



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Toluca

**“ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE SITIOS
DE DISPOSICIÓN FINAL EN EL ESTADO DE MÉXICO”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**PRESENTA:
MCI. ELOY MONDRAGÓN ZARZA
No. CONTROL:
D21281384**

**DIRECTORA DE TESIS:
DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL**

**CO-DIRECTORA DE TESIS:
DRA. ELENA REGLA ROSA DOMÍNGUEZ**

METEPEC, ESTADO DE MÉXICO, AGOSTO DE 2025



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, **07/Agosto/2025**
DEPI-3200-349/2025

ELOY MONDRAGÓN ZARZA
CANDIDATO AL GRADO DE DOCTOR
EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTE

De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México y las disposiciones en este Instituto, habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado "**ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL EN EL ESTADO DE MÉXICO**", la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este Instituto, concede la Autorización para que proceda al envío del trabajo final vía correo Institucional.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
"Educación, integridad y ciencia"


JORGE SÁNCHEZ JAIME
ENCARGADO DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp, Archivo
JSJ/mccl



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México,
C.P. 52149. Tels. Dirección: 7222087205, Conmut.: 7222087200
e-mail: info@toluca.tecnm.mx | tecnm.mx | toluca.tecnm.mx





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Toluca
Comunicación y Difusión

Metepec, Edo. de México, 07/Agosto/2025
DEPI-3200-350/2025

DR. JORGE SÁNCHEZ JAIME
ENCARGADO DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN
P R E S E N T E

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la tesis denominada "ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL EN EL ESTADO DE MÉXICO", que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de Doctor en Ciencias Ambientales presenta el C. ELOY MONDRAGÓN ZARZA con número de control D21281384 para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

ATENTAMENTE


Dra. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ
BÉRRIEL
DIRECTORA DE TESIS


Dra. ELENA REGLA ROSA DOMÍNGUEZ
CODIRECTORA DE TESIS


Dra. SYLVIE JEANNE TURPIN MARION
REVISORA DE TESIS


Dra. MARÍA DEL CONSUELO MAÑÓN
SALAS
REVISORA DE TESIS


Dr. FREDY CUELLAR ROBLES
REVISOR DE TESIS


Dra. MARÍA DEL CARMEN CARREÑO DE
LEÓN
REVISORA DE TESIS

ccp. Archivo
JSJ/mcccl



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México,
C.P. 52149, Tels. Dirección: 7222987205, Conmut.: 7222987200
e-mail: info@toluca.tecnm.mx | tecnm.mx | toluca.tecnm.mx



Agradecimientos

En primer lugar, deseo agradecer a la **Dra. María del Consuelo Hernández Berriel**, por su invaluable orientación, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de este proceso. Su experiencia, compromiso y consejos fueron fundamentales para el desarrollo y la culminación de esta tesis.

Extiendo también un profundo y especial agradecimiento a las **Dras. Elena Regla Rosa Domínguez y Sylvie Jeanne Turpin Marion**, por su cercanía y constante disposición. Sus enseñanzas, críticas constructivas y palabras de aliento contribuyeron significativamente a mi crecimiento académico y personal. De igual manera, agradezco al resto de los integrantes de mi Comité de Tesis, por el tiempo, la atención y las valiosas aportaciones que enriquecieron este trabajo.

Reconozco y agradezco de manera especial a SECIHTI (antes CONACYT), por el financiamiento recibido mediante la beca de posgrado, que me permitió dedicarme plenamente a mis estudios y a la investigación que dio origen a este proyecto.

Finalmente, extiendo mi gratitud a la empresa CORES (Constructora y Operadora de Rellenos Sanitarios S.A. de C.V.) y todas aquellas personas e instituciones que, de una u otra forma, contribuyeron al desarrollo de esta tesis. Este trabajo no es solo un logro personal, sino también el reflejo del esfuerzo colectivo de todos quienes me apoyaron en este camino.

RESUMEN

El aumento en la generación de residuos y su inadecuada gestión en el mundo, está originando problemas de contaminación ambiental. En México se recomienda depositar los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en Sitios de Disposición Final (SDF) tipo rellenos sanitarios, sin embargo, se carece de estudios de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) que abarquen los efectos generados durante sus diferentes etapas: construcción, operación y clausura.

Esta tesis presenta el estudio realizado con la herramienta de ACV, para determinar en cuál de las etapas (construcción, operación, clausura) de los SDF se producen los mayores impactos ambientales, seleccionando como escenarios (E) el Relleno sanitario (RESA: E0), Sitio controlado (SC: E1) y Sitio no controlado (SNC: E2). Se estableció como unidad funcional (UF) 1.0 t de RSU y se definieron los límites del sistema. Los inventarios se desarrollaron con base a la UF. Se utilizó SimaPro 10 y la metodología ReCiPe. Se evaluó el Calentamiento Global, Agotamiento del Ozono, Formación de Ozono, Formación de Partículas Finas, Acidificación, Eutrofización, Ecotoxicidad, Toxicidad, Uso de Suelo y Agotamiento de Recursos Fósiles. La construcción del RESA y la del SC son las etapas que presentaron el menor impacto ambiental en la mayoría de las categorías. La etapa de operación de los SDF fue la que generó mayor impacto ambiental, debido a la liberación de compuestos presentes en el biogás, la infiltración de lixiviados, emisiones de maquinaria y vehículos. En contraste, la clausura contribuyó a reducir significativamente dichos impactos, siendo el SNC el sitio que logró la mayor disminución. La comparación entre los datasets del RESA y del SNC de esta tesis y los datasets de Ecoinvent (Sanitary Landfill y Unsanitary Landfill), evidenció que la composición de los RSU y el equipamiento con el que operan los SDF de Ecoinvent produjo mayores impactos ambientales. Los hallazgos de este estudio destacan la importancia de clausurar el SNC como medida para mitigar su impacto ambiental y avanzar hacia los RESA, mediante el quemado o la recuperación de energía a partir del biogás generado.

ABSTRACT

The increase in waste generation and its inadequate management worldwide is causing environmental pollution problems. In Mexico, it is recommended to dispose of Municipal Solid Waste (MSW) in Final Disposal Sites (FDS) such as sanitary landfills; however, there is a lack of Life Cycle Assessment (LCA) studies that cover the effects generated during the different stages: construction, operation, and closure.

