La [Tabla 8](#) resume en periodos (suma de valores) de: 6 años, 19 años, 26 años y 46 años. Durante 46 años (2024-2070) la mayor reducción la tiene el escenario 3 con un total de -7,128,035 toneladas métricas de CO₂e, seguido del escenario 2 con -6,172,075; posterior el escenario 4 con -4,007,052; y finalmente el escenario 1 con la menor reducción de -3,928,966 toneladas métricas de CO₂e.

Tabla 8. Cambio en el total de emisiones conforme a la BAU (ton CO₂e)

Años	Período	1 bajo	2 alto	3 alto con captación de gas en SDF	4 bajo con captación de gas en SDF
2024-2030	6 años	-84,602	-135,332	-153,982	-86,526
2031-2050	19 años	-1,320,452	-2,111,739	-2,420,359	-1,378,132
2024-2050	26 años	-1,405,054	-2,247,071	-2,574,341	-1,464,658
2024-2070	46 años	-3,928,966	-6,172,075	-7,128,035	-4,007,052

Fuente: (SIPRA , 2023)

La desviación de residuos a la DA representa la reducción de emisiones más grande de los sistemas de gestión de residuos comparando con la recuperación de metano, por lo tanto, es crítico la separación de los RADA de los demás RSU que son colocados en el SDF. Cualquiera de los escenarios representa una reducción en las emisiones e impactos que se generan comparados con la gestión actual (BAU). La mejor opción la representa el escenario 3 con alta desviación, y con aprovechamiento de metano en la celda.

■ Resultados obtenidos de AD Screening Tool

En esta sección del reporte se muestran los resultados generados por la herramienta ADST con el objetivo de dimensionar las cantidades de biogás, en particular la generación de metano ([Tabla 19](#) del

[Anexo B: AD Screening Tool](#)), y digestato. Para este ejercicio se consideró un sistema seco, operando en una temperatura interna del reactor igual que la ambiental de 15°C (temperatura promedio de Naucalpan), sin calentamiento adicional. con la entrada de los RADA ([Tabla 18](#) del [Anexo B: AD Screening Tool](#)); sin el uso para generación eléctrica para su operación. Las consideraciones que se tomaron en cuenta para la herramienta utilizada se muestran con mayor detalle en el [Anexo B: AD Screening Tool](#).

Los resultados principales de la herramienta es la cantidad de biogás y metano que es capaz de producir un sistema de DA al cual es enviados los RADA, así también el digestato que es capaz de producir para ser utilizado como abono líquido o bien como agente humectante para la composta o vermicomposta (dependiendo de su composición). En la [Tabla 9](#) se muestran los resultados principales de producción de biogás que contempla los GEI, la producción de metano puro, y la producción de digestato líquido. La [Tabla 9](#) divide la producción si fuera aprovechado el 100 %, 80 % y 50% de los RADA.

Tabla 9. Resultados producidos en sistema de AD por ADST

Producción	100% RADA	80% RADA	50% RADA	Unidades
Biogás (GEI)	249,788	199,830	124,894	m ³ /año
Metano	124,644	99,715	62,322	m ³ /año
Digestato	105,687,225	84,549,780	52,843,612	Kg/año

Fuente: (SIPRA , 2023)

La [Tabla 10](#) compara los resultados de este estudio con el análisis de Mexan (2020) sobre la valorización energética de residuos orgánicos, basado en la caracterización de residuos y estimación de producción de SIPRA. Aunque la composición de residuos orgánicos de referencia difiere en el análisis de Mexan, los resultados de ADST varían según la producción. Sin embargo, la generación de biogás es un 90% mayor, posiblemente debido a las diferencias en la composición de los residuos procesados y la metodología utilizada.

Cabe mencionar que el estudio previo utiliza un sistema de calentamiento operando en temperatura mesofílica, mientras que en el presente estudio no se simuló con la aplicación de calor adicional al biodigestor; de aplicarse calor (temperatura mesofílica) los resultados de ADST incrementan en producción de biogás en 3,408 % en el peor de los casos y 6,210 % en el mejor de los casos.

Es importante mencionar que las estimaciones de ADST deben ser consideradas como de primer

orden, ya que son emisiones de un digester anaerobio y, por lo tanto, la reducción de emisiones netas varía considerablemente en función de los parámetros operativos y del diseño del reactor, así como las características del residuo.

Tabla 10. Comparación resultados de generación de biogás, digestato y electricidad de acuerdo con (Mexan, 2020) y estimaciones actuales con ADST

Categorías	Mexan, 2020	SIPRA, 2023	% de diferencia
Cantidad de residuos orgánicos procesados (ton/día)	388	290	-33.8%
Generación de biogás (m ³ /año)	22,932	249,788	90.8%
Generación de digestato (ton/año)	132,421	105,687	-25.3%
Electricidad generada (MWh/año)	44,093	57,611	23.5%

Fuente: Elaboración propia basado en datos de: (Mexan, 2020) y los resultados arrojados por la herramienta ADST con los datos del [Anexo B](#).