This thesis presents a study conducted using the LCA tool to determine in which stage (construction, operation, closure) of the FDS the greatest environmental impacts occur, selecting the following scenarios (E): Sanitary Landfill (RESA: E0), Controlled Site (SC: E1), and Uncontrolled Site (SNC: E2). The functional unit (FU) was defined as 1.0 t of MSW, and the system boundaries were established accordingly. Inventories were developed based on the FU. SimaPro 10 and the ReCiPe method were used. The study evaluated the following categories: Global Warming, Ozone Depletion, Photochemical Ozone Formation, Fine Particulate Matter Formation, Acidification, Eutrophication, Ecotoxicity, Human Toxicity, Land Use, and Fossil Resource Depletion.

The construction stages of the RESA and SC presented the lowest environmental impacts in most categories. The operation stage of the FDS generated the highest environmental impact due to the release of biogas compounds, leachate infiltration, and emissions from machinery and vehicles. In contrast, the closure stage significantly contributed to reducing these impacts, with the SNC achieving the greatest reduction. A comparison between the datasets from this thesis (RESA and SNC) and those from Ecoinvent (Sanitary Landfill and Unsanitary Landfill) revealed that the composition of MSW and the equipment used in Ecoinvent's FDS led to higher environmental impacts.

The findings of this study highlight the importance of closing the SNC as a measure to mitigate its environmental impact and of progressing towards RESA systems through biogas flaring or energy recovery.



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
INTRODUCCIÓN	1
1. FUNDAMENTOS	3
1.1.RESIDUOS SÓLIDOS	3
1.1.1. Clasificación y fuentes de residuos sólidos urbanos	3
1.1.2. Generación de residuos sólidos urbanos	6
1.1.3. Composición de los residuos sólidos urbanos	7
1.1.4. Gestión y manejo integral de los residuos sólidos	10
1.2.DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	13
1.2.1. Tipos de sitios de disposición final	14
1.2.2. Procesos biológicos, químicos y físicos en los Rellenos Sanitarios	15
1.2.3. Normatividad para disposición final	17
1.2.4. Etapas que conforman un Relleno Sanitario	22
1.2.5. Elementos generados en el relleno sanitario que impactan al ambiente	26
1.3.ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA	28
1.3.1. Historia y estructura del análisis del ciclo de vida	28
1.3.2. Fase 1. Definición del objetivo y alcance	29
1.3.3. Fase 2. Análisis de inventarios Ciclo de Vida	29
1.3.4. Fase 3. Evaluación de impacto del ciclo de vida	30
1.3.5. Fase 4. Interpretación del ciclo de vida	32
1.4.CASOS DE ESTUDIO	33
2. MÉTODO	35
2.1.Selección de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos	36
2.2.Definición del objetivo y alcance para el Análisis de Ciclo de Vida	36
2.3.Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida	36



2.4. Evaluación de impactos e interpretación de resultados	39
2.5. Comparación de inventarios	40
3. RESULTADOS	41
3.1. Selección de los sitios de disposición final de Residuos Sólidos Urbanos	41
3.2. Definición del objetivo, alcance, unidad funcional y escenarios para el Análisis de Ciclo de Vida	44
3.3. Desarrollo del Inventario de Ciclo de Vida	47
3.3.1. Inventario de la construcción del Relleno Sanitario	47
3.3.2. Inventario de la operación del Relleno Sanitario	52
3.3.3. Inventario de la clausura del Relleno Sanitario	63
3.3.4. Inventario de la construcción del Sitio Controlado	69
3.3.5. Inventario de la operación del Sitio Controlado	73
3.3.6. Inventario de la clausura del Sitio Controlado	83
3.3.7. Inventario de la operación del Sitio No Controlado	90
3.3.8. Inventario de la clausura del Sitio No Controlado	98
3.3.9. Características en los SDF evaluados	106
3.4. Evaluación de impactos e interpretación de resultados	106
3.4.1. Calentamiento Global	107
3.4.2. Agotamiento del Ozono Estratosférico	108
3.4.3. Formación de Ozono	109
3.4.4. Formación de Partículas Finas	112
3.4.5. Acidificación	113
3.4.6. Eutrofización	115
3.4.7. Ecotoxicidad	116
3.4.8. Toxicidad	119
3.4.9. Uso de suelo	122
3.4.10. Agotamiento de Recursos Fósiles	123
3.4.11. Impacto generado por los SDF	125
3.5. Comparación de inventarios	127
3.5.1. Comparación para Relleno Sanitario	128



3.5.2. Comparación para Sitio No Controlado	130
CONCLUSIONES	133
FUENTES CONSULTADAS	135
ANEXO A. Inventario de la construcción del Relleno Sanitario	151
ANEXO B. Inventario de la maquinaria en construcción del Relleno Sanitario	155
ANEXO C. Generación de biogás en la operación del Relleno Sanitario	166
ANEXO D. Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del Relleno Sanitario	169
ANEXO E. Inventario de la etapa de operación del Relleno Sanitario	171
ANEXO F. Inventario de la maquinaria en operación del Relleno Sanitario	178
ANEXO G. Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del Relleno Sanitario	184
ANEXO H. Inventario de la etapa de clausura del Relleno Sanitario	187
ANEXO I. Inventario de la maquinaria en la clausura del Relleno Sanitario	189
ANEXO J. Inventario de la construcción del Sitio Controlado	198
ANEXO K. Inventario de la maquinaria en la construcción del Sitio Controlado	201
ANEXO L. Generación de biogás en la operación del Sitio Controlado	211
ANEXO M. Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del Sitio Controlado	214
ANEXO N. Inventario de la etapa de operación del Sitio Controlado	216
ANEXO O. Inventario de la maquinaria en la operación del Sitio Controlado	223
ANEXO P. Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del Sitio Controlado	229
ANEXO Q. Inventario de la etapa de clausura del Sitio Controlado	232
ANEXO R. Inventario de la maquinaria en la clausura del Sitio Controlado	235
ANEXO S. Generación de biogás en la operación del Sitio No Controlado	244
ANEXO T. Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del Sitio No Controlado	245
ANEXO U. Inventario de la etapa de operación del Sitio No Controlado	246
ANEXO V. Inventario de la maquinaria en la operación del Sitio No Controlado	252



ANEXO W. Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del Sitio No Controlado	259
ANEXO X. Inventario de la etapa de clausura del Sitio No Controlado	263
ANEXO Y. Inventario de la maquinaria en la clausura del Sitio No Controlado	265



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Generación estimada de RSU por entidad federativa en México	7
Figura 1.2	Composición de los residuos a nivel global	8
Figura 1.3	Composición de los residuos por nivel de ingresos a nivel global	9
Figura 1.4	Composición porcentual promedio de los residuos en México	10
Figura 1.5	Sitio de disposición final de los residuos sólidos	13
Figura 1.6	Vías de biodegradación predominantes para la descomposición de las principales clases orgánicas en los residuos sólidos	16
Figura 1.7	Diseño y disposición de las celdas	24
Figura 2.1	Esquema de actividades del método	35
Figura 2.2	Proceso para la determinación del ICV de compuestos en el biogás.	38
Figura 2.3	Proceso para la determinación del ICV de compuestos en los lixiviados	39
Figura 3.1	Ubicación de los SDF	41
Figura 3.2	RESA ubicado en Tenango del Valle	42
Figura 3.3	SC ubicado en Aculco	43
Figura 3.4	SNC ubicado en Xalatlaco	43
Figura 3.5	Límites del Sistema escenario E0	45
Figura 3.6	Límites del Sistema escenario E1	46
Figura 3.7	Límites del Sistema escenario E2	46
Figura 3.8	Macrocela	57
Figura 3.9	Composición promedio de los RSU dispuestos en la macrocela	58
Figura 3.10	Composición de los RSU dispuestos en el SC	78
Figura 3.11	Composición de los RSU vertidos en el SNC.	93
Figura 3.12	Impacto de los SDF en el Calentamiento Global.	107
Figura 3.13	Impacto de los SDF en el Agotamiento del Ozono Estratosférico	108
Figura 3.14	Impacto de los SDF en la Formación de Ozono, salud humana	110



Figura 3.15	Impacto de los SDF en la Formación de Ozono, ecosistemas terrestres	110
Figura 3.16	Impacto de los SDF en la Formación de Partículas Finas	112
Figura 3.17	Impacto de los SDF en la Acidificación	113
Figura 3.18	Impacto de los SDF en la Eutrofización	115
Figura 3.19	Impacto de los SDF en la Ecotoxicidad Terrestre	117
Figura 3.20	Impacto de los SDF en la Ecotoxicidad de Agua Dulce	118
Figura 3.21	Impacto de los SDF en la Toxicidad Humana Cancerígena	120
Figura 3.22	Impacto de los SDF en la Toxicidad Humana No Cancerígena	120
Figura 3.23	Impacto de los SDF en el Uso de Suelo	122
Figura 3.24	Impacto de los SDF en el Agotamiento de Recursos Fósiles	123



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Fuentes de generación de residuos sólidos	5
Tabla 1.2	Generación per cápita de residuos en México	6
Tabla 1.3	Componentes del gas producido en el relleno sanitario	17
Tabla 1.4	Elementos generados en el RESA que impactan al ambiente	26
Tabla 1.5	Casos de estudio evaluados a través del ACV	33
Tabla 3.1	Datos relevantes de cada SDF	44
Tabla 3.2	Inventario del Bulldozer en la construcción del RESA	48
Tabla 3.3	Inventario de la Excavadora 320 en la construcción del RESA.	49
Tabla 3.4	Inventario de la Retroexcavadora 580 en la construcción del RESA	49
Tabla 3.5	Inventario del Compactadora de Rodillos Vibratorios en la construcción del RESA	50
Tabla 3.6	Construcción del RESA en función de 1.0 t de RSU	51
Tabla 3.7	Inventario del Compactador de RSU en la operación del RESA	53
Tabla 3.8	Inventario de la Retroexcavadora 580 en la operación del RESA	54
Tabla 3.9	Inventario de la Excavadora 320 en la operación del RESA	54
Tabla 3.10	Inventario de emisiones de los vehículos recolectores en el RESA	55
Tabla 3.11	Operación del RESA en función de 1.0 t de RSU	56
Tabla 3.12	Emisiones Biogás y CH ₄ en las etapas del RESA	58
Tabla 3.13	Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del RESA	59
Tabla 3.14	Inventario de la Excavadora 320 en la clausura del RESA	63
Tabla 3.15	Inventario del Bulldozer en la clausura del RESA.	64
Tabla 3.16	Inventario del compactador de rodillos vibratorios en la clausura del RESA	64
Tabla 3.17	Clausura del RESA en función de 1.0 t de RSU	65
Tabla 3.18	Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del RESA	66
Tabla 3.19	Inventario de la Excavadora 320 en la construcción del SC	70



Tabla 3.20	Inventario del Bulldozer en la construcción del SC	71
Tabla 3.21	Inventario del Compactador de Rodillos Vibratorios en la construcción del SC	71
Tabla 3.22	Construcción del SC en función de 1.0 t de RSU	72
Tabla 3.23	Inventario del Compactador de RSU 826 en la operación del SC	74
Tabla 3.24	Inventario de la Retroexcavadora 580 en la operación del SC	74
Tabla 3.25	Inventario de la Excavadora 320 en la operación del SC	75
Tabla 3.26	Inventario de emisiones de los vehículos recolectores en el SC	76
Tabla 3.27	Operación del SC en función de 1.0 t de RSU	77
Tabla 3.28	Emisiones Biogás y CH ₄ en las etapas del SC	79
Tabla 3.29	Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del SC	79
Tabla 3.30	Inventario de la Excavadora 320 en la clausura del SC	83
Tabla 3.31	Inventario del Bulldozer en la clausura del SC	84
Tabla 3.32	Inventario del Compactador de Rodillos Vibratorios en la clausura del SC	84
Tabla 3.33	Clausura del SC en función de 1.0 t de RSU	85
Tabla 3.34	Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del SC	86
Tabla 3.35	Inventario del Cargador frontal en la operación del SNC	90
Tabla 3.36	Inventario del transporte de los RSU dentro del SNC	91
Tabla 3.37	Operación del SNC en función de 1.0 t de RSU	92
Tabla 3.38	Emisiones Biogás y CH ₄ en las etapas del SNC	94
Tabla 3.39	Compuestos en el biogás y lixiviados en la operación del SNC	94
Tabla 3.40	Inventario de la Excavadora 320 en la clausura del SNC	98
Tabla 3.41	Inventario de la Retroexcavadora 580 en la clausura del SNC	99
Tabla 3.42	Inventario del Bulldozer en la clausura del SNC	99
Tabla 3.43	Inventario del Compactador de rodillos vibratorios en la clausura del SNC	100
Tabla 3.44	Clausura del SNC en función de 1.0 t de RSU	101



Tabla 3.45	Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del SNC	102
Tabla 3.46	Características en los SDF evaluados	106
Tabla 3.47	Impacto generado por los SDF	125
Tabla 3.48	Comparación del ICV de composiciones de RSU	128
Tabla 3.49	Comparación de resultados del RESA con ambos ICV	129
Tabla 3.50	Comparación de resultados del SNC de Ecoinvent y Tesis	131



INTRODUCCIÓN

La urbanización, el desarrollo económico, el crecimiento de la población, el aumento de los niveles de vida y la demanda de bienes y servicios, han provocado la generación de una gran cantidad de RSU (Minghua *et al.*, 2009). Asimismo, su inadecuada gestión está originando problemas de contaminación ambiental como el Calentamiento Global, el Agotamiento del Ozono, de los Recursos naturales, aparición de peligros para la salud humana, por la transmisión de enfermedades a través de la reproducción de vectores (Cossu y Stegmann, 2019).