La [Tabla 11](#) representa las opciones de usos de la energía recuperada, para el 100% de RADA, considerando que estas son equivalencias energéticas por la producción de biogás en un biodigestor, por lo tanto son excluyentes (ej. si se elige producción de electricidad, no se puede dar ninguna de las opciones restantes).

Tabla 11. Opciones de recuperación de energía

Unidad	Valor
Producción de electricidad (biogás depurado a calidad de gas natural) (MWh)	1,198
Producción de electricidad (sólo biogás) (MWh)	810
Producción de gas natural renovable (m ³ /año)	124,644
Potencial de gas de cocina (casas/año)	2,281
Potencial de calefacción doméstica (casas/año)	1,711
Lámparas de gas (lámparas/año)	456

Fuente: Elaboración propia basado en los resultados arrojados por la herramienta ADST con los datos del [Anexo B](#).

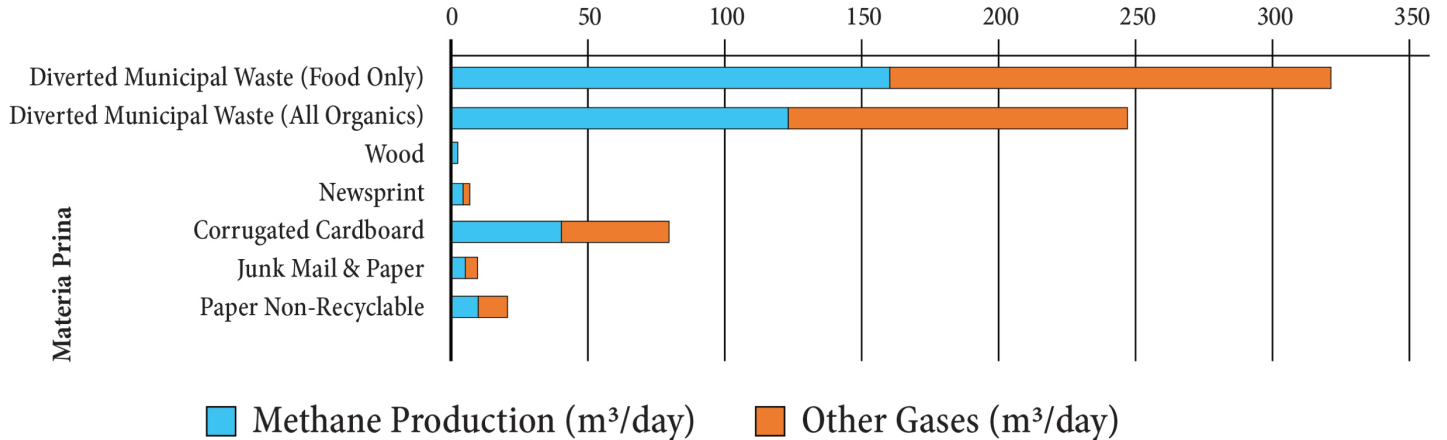
La [Tabla 12](#) muestra la cantidad de producción de metano y otros gases del biogás dependiendo de los sustratos alimentados a DA. Cerca del 49% de la producción total de biogás producido es por la cantidad de comida desechada por los habitantes del municipio. Así también los residuos verdes (no municipales), son responsables del 36% de la producción de biogás. No solo la gran proporción que representan estos residuos con respecto a todos los RADA es la gran cantidad de emisión de biogás, sino que también, estos residuos tienen una mejor relación carbono/nitrógeno, en especial los residuos de comida, motivo por el cual son los principales generadores y se deben diseñar estrategias de gestión en torno a ellos.

Tabla 12. Cantidad de residuos procesados, producción de metano y otros gases diarios

Categorías	Residuos procesados (kg/día)	Producción de metano (m³/día)	Otros gases (m³/día)
RSU (comida únicamente)	141,416	160.69	161.33
Residuos municipales (residuos verdes)	90,822	123.28	123.78
Madera	7,959	0.87	1
Periódico	4,442	3.13	3
Cartón	29,739	39.35	40
Papel	6,354	4.31	4
Papel no reciclable	9,225	9.83	10
TOTAL	289,957	341	343

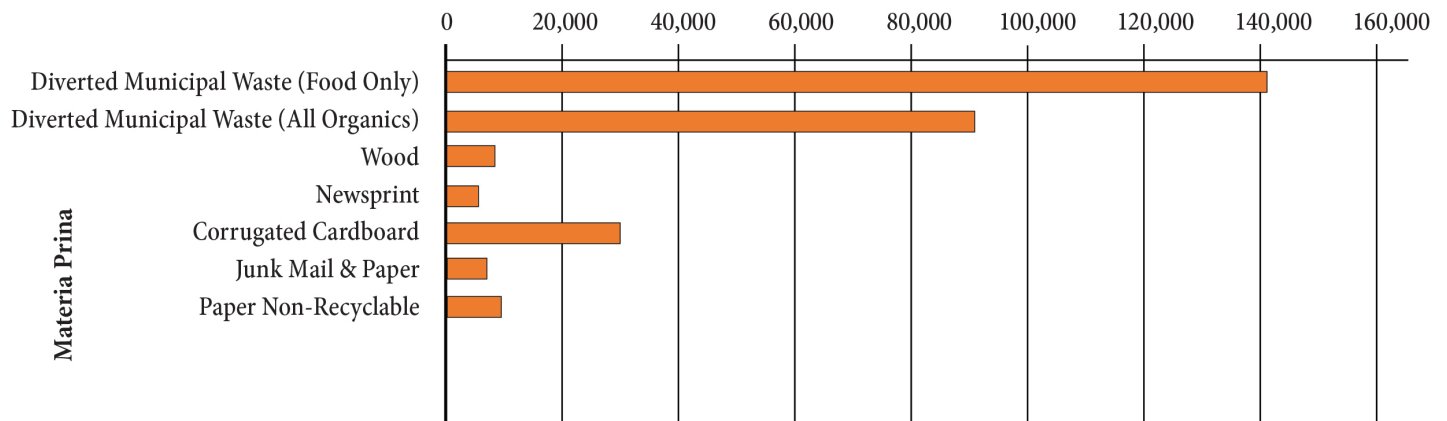
Fuente: (SIPRA , 2023)

En la [Tabla 12](#) (total de metano y otros gases) y la [Gráfica 5](#) se puede observar que la relación de generación de CH₄ y otros gases es de 1:1, (aproximadamente el 50%).



Gráfica 6 Producción de biogás conforme a las materias primas introducidas al sistema de DA

La [Gráfica 6](#) muestra que la generación de digestato (289,554 kg/día) es directamente proporcional a la cantidad total de residuos procesados ([Tabla 12](#)), reflejando casi una relación uno a uno. Este digestato puede ser utilizado como fertilizante, generando beneficios económicos al ser vendido o, por ejemplo, usado por el Ayuntamiento de Naucalpan de Juárez para el mantenimiento de áreas verdes.



Gráfica 7 Producción total de digestato (efluente líquido kg/día)

CONCLUSIONES

En México se disponen diariamente enormes cantidades de residuos en SDF donde se producen pasivos ambientales de alto riesgo al no contar con la infraestructura adecuada para su correcto manejo siendo una de sus principales consecuencias la emisión de GEI. Sin embargo, de manejarse de manera ambientalmente adecuada el biogás, producto de la degradación de los residuos, podría ser aprovechado para la generación de energía y avanzar en el cumplimiento de las metas de acción climática definidas para el país.

El municipio de Naucalpan de Juárez, que en el 2023 presenta una generación per cápita de 0.6601 kg/hab/día, tiene la oportunidad de disminuir sus emisiones (principalmente de CH₄) generadas por la disposición final de residuos, al optar por la construcción y operación de un sistema de DA, al cual podrían desviarse hasta un 47% de los RSU (residuos de alimentos, residuos verdes, papel y cartón y madera).

Mediante el empleo de las herramientas SWEET y ADST, se efectuó un análisis para el que se obtuvo un potencial de reducción de entre 7,128,035 toneladas métricas de CO₂e en el escenario 3 a lo largo de 46 años (2024-2070) con la instalación de un sistema de aprovechamiento de metano y alto en RADA, por lo que es considerado el mejor de los escenarios. En contraste, se obtuvo una reducción de 3,928,966 ton CO₂e en el escenario 1 a lo largo de 46 años (2024-2070) con un sistema de quema pasiva de biogás y baja RADA en el sitio resultando el peor de los escenarios.

La desviación de residuos a la DA representa la reducción de emisiones más grande de las acciones de gestión de residuos evaluadas, por lo tanto, es crítico la separación de los RADA del resto de los RSU que son dispuestos en el SDF.

La instalación y operación de un biodigestor tendría una producción de 199,830 m³ al año de biogás aprovechando el 80%, y 124,894 m³ aprovechando el 50% de los RADA, operando un DA a temperatura ambiental (15°C promedio). En este contexto, podría generarse aproximadamente 1,198 MWh energía eléctrica.

De acuerdo con los resultados presentados en este reporte, se obtendrían 84,549 ton/año de digestato usando el 80% de RADA o bien 52,843 ton/año usando el 50% de RADA, que podría ser empleado como fertilizante por diversos usuarios alrededor de las instalaciones, generando impactos positivos adicionales a la iniciativa.

Respecto a la composición actual, cerca del 49% de la producción total de biogás está asociado con la cantidad de residuos de alimentos del municipio.