La última estimación del Banco Mundial reveló que actualmente el mundo genera 2.01 billones de toneladas de residuos anualmente y se espera que para 2050 aumente a 3.40 billones de toneladas (Kaza *et al.*, 2018). Aunado a ello, las prácticas de aprovechamiento y disposición final de los residuos varían significativamente según el nivel de ingresos y la región; donde los países más desarrollados y de altos ingresos, tienden a centrarse en la valorización y aprovechamiento de los RSU, entre tanto los países de ingresos medio-alto, comúnmente envían los residuos al Relleno Sanitario (RESA). En los países de bajos ingresos los residuos son quemados a cielo abierto o arrojados en carreteras, terrenos abiertos, vías fluviales o en Sitios No Controlados (SNC), y por lo tanto sólo una pequeña cantidad de residuos es enviada al RESA (Nanda y Berruti, 2021; Kaza *et al.*, 2018).

En México en 2012, el 74% los RSU generados a nivel nacional se dispuso en RESA y Sitios Controlados (SC), mientras que el 21% se depositó en SNC y el 5% fue reciclado (SEMARNAT, 2012). En 2020, el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos reportó que en 2017 se generaron 120,128 t/día de residuos de las cuales 86,352.7 t/día ingresaron en 2,203 SDF (SEMARNAT, 2020). Pese a los esfuerzos que se han realizado para que los RSU y los Residuos de Manejo Especial (RME) se dispongan en SDF, se carece de estudios que demuestren que estos sitios



son los más adecuados, garantizando la protección al ambiente y la minimización de riesgos para la salud.

Por estas razones, para comprender la magnitud que cada factor está provocando al medio ambiente, se ha prestado especial interés en la herramienta de ACV, que toma en cuenta los impactos ambientales, desde la producción de materias primas hasta la eliminación final (ISO, 2006a, 2006b). Hay trabajos como el de Fernández-Nava y colaboradores (2014) en Asturias (España), donde revisaron e hicieron la comparación de seis escenarios para la gestión de los RSU, incluyendo el relleno sanitario, bajo el enfoque del ACV; el escenario donde se involucró el relleno sanitario fue el menos favorable. Asimismo, Yay (2015) realizó en Sakarya (Turquía), una comparación de tres escenarios mediante el ACV para la gestión de RSU, siendo el relleno sanitario y la incineración las peores alternativas. Si bien en México se cuenta con trabajos de ACV para la GIRSU, como los reportados por: Silva *et al.* (2019); Tsydenova *et al.* (2018); Aldana-Espitia *et al.* (2017); Tsydenova (2017); Escamilla-Alvarado *et al.* (2016); Güereca *et al.* (2015), el ACV ha sido escasamente estudiado en la etapa de disposición final de los RSU, lo que ha llevado a un limitado número de trabajos en el área de estudio.

Conforme a lo anterior, el objetivo de este trabajo es determinar los impactos ambientales generados en SDF (RESA, SC y SNC) de RSU, mediante el ACV de las etapas de construcción, operación y clausura. Así mismo, se compone de tres secciones: la primera trata sobre los fundamentos en cuanto a los RSU, su manejo y el ACV; en la segunda se describen los pasos de la metodología implementada; en la tercera se detallan los resultados de los diferentes escenarios analizados e inventarios; y finalmente se presentan las conclusiones.



1. FUNDAMENTOS

Los residuos son generados por seres humanos, animales o plantas, o por cualquier proceso natural o artificial, asimismo la globalización de la economía se ha traducido en la disponibilidad de una mayor variedad de productos, impulsando el aumento de esta generación de residuos sólidos (Kumar, 2020).

1.1. RESIDUOS

Según el artículo 5 de la Ley General de prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), los residuos son aquellos materiales cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final (DOF, 2021).

1.1.1. Clasificación y fuentes de los residuos

En México, según el artículo 1 de la LGPGIR, los residuos se pueden clasificar en función de sus características y origen en: Residuos Sólidos Urbanos (RSU), Residuos de Manejo Especial (RME) y residuos peligrosos (RP) (DOF, 2021). Según el artículo 5 de la misma Ley, éstos se definen de la manera siguiente:

- a) Residuos sólidos urbanos (RSU). Los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, establecimientos o en la vía pública (DOF, 2021).
- b) Residuos de Manejo Especial (RME). Aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como RSU, o que son producidos por grandes generadores de RSU (DOF, 2021).



- c) Residuos Peligrosos (RP). Cualquier desperdicio o combinación de desperdicios de forma sólida, líquida, gaseosa o semisólida contenida que, debido a su cantidad, concentración o características físicas, químicas o infecciosas, pueda causar un aumento en la mortalidad o de enfermedades; representan un peligro para el medio ambiente cuando se tratan, almacenan, transportan o eliminan de manera inadecuada (DOF, 2021; DOF, 2006)

En la Tabla 1.1 se presentan las diferentes fuentes de generación de residuos sólidos con los tipos de residuos que generan.

Tabla 1.1 Fuentes de generación de residuos sólidos.

FUENTES	LUGAR DE GENERACIÓN DE RESIDUOS	TIPOS DE RESIDUOS SÓLIDOS
Residencial	Casas, departamentos	Residuos de alimentos, papel, plásticos, vidrio, aluminio, latas, pañales, textiles
Instituciones comerciales	Restaurantes, oficinas, hoteles, mercados, escuelas, hospitales	Cartón, plásticos, desperdicios de comida, residuos metálicos, electrónica de consumo
Industrial (sin residuos de proceso)	Construcción, fabricación, luz y manufactura pesada, refinerías, plantas de energía	Papel, cartón, plásticos, madera, vidrio, cenizas, residuos peligrosos
Construcción y demolición	Sitios de reparación de carreteras, nuevos sitios de construcción	Madera, acero, hormigón, piedra

Fuente: Kumar, 2020.