Cabe señalar que, con base en los resultados de los modelos, además de la reducción de emisiones por la puesta en marcha del biodigestor, deberá considerarse realizar esfuerzos para la captación activa y quema del biogás en los SDF.

En cuanto a los impactos adicionales en la operación del SDF por la desviación de la fracción orgánica de los RSU, se cuentan los siguientes:

- Reducción en la generación de lixiviados
- Reducción de los costos asociados al manejo de lixiviados
- Minimización del riesgo de incendios en el sitio
- Disminución de otros contaminantes en el aire en torno al sitio (NOx, SOx y materia particulada)
- Reducción de olores en el sitio
- Reducción de riesgos en los SDF por asentamientos diferenciales producto de la degradación de los residuos principalmente los orgánicos.

Finalmente, es importante destacar que las estimaciones de este reporte se desarrollaron con base en diversos supuestos y están sujetos a un nivel considerable de incertidumbre, por lo que se recomienda utilizar como una guía general y no exacta.

REFERENCIAS

- Abt Associates. (2018). Evaluation of the Potential Climate Benefits from Naucalpan's Proposed Anaerobic Digester Project. Naucalpan de Juárez .
- CEMDA. (2018). El metano como contaminante del aire. Retrieved from <https://www.cemda.org.mx/gas-metano/>
- COESPO. (2019). Proyecciones de población de los municipios del Estado de México 2019-2030. Retrieved from <https://coespo.edomex.gob.mx/sites/coespo.edomex.gob.mx/files/files/2019/Nuevos/proyecciones%20.pdf>
- DBGIR. (2020, mayo). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos. Retrieved from Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales : <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
- EPA. (2023, Julio 25). Retrieved from <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>
- EPA. (2023, Julio 25). Emisiones de metano. Retrieved from Energía y medio ambiente: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/emisiones-de-metano>
- GIZ. (2018). Proyectos de aprovechamiento energético a partir de residuos solidos urbanos en México. Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México.
- Global Methane Initiative. (2022). Anaerobic Digestion Screening Tool, Version 2.2. Excel. Sector Agricultura, Biogás, Residuos Sólidos Urbanos, Aguas residuales.
- Global Methane Initiative. (2023, 11 8). Global Methane Emissions and Mitigation Opportunities. Retrieved from <https://www.globalmethane.org/documents/gmi-mitigation-factsheet.pdf>
- GMH, & CATE. (2023). Global waste Sector methane. Fact Sheet.
- GMI. (2020). Global Methane Emissions and Mitigation Opportunities. Retrieved from <https://www.globalmethane.org/>
- Gobierno de México. (2022). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from Tercer Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/747507/158_2022_Mexico_3er_BUR.pdf
- IPCC. (2021). Summary for policymakers. Contribution of working group I to the sixth Assessment report of the intergovernmental panel on climate change.: Climate Change 2021: The physical Science Basis.
- Mexan. (2017). Estudio actual de la generación, gestión y disposición final de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos de Naucalpan de Juárez. Naucalpan de Juárez .
- Mexan. (2020). Análisis de la viabilidad de una asociación público privada- Proyecto de manejo y aprovechamiento de residuos organicos mediante valorización energética . Naucalpan de Juárez.

- SEGOB. (2004, octubre 20). Diario Oficial de la Federación . Retrieved from 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.: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004#gsc.tab=0
- SEGOB. (2022, mayo 12). Diario Oficial de la Federación . Retrieved from Programa Nacional para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos 2022-2024: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5673264&fecha=05/12/2022#gsc.tab=0
- SEMARNAT. (2019, enero 18). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Retrieved from Tiraderos a cielo abierto dañan ambiente y salud humana: <https://www.gob.mx/semarnat/es/articulos/tiraderos-a-cielo-abierto-danan-ambiente-y-salud-humana?idiom=es>
- SEMARNAT & INECC. (2018, Abril 04). Desarrollo de rutas de instrumentación de las contribuciones nacionalmente determinadas en materia de mitigación de gases y compuestos de efecto invernadero (GYCEI) del sector residuos sólidos urbanos en México, como insumo para la sexta comunicación naci. Mitigación del cambio climático. México: Reporte 1. Programa de trabajo, propuesta metodológica, y análisis inicial del sector. Capítulo 7. Pag. 45.
- SEMARNAT & INECC. (2022). Contribución Determinada a Nivel Nacional. Actualización 2022. Publicado en UNFCC: Gobierno de México.
- SENER. (s.f.). Demanda y consumo 2021-2035. Retrieved from https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/649612/PRODESEN_CAP_TULO-4.pdf
- Servicios Públicos. (2023, Realizada entre mayo-junio). Sistemas de gestión de RSU de Naucalpan de Juárez. (A. C. Castro, Interviewer)
- SIPRA. (2023). Estudio de cuantificación y caracterización de residuos del municipio de Naucalpan de Juárez, Estado de México, basado en los vehículos entrantes al Relleno Sanitario San Mateo. Naucalpan de Juárez .
- UNDP, U. N. (2019). Informe de Gestión de Biogás. Proyecto de Aprovechamiento de Biogás de RSU - GEF ARG/16/G23. Argentina: Página web: <https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/ARG/Informe%20Gesti%C3%B3n%20Biogas%2019.12.19.pdf>.
- UNEP, & CCAC. (2021). Global methane assessment Benefits and Costs of Mitigating Methane Emissions. Nairobi: United Nations Environment Programme: ISBN: 978-92-807-3854-4.
- USEPA. (2021). SWEET v 4.0.3. SWEET_UserManual_2021.12.13. En conjunto con Global Methane Initiative & ABT associated.
- Whitehouse. (2023, Enero 10). FACT SHEET: Key Deliverables for the 2023 North American Leaders' Summit. Retrieved from <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2023/01/10/fact-sheet-key-deliverables-for-the-2023-north-american-leaders-summit/>

ANEXO A: MODELO SWEET

Tabla 13. Información general cargada a SWEET

General	
City	Naucalpan de Juarez
Country	Mexico
Global Region	Central America
Population in formal collection zones	934,557
Population outside formal collection zones	0
Current Year	2023
Climate	
Average annual precipitation (mm/year)	807
Mean annual temperature (oC)	15.0
Waste Generation & Collection Rates	
Per capita waste generation rate inside formal collection zones (kg/capita/day)	0.66
Per capita waste generation rate outside formal collection zones (kg/capita/day)	0.00
Average annual % growth rate in quantity of waste collected – historical	2%
Average annual % growth rate in quantity of waste collected - projected future	2%
Percentage of waste generated inside formal collection zones that is collected	100%
Percentage of waste generated outside formal collection zones that is collected	0%

Fuente: (SIPRA , 2023)

Tabla 14. Información ingresada en la herramienta SWEET acerca de los SDF

Consideraciones para los SDF en diferentes escenarios	BAU	Escenarios Alternativos			
		1. Bajo	2. Alto	3. Alto con aprovechamiento metano	4. Bajo con aprovechamiento metano
SDF #1					
Nombre del SDF	Antiguo Basurero				
Año de apertura	1980				
Año de cierre	2005				
Disposición anual (toneladas):	150,000				
¿Relleno sanitario o basurero?	Basurero				
¿Año de actualización del basurero a basurero controlado de basurero controlado a relleno sanitario?	N/A				
Profundidad promedio de residuos (m)	20				
¿Hay extracción activa de gas y quema o sistemas de utilización existente o planificado?	No				
¿Cuál es el año en puesta en marcha de la extracción activa de gasa y quema o sistema de utilización?	N/A				
¿Hay proyecto de gas a energía de calidad de red de gas natural existente o planificado? (solo rellenos sanitarios)	N/A				

Recuperación de metano real (o asumida en el futuro)	N/A
Año del dato real de recuperación de metano	N/A
Eficiencia de recolección específica del sitio del año con datos de recuperación (%)	0
SDF #2	
Nombre del SDF	Relleno sanitario San Mateo
Año de apertura	2006
Año de cierre	2026
Disposición anual (toneladas):	225,172
¿Relleno sanitario o basurero?	Basurero controlado
¿Año de actualización del basurero a basurero controlado de basurero controlado a relleno sanitario?	2018
Profundidad promedio de residuos (m)	30
¿Hay extracción activa de gas y quema o sistemas de utilización existente o planificado?	Sí
¿Cuál es el año en puesta en marcha de la extracción activa de gas y quema o sistema de utilización?	2018

¿ Hay proyecto de gas a energía de calidad de red de gas natural existente o planificado? (solo rellenos sanitarios)	No
Recuperación de metano real (o asumida en el futuro)	N/A
Año del dato real de recuperación de metano	N/A
Eficiencia de recolección específica del sitio del año con datos de recuperación (%)	10
SDF #3	
Nombre del SDF	Celda cerrada
Año de apertura	2027
Año de cierre	2100
Disposición anual (toneladas):	33,775
¿Relleno sanitario o basurero?	Relleno Sanitario
¿Año de actualización del basurero a basurero controlado de basurero controlado a relleno sanitario?	N/A
Profundidad promedio de residuos (m)	30
¿Hay extracción activa de gas y quema o sistemas de utilización existente o planificado?	Si