Tabla 1.1 Fuentes de generación de residuos sólidos (continuación).

FUENTES	LUGAR DE GENERACIÓN DE RESIDUOS	TIPOS DE RESIDUOS SÓLIDOS
Servicios municipales (excluidas las instalaciones de tratamiento)	Parques, playas, áreas recreativas, limpieza de calles	Residuos generales de parques, residuos callejeros
Sitios de plantas de tratamiento	Agua, aguas residuales y proceso de tratamiento industrial	Residuos de plantas de tratamiento, compuesto principalmente de lodos y otros materiales residuales
Residuos agrícolas	Campos de cultivo, viñedos, lecherías, granjas	Residuos de alimentos en mal estado, residuos agrícolas

Fuente: Kumar, 2020.



1.1.2. Generación de residuos sólidos urbanos

El conocimiento de la generación de RSU es vital para diseñar y operar los elementos funcionales asociados a su gestión. Para evaluar los requisitos actuales y futuros para la presupuestación, operación y procesamiento de RSU, es importante recopilar información sobre la fuente y la tasa de generación de residuos en un área (Williams, 2013; Worrell *et al.*, 2012). La generación de residuos sólidos varía de un lugar a otro, dependiendo de varios factores, como los antecedentes económicos, la densidad de población, la industrialización, el estado de gestión existente y el estilo de vida (Kumar, 2020; Sharma y Jain, 2020).

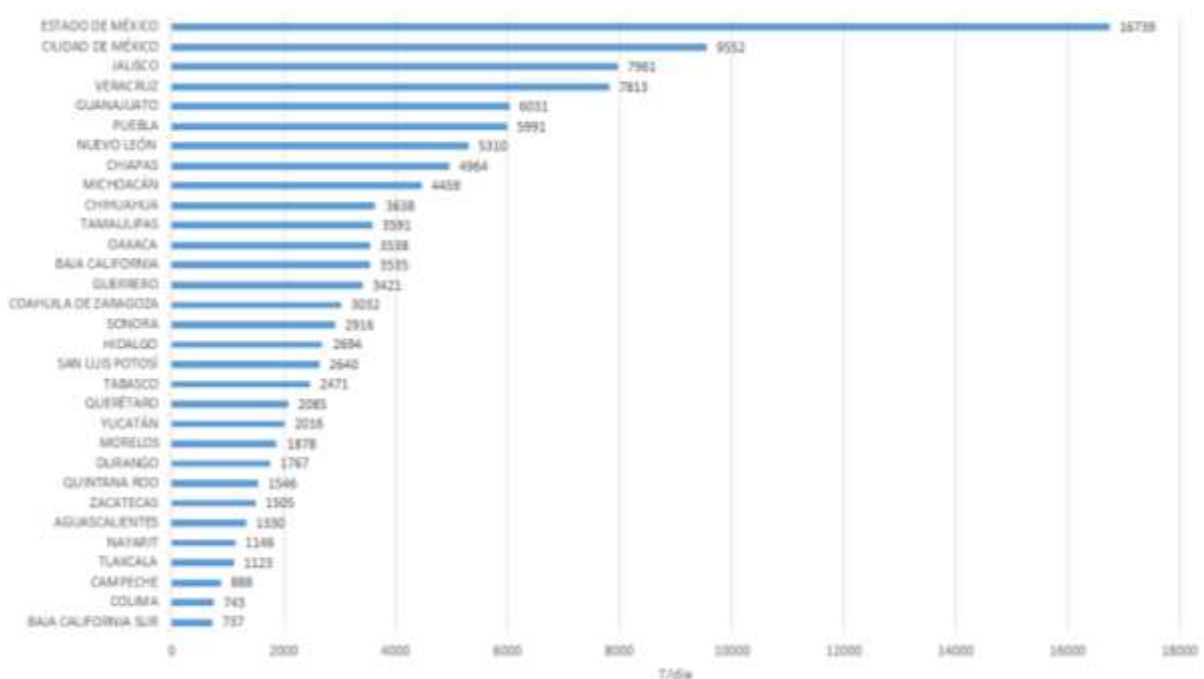
La generación per cápita es un indicador que se utiliza para estimar la cantidad de residuos producidos en las localidades, con el fin de poder dimensionar las instalaciones o equipos necesarios para su recolección, aprovechamiento o disposición final (SEMARNAT, 2020). En la Tabla 1.2, se presenta la generación promedio per cápita de residuos en México.

Tabla 1.2 Generación per cápita de residuos en México.

GENERACIÓN PER CÁPITA	Kg/hab/día
Origen domiciliario	0.653
No domiciliario	0.291
Total	0.944

Fuente: SEMARNAT, 2020.

En el año 2015, la generación de RSU a nivel nacional fue de 120,128 t/día. En la Figura 1.1 se incluyen los datos de la generación de RSU por entidad; el Estado de México, la Ciudad de México y Jalisco generan la mayor cantidad de RSU en el país (SEMARNAT, 2020).



Fuente: SEMARNAT, 2020.

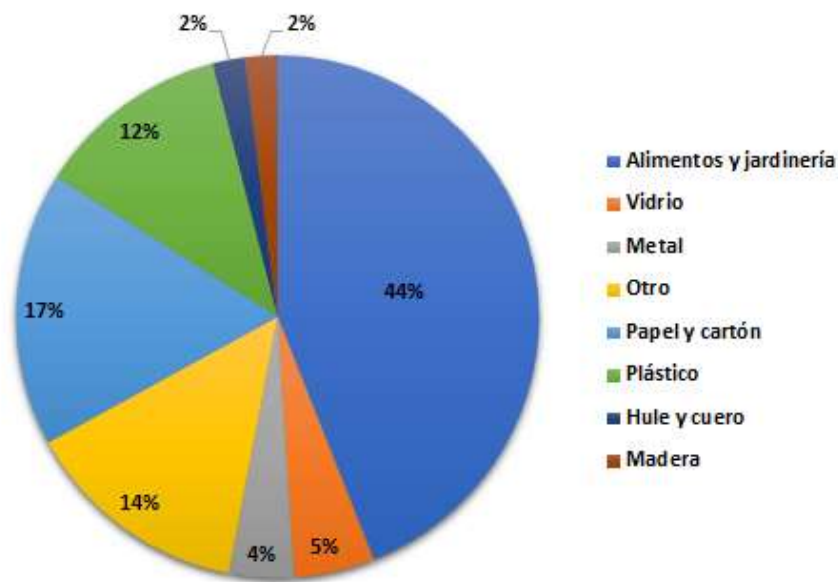
Figura 1.1 Generación estimada de RSU por entidad federativa en México.