¿Cuál es el año en puesta en marcha de la extracción activa de gas y quema o sistema de utilización?	2027
¿Hay proyecto de gas a energía de calidad de red de gas natural existente o planificado? (solo rellenos sanitarios)	No
Recuperación de metano real (o asumida en el futuro) [m ³ CH ₄ /año]	0
Año del dato real de recuperación de metano	2028
Eficiencia de recolección específica del sitio del año con datos de recuperación (%)	60%
SDF #4	
Nombre del SDF	Nueva celda
Año de apertura	2027
Año de cierre	2100
Disposición anual (toneladas):	225,172
¿Relleno sanitario o basurero?	Relleno sanitario
¿Año de actualización del basurero a basurero controlado de basurero controlado a relleno sanitario?	N/A
Profundidad promedio de residuos (m)	30

¿Hay extracción activa de gas y quema o sistemas de utilización existente o planificado?	Sí	
¿Cuál es el año en puesta en marcha de la extracción activa de gas y quema o sistema de utilización?	2055 (escenarios 1 y 2)	2027 (escenarios 3 y 4)
¿Hay proyecto de gas a energía de calidad de red de gas natural existente o planificado? (solo rellenos sanitarios)	Si	
Recuperación de metano real (o asumida en el futuro) [m ³ CH ₄ /año]	19,515 (escenarios 1 y 4)	7,806 (escenarios 2 y 3)
Año del dato real de recuperación de metano	2028	
Eficiencia de recolección específica del sitio del año con datos de recuperación (%)	4%	3%

Fuente: (SIPRA , 2023)

Tabla 15. Reducción de emisiones totales en comparación con la línea base.

Año	1 Bajo	2 Alto	3 Alto con aprovechamiento metano	4 Bajo con aprovechamiento metano
2024	6,196	9,914	9,858	6,196
2025	-551	-881	-1,737	-551
2026	-6,563	-10,501	-12,146	-6,563
2027	-11,954	-19,126	-21,547	-11,954
2028	-18,322	-29,309	-32,817	-18,663
2029	-24,082	-38,521	-43,086	-24,733

REPORTE DE EMISIONES DEL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL “RELLENO SANITARIO SAN MATEO” Y
EVALUACIÓN DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS POR MEDIO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA

2030	-29,327	-46,908	-52,507	-30,259
2031	-34,134	-54,596	-61,207	-35,324
2032	-38,571	-61,690	-69,294	-39,997
2033	-42,692	-68,280	-76,860	-44,339
2034	-46,546	-74,443	-83,983	-48,399
2035	-50,173	-80,243	-90,731	-52,220
2036	-53,609	-85,737	-97,160	-55,838
2037	-56,882	-90,971	-103,320	-59,286
2038	-60,019	-95,988	-109,252	-62,590
2039	-63,041	-100,820	-114,993	-65,772
2040	-65,967	-105,499	-120,573	-68,854
2041	-68,814	-110,051	-126,020	-71,850
2042	-71,595	-114,497	-131,358	-74,778
2043	-74,322	-118,858	-136,606	-77,649
2044	-77,007	-123,151	-141,784	-80,475
2045	-79,658	-127,391	-146,905	-83,265
2046	-82,285	-131,591	-151,986	-86,029
2047	-84,893	-135,762	-157,037	-88,773
2048	-87,490	-139,914	-162,071	-91,506
2049	-90,081	-144,058	-167,096	-94,232
2050	-92,672	-148,200	-172,122	-96,957
2051	-95,267	-152,350	-177,157	-99,686
2052	-97,870	-156,512	-182,208	-102,423
2053	-100,485	-160,694	-187,281	-105,173
2054	-103,116	-164,900	-192,384	-107,938
2055	-110,724	-171,333	-197,522	-110,724
2056	-113,531	-175,668	-202,699	-113,531
2057	-116,365	-180,043	-207,922	-116,365
2058	-119,226	-184,462	-213,195	-119,226
2059	-122,118	-188,929	-218,522	-122,118

2060	-125,043	-193,447	-223,907	-125,043
2061	-128,004	-198,020	-229,356	-128,004
2062	-131,003	-202,651	-234,870	-131,003
2063	-134,041	-207,345	-240,455	-134,041
2064	-137,121	-212,103	-246,114	-137,121
2065	-140,245	-216,929	-251,851	-140,245
2066	-143,415	-221,826	-257,668	-143,415
2067	-146,632	-226,797	-263,570	-146,632
2068	-149,899	-231,844	-269,559	-149,899
2069	-153,218	-236,971	-275,640	-153,218
2070	-156,589	-242,180	-281,814	-156,589

Fuente: (SIPRA , 2023)

Tabla 16. Propiedades de cada SDF en SWEET

Name
Site opening year
Site closure year (actual or projected)
Annual disposal: most recent year data or estimate (metric tons)
Landfill or dumpsite?
Year of dumpsite upgrade to controlled dumpsite, or controlled dumpsite upgrade to landfill?
Average waste depth (m)
Existing or planned active gas extraction and flaring or utilization system?
Active gas extraction and flaring or utilization system start-up year?
Existing or planned gas-to-energy project? (landfills only, not dumpsites)
Actual (or assumed future actual) methane recovery (m ³ CH ₄ /year)
Year of actual methane recovery data
Site-specific collection efficiency starting in year with recovery data (%)