1.1.3. Composición de los residuos sólidos urbanos

El conocimiento de la composición de los residuos es fundamental para implementar las políticas de reducción más convenientes y para elegir los procesos adecuados de tratamiento y eliminación. La composición de los RSU varía sustancialmente con las condiciones socioeconómicas de los generadores, y la ubicación, la temporada, y los usos y costumbres en la localidad bajo estudio (Yay, 2015). El muestreo y la clasificación también se utilizan para determinar los subproductos o fracciones de los residuos aprovechables o que puedan ser valorizados, y cuáles serían los sistemas más adecuados para ello (SEMARNAT, 2020).

La composición de los residuos se determina a través de las muestras tomadas en estaciones de transferencia o sitios de disposición final, clasificándose en categorías predefinidas después que las mismas son pesadas (Sharma y Jain, 2020). A nivel global, los alimentos y residuos de jardinería representan el 44% de los residuos

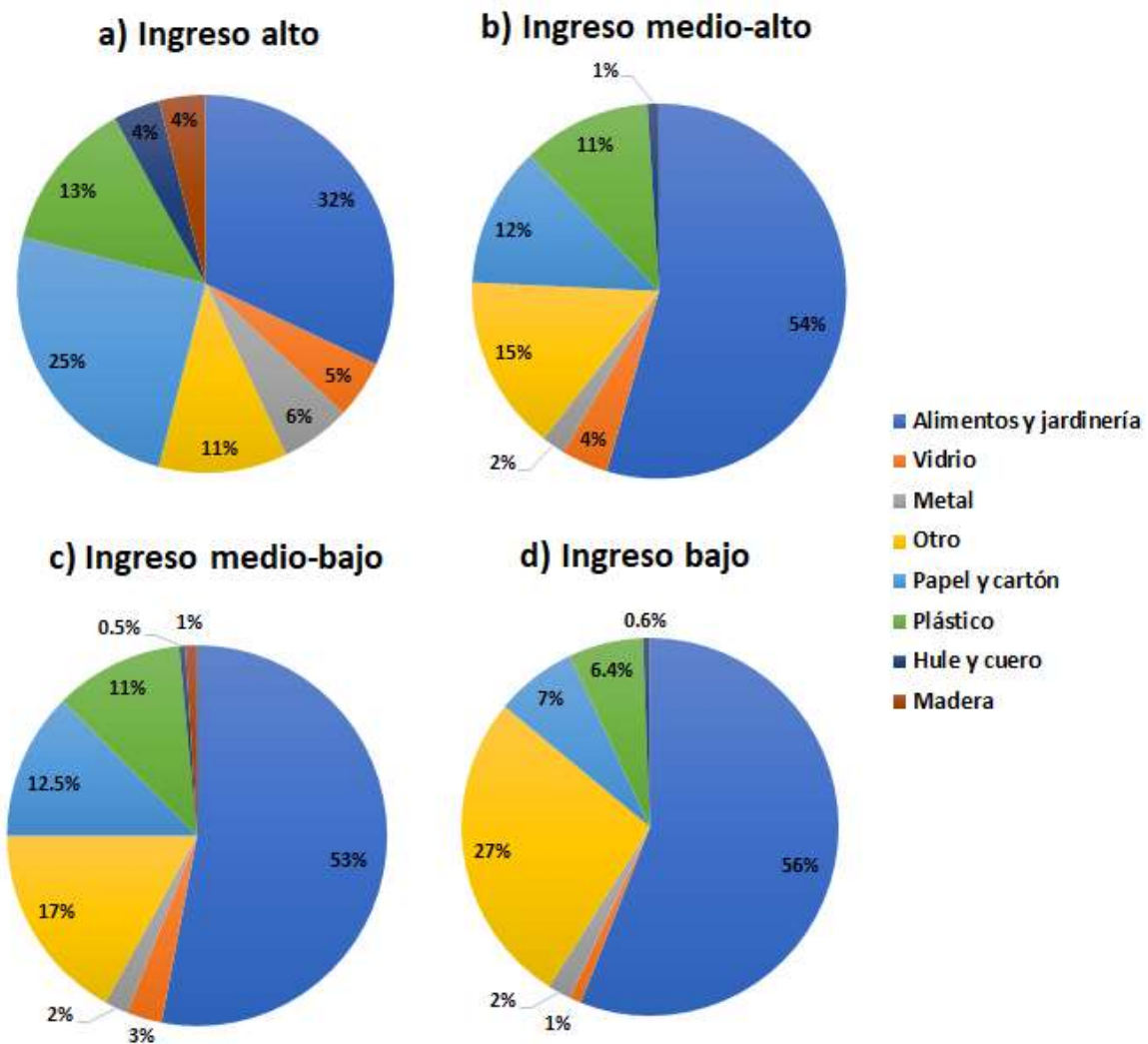
(Figura 1.2). Los materiales reciclables secos (plástico, papel y cartón, metal y vidrio) representan otro 38% de los residuos.



Fuente: Kaza *et al.*, 2018.

Figura 1.2 Composición de los residuos a nivel global.

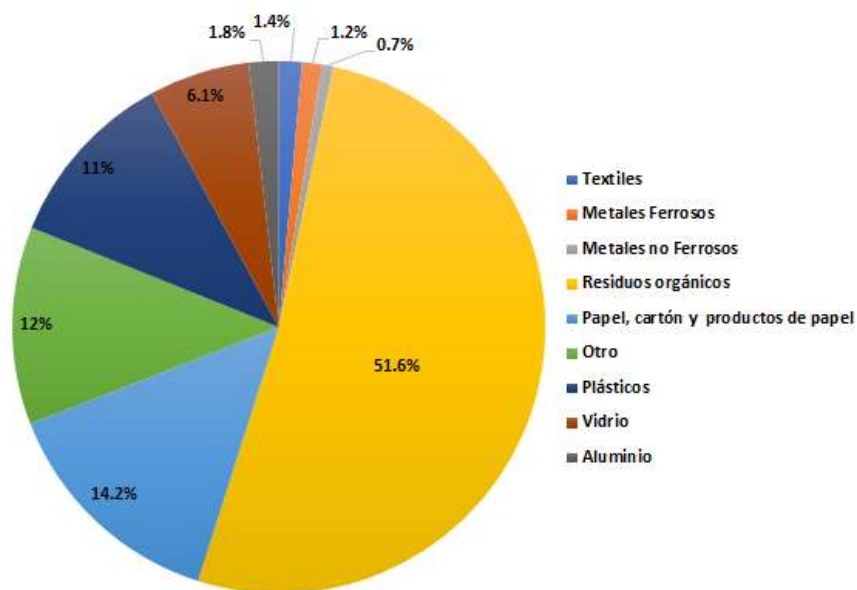
Como ya se comentó, la composición de los residuos varía considerablemente según el nivel de ingresos; en la Figura 1.3, se puede apreciar como el porcentaje de materia orgánica en los residuos disminuye a medida que aumentan los niveles de ingresos. Los bienes consumidos en los países de ingresos más altos incluyen más materiales como papel y plástico, que en países de ingresos más bajos.



Fuente: Kaza *et al.*, 2018.

Figura 1.3 Composición de los residuos por nivel de ingresos a nivel global.

En México la composición promedio de residuos consiste en 35% de residuos aprovechables, 51.6% de residuos orgánicos, y 13.4% de otro tipo de residuos (Figura 1.4) (SEMARNAT, 2019).



Fuente: SEMARNAT, 2019.

Figura 1.4 Composición porcentual promedio de los residuos en México.

1.1.4. Gestión y manejo integral de los residuos sólidos

Según el artículo 5 de la LGPGIR, la Gestión Integral de los RSU (GIRSU) es un conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final; a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región (DOF, 2021).

Por su parte, según el mismo artículo 5 de la LGPGIR, el Manejo Integral de los Residuos Sólidos Urbanos (MIRSU) consiste en las actividades de reducción en la fuente, separación, reutilización, reciclaje, co-procesamiento, tratamiento biológico, químico, físico o térmico, acopio, almacenamiento, transporte y disposición final de residuos, individualmente realizadas o combinadas de manera apropiada, para adaptarse a las condiciones y necesidades de cada lugar, cumpliendo objetivos de



valorización, eficiencia sanitaria, ambiental, tecnológica, económica y social (DOF, 2021).

Un sistema integral de gestión de RSU incluiría un sistema de recolección de residuos optimizado con una clasificación eficiente, reciclaje de materiales, tratamiento biológico de materiales orgánicos que producirá compost o biogás, tratamiento térmico (como la incineración con recuperación de energía), y finalmente relleno sanitario (McDougall *et al.*, 2001).

Tchobanoglous *et al.* (2012), consideran seis elementos funcionales en un sistema de manejo de RSU:

- a) Generación de residuos. La generación de los residuos abarca aquellas actividades en las que los materiales se identifican sin valor y se desechan o se juntan para su eliminación.
- b) Manejo y separación, almacenamiento y procesamiento de residuos en el origen. El manejo y la separación de residuos involucran las actividades asociadas con el manejo de residuos hasta que se colocan en contenedores de almacenamiento para su recolección. La manipulación también comprende el movimiento de contenedores cargados hasta el punto de recolección. La separación de los componentes es un paso importante en el manejo y almacenamiento de los residuos sólidos en la fuente.
- c) Recolección. Incluye tanto la recolección de residuos sólidos y materiales reciclables como el transporte de éstos, al lugar donde se vacía el vehículo de recolección, como una instalación de procesamiento de materiales, una estación de transferencia o un SDF.



- d) Transferencia y transporte. El elemento funcional de la transferencia y transporte comprende dos pasos: la transferencia de residuos del vehículo de recolección más pequeño al equipo de transporte más grande, y el transporte posterior de los residuos; generalmente a largas distancias, a un sitio de procesamiento o de disposición final.
- e) Separación, procesamiento y transformación de los RSU. La separación y procesamiento de los residuos que han sido separados en la fuente y la separación de los residuos mezclados generalmente ocurre en instalaciones de recuperación de materiales, estaciones de transferencia, instalaciones de combustión y sitios de disposición. Los procesos de transformación se utilizan para reducir el volumen y el peso de los residuos que requieren eliminación y para recuperar los productos de conversión y la energía. La fracción orgánica de los RSU se puede transformar mediante una variedad de procesos químicos y biológicos, junto con la recuperación de energía.
- f) Disposición final. La disposición mediante relleno sanitario o esparcimiento en tierra es el destino final de todos los residuos sólidos, ya sean residuos residenciales recolectados y transportados, materiales residuales de instalaciones de recuperación de material, residuos de la combustión, compost u otras sustancias de diversas instalaciones de procesamiento de residuos sólidos.

1.2. DISPOSICIÓN FINAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

El SDF es el lugar donde se depositan los RSU y RME en forma definitiva (DOF, 2004) (Figura 1.5).



Fuente: Kaza *et al.*, 2018.

Figura 1.5 Sitio de disposición final de los residuos sólidos.

En México existen 2,203 SDF, en los cuales se ingresan 86,352.7 t/día de residuos. Prácticamente todos los estados del país cuentan con varios de estos sitios, a excepción de la ciudad de México. De igual manera, hay estados que no cuentan con SDF sino con rellenos controlados y tiraderos a cielo abierto (SEMARNAT, 2020).



1.2.1. Tipos de sitios de disposición final

En México, los SDF existentes para los RSU son:

- a) Relleno Sanitario (RESA). Es una instalación que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los RSU y de los RME, la cual está diseñada y operada para minimizar los impactos ambientales y de salud pública. Este tipo de relleno cumple con la normatividad señalada en la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004) (Instituto de Ingeniería UNAM, 2009). A su vez, los RESA, según la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, se clasifican en cuatro tipos considerando la cantidad de residuos que reciben diariamente: Tipo A, para instalaciones que reciben igual o más de 100 t/día; Tipo B, entre 50 y 100 t/día; Tipo C, entre 10 y 50 t/día; y Tipo D, cuando reciben menos de 10 t/día. (DOF, 2004).
- b) Sitio Controlado (SC). Es un sitio inadecuado de disposición final que cumple con las especificaciones de un relleno sanitario en lo que se refiere a obras de infraestructura y operación, pero no cumple con las especificaciones de impermeabilización (DOF, 2004; Ojeda-Benítez *et al.*, 2003).
- c) Sitio No Controlado (SNC). Es el lugar donde los residuos se depositan directamente al suelo sin ningún tipo de control sin cubrirlos con tierra (Rojas-Valencia *et al.*, 2012; Ojeda-Benítez *et al.*, 2003). Estos sitios de disposición son una fuente importante de contaminación del aire y del agua, que deberán cerrarse y reemplazarse con el RESA que cumple con los estándares convencionales (Cossu *et al.*, 2019).