Fuente: (SIPRA , 2023)

Tabla 17. Nombre, fechas, y características de cada basurero/relleno (en SWEET)

Basurero/ Relleno	Nombre de SDF	Fecha de operación	Estudio de caracterización	Característica	Análisis.
1	Old dumpsite	1980 - 2005	SIPRA, 2023	Vertedero sin regulación	Estimación de contaminantes antes de la apertura oficial.
2	Controlled dumpsite San Mateo	2006 - 2026	SIRPA, 2023	Basurero controlado	Estimación de emisiones de GEI desde 2006 hasta 2026. Con pozo de venteo y quema de biogás en el 2018.
3	Closed Cell	2027 - 2100	SIPRA, 2023	Relleno Sanitario “San Mateo” clausurado con emisiones de GEI.	Estimación de emisiones GEI con tratamiento aeróbico en futuro de 2027 a 2100.
4	New Cell	2027 – 2100	SIPRA, 2023	Relleno Sanitario con Tratamiento Aeróbico y recuperación de metano.	Estimación de emisiones GEI como propuesta de un nuevo manejo de residuos en el nuevo predio con tratamiento aeróbico y aprovechamiento de metano.

Fuente: (SIPRA , 2023)

ANEXO B: AD SCREENING TOOL

Tabla 18. Información general en ADST

Nombre del proyecto	CATF-Naucalpan
Municipio	Naucalpan
País	México
Información general y preguntas	Respuesta
¿Es la DA planificada un sistema húmedo o seco?	Seco
¿Cuál será la temperatura del reactor?	Sin calentamiento/ Ambiente
¿La instalación del sistema incluirá equipo de deshidratación post-digestión?	No
Si la respuesta es "Sí", ¿cuál es la eficiencia de captura sólida del equipo de deshidratación?	

Fuente: (SIPRA , 2023)

Tabla 19. Materias primas insertadas y producción de biogás en DA en ADST

Lista de materias primas	Tipo de materias primas	Materia prima total (100%)	Materia prima total (80%)	Materia prima total (50%)	Unidades
Específica	Residuos municipales desviados (solo alimentos)	141,416	113,133	70,708	kg/día
Específica	Residuos municipales desviados (todos los orgánicos)	90,822	72,658	45,411	kg/día
Específica	Madera	7,959	6,367	3,980	kg/día
Específica	Papel prensa	4,442	3,554	2,221	kg/día
Específica	Cartón corrugado	29,739	23,791	14,870	kg/día

Específica	Papel y correo no deseado	6,354	5,083	3,177	kg/día
Específica	Papel No Reciclable	9,225	7,380	4,613	kg/día
Producción de Biogás		249,788	199,830	124,894	m³/año
Producción de Metano		124,644	99,715	62,322	m³/año
Producción de Digestato		105,687,225	84,549,780	52,843,612	Kg/año

Fuente: (SIPRA , 2023)

Tabla 20. Materias primas insertadas en SWEET por la producción de biogás y metano simulado en ADST, con 6.4 veces menos de RADA no desviado en la celda

Lista de materias primas	Tipo de materias primas	Materia prima total (50%)	Materia prima total (20%)	Unidades
Específica	Residuos municipales desviados (solo alimentos)	70,708	28,283	kg/día
Específica	Residuos municipales desviados (todos los orgánicos)	45,411	18,164	kg/día
Específica	Madera	3,980	1,592	kg/día
Específica	Papel prensa	2,221	888	kg/día
Específica	Cartón corrugado	14,870	5,948	kg/día
Específica	Papel y correo no deseado	3,177	1,271	kg/día
Específica	Papel No Reciclable	4,613	1,845	kg/día
Producción de Biogás (6.4 veces menos)		19,515	7,806	m³/año
Producción de Metano (6.4 veces menos)		9,738	3,895	m³/año

Fuente: (SIPRA , 2023)

ANEXO C: COMPARACIÓN DE LA COMPOSICIÓN DE RESIDUOS DEL MUNICIPIO DE NAUCALPAN 2017-2023

Tabla 21. Comparación entre estudios Mexan 2017 y SIPRA 2023

Categoría	Subcategoría	Mexan 2017	SIPRA 2023
		%	%
Residuos de comida	Residuos de comida	30.9	22.33
	Hueso	0.5	0.59
Residuos verdes	Residuos de jardinería	10.1	13.77
	Fibra vegetal	0.1	0.76
Madera	Madera	1.3	1.29
Otros residuos orgánicos	Cuero	< 0.1	0.71
	Hule	0.4	0.56
	Algodón	< 0.1	0.19
Textiles	Ropa/textiles	6	6.01
Papel y cartón	Periódico/impresos	0.5	0.72
	Cartón corrugado	0.2	4.82
	Papel	12.2	1.03
	Contenedores encerados	1.2	1.5
Plástico	Contenedores de plástico	3.2	2.73
	Película de plástico (bolsas de supermercado o basura, empaque de alimentos)	7.5	6.37
	Poliestireno (cubiertos o vasos desechables, empaques)	0.9	1.13
	Otro plástico rígido (cubetas, juguetes, muebles y recipientes)	1.1	1.61

Metal	Residuos de metal	0.1	0.24
	Material ferroso	0.7	0.53
	Material no ferroso	<0.1	0.9
Vidrio	Vidrio color	2.3	1.39
	Vidrio transparente	0.9	1.82
Otros	Cerámica	0.2	0.74
	Materiales de la construcción	5.1	1.39
	Neumáticos	-	4.51
	Pañales desechables	5.4	7.87
	Residuos finos (material pequeño indistinguible <2cm)	4	0.53
	Otros residuos municipales	4.8	11.27
Electrónicos	Residuos electrónicos (teléfonos, celulares, computadoras y radio)	0.2	1.31
Peligrosos	Residuos peligrosos (pintura, baterías, sustancias químicas y residuos médicos)	0.2	1.38
TOTAL		100.00	100.00

Fuente: (SIPRA , 2023)

APÉNDICE D: CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS GENERAL

Tabla 22. Clasificación de residuos en SWEET y ADST

CARACTERIZACIÓN				SWEET			AD-screening Tool	
Categoría	Subcategoría	%	Cantidad (kg/día)	Categoría	Cantidad (kg/día)	%	Tipo de insumo	Cantidad (kg/día)
Residuos de comida	Hueso	0.59	3,640.30	Residuos de comida	141,416.40	22.92	Residuos municipales desviados (alimentos únicamente)	141,416
	Residuos de comida	22.33	137,776.10					
Residuos verdes	Algodón	0.19	1,172.30	Residuos verdes	90,822.40	14.72	Residuos municipales desviados (todos los orgánicos)	90,822
	Fibra vegetal	0.76	4,689.20					
	Residuos de jardinería	13.77	84,960.90					
Madera	Madera	1.29	7,959.30	Madera	7,959.30	1.29	Madera	7,959
Papel y cartón	Periódico/impresos	0.72	4,442.40	Papel y cartón	49,791.90	8.07	Periódico/impresos	4,442
	Cartón corrugado	4.82	29,739.40				Cartón corrugado	29,739
	Papel reciclable	1.03	6,355.10				9,255.00	6,355
	Contenedores encerados	1.5	9,255.00				Papel no reciclable	9,255

REPORTE DE EMISIONES DEL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL “RELLENO SANITARIO SAN MATEO” Y
EVALUACIÓN DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS POR MEDIO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Textiles	Cuero	0.71	4,380.70	Textiles	44,917.60	7.28	OTROS (esta parte no se considera para la herramienta)	327,010.00	
	Ropa/textil	4.33	26,716.10						
	Trapo	1.68	10,365.60						
	Hule	0.56	3,455.20						
Plástico	Contenedores de plástico #1-7 identificados	2.73	16,844.10	Plástico	73,052.80	11.84			
	Película de plástico (bolsas de supermercado o basura, empaque de alimentos)	6.37	39,302.90						
	Poliestireno (cubiertos o vasos desechables, empaques)	1.13	6,972.10						
	Otro plástico rígido (cubetas, juguetes, muebles y recipientes)	1.61	9,933.70						
Metal	Residuos de metal	0.24	1,480.80	Metal	10,303.90	1.67			
	Material ferroso	0.53	3,270.10						
	Material no ferroso	0.9	5,553.00						
Vidrio	Vidrio color	1.39	8,576.30	Vidrio	19,805.70	3.21			
	Vidrio transparente	1.82	11,229.40						
Neumáticos	Neumáticos	4.51	27,826.70	Neumáticos	27,826.70	4.51			

REPORTE DE EMISIONES DEL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL “RELLENO SANITARIO SAN MATEO” Y
EVALUACIÓN DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS ORGÁNICOS POR MEDIO DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Otros	Cerámica	0.74	4,565.80	Otros	151,103.30	24.49		
	Materiales de la construcción *	1.39	8,576.30					
	Pañales desechables	7.87	48,557.90					
	Residuos finos (material pequeño indistinguible de < 2cm)	0.53	3,270.10					
	Otros residuos municipales	11.27	69,535.90					
	Residuos electrónicos (teléfonos, celulares, computadoras y radio)	1.31	8,082.70					
	Residuos peligrosos (pintura, baterías, sustancias químicas y residuos médicos)	1.38	8,514.60					
TOTAL		100	617,000.00	TOTAL	617,000.00	100	TOTAL	617,000

Fuente: (SIPRA , 2023)