En la Unión Europea, se utilizan clasificaciones de los rellenos sanitarios en función del tipo de residuos a recibir y la peligrosidad de éstos (Cossu *et al.*, 2019; Williams, 2013):



- a) Rellenos para residuos inertes no peligrosos.
- b) Rellenos RSU.
- c) Rellenos para residuos peligrosos.

1.2.2. Procesos biológicos, químicos y físicos en los sitios de disposición final

Dentro de los SDF ocurren procesos biológicos, químicos y físicos, que promueven la degradación de los residuos y resultan en la producción de lixiviados y gases.

El ecosistema de los SDF es bastante diverso debido a la naturaleza heterogénea de los residuos depositados y la variedad de características operativas del lugar. La fracción orgánica de los residuos depositados en los SDF, está compuesta principalmente de proteínas, lípidos, carbohidratos (celulosa y hemicelulosa) y ligninas, que, a su vez, se puede clasificar en una fracción fácilmente biodegradable (residuos de alimentos y jardines) y una fracción moderadamente biodegradable (papel, textiles y madera).

La diversidad del ecosistema promueve la estabilidad; sin embargo, el sistema está fuertemente influenciado por las condiciones ambientales como el contenido de humedad, la temperatura, el pH, la presencia de toxinas y el potencial de oxidación y reducción (Danthurebandara *et al.*, 2012).

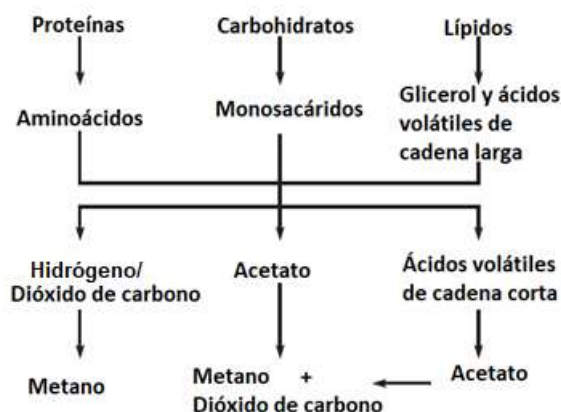
La estabilización de los residuos se desarrolla en cinco fases secuenciales y distintas (Worrell *et al.*, 2012):

- a) Fase de ajuste inicial. Esta fase está asociada con la deposición inicial de los RSU y la acumulación de humedad en los RESA. Se observa un período de aclimatación hasta que se desarrolla suficiente humedad para mantener una comunidad microbiana activa.



- b) Fase de transición. En la fase de transición se produce la transformación del ambiente aeróbico al anaeróbico.
- c) Fase de formación de ácido. La hidrólisis continua de residuos sólidos seguida de la conversión microbiana del contenido orgánico biodegradable da como resultado la producción de ácidos orgánicos volátiles intermedios a altas concentraciones a lo largo de esta fase.
- d) Fase de formación del metano. Los ácidos intermedios son consumidos por bacterias metanogénicas y se convierten en metano y dióxido de carbono.
- e) Fase de maduración. Durante el estado final de estabilización del SDF, los nutrientes y el sustrato disponible se vuelven limitantes, la producción de metano (CH_4) cae drásticamente y el lixiviado a menudo se presenta en concentraciones más altas de ácidos húmicos y fúlvicos.

En la Figura 1.6, se presentan las vías de biodegradación predominantes para la descomposición de las principales clases orgánicas en los residuos sólidos (Letcher *et al.*, 2019).



Fuente: Worrell *et al.*, 2012.

Figura 1.6 Vías de biodegradación para la descomposición de los residuos orgánicos.



Los gases que se producen en los RESA contienen amoníaco (NH_3), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), metano (CH_4), nitrógeno (N_2) y oxígeno (O_2) (Balat *et al.*, 2009). La distribución porcentual típica de los gases encontrados en un RESA se presenta en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Componentes del gas producido en un RESA.

COMPONENTE	PORCENTAJE
Metano	50-60
Dióxido de carbono	40-60
Nitrógeno	2-5
Oxígeno	0.1-1.0
Amoniaco	0.1-1.0
Sulfuros, disulfuros, mercaptanos	0-1.0
Hidrógeno	0-0.2
Monóxido de carbono	0-0.2
Constituyentes Traza	0.01-0.6

Fuente: Worrell *et al.*, 2012.

El lixiviado es el resultado del agua inicialmente contenida en los residuos, la filtración de precipitaciones, escorrentías incontroladas y agua de riego en el relleno sanitario. El lixiviado contiene una variedad de componentes químicos derivados de la solubilización de los materiales depositados en el relleno sanitario y de los productos de las reacciones químicas y bioquímicas que ocurren dentro del RESA (Worrell *et al.*, 2012; Ojeda-Benítez *et al.*, 2003).

1.2.3. Normatividad para disposición final de residuos

En México, la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) fue promulgada el 28 de enero de 1988 y la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) el 8 de octubre de 2003; mientras que la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, que contiene especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un SDF de RSU y de RME, fue publicada el 20 de octubre de 2004. Estos tres documentos son de suma importancia para la GIRSU



y han tenido diversas revisiones para su adecuación y mejora, teniéndose las últimas el 20 de octubre de 2004, 13 mayo de 2016 y el 18 de enero de 2021, respectivamente (DOF, 2021; Cortinas *et al.*, 2016; DOF, 2016; DOF, 2004).

A continuación, se presentan las normas relacionadas al tema de residuos:

- a) NOM-004-SEMARNAT-2002. Establece las especificaciones y los límites máximos permisibles de contaminantes en los lodos y biosólidos provenientes del desazolve de los sistemas de alcantarillado urbano o municipal, de las plantas potabilizadoras y de las plantas de tratamiento de aguas residuales, con el fin de posibilitar su aprovechamiento o disposición final y proteger al medio ambiente y la salud humana (DOF, 2003).
- b) NOM-098-SEMARNAT-2002. Establece las especificaciones de operación, así como los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera para las instalaciones de incineración de residuos (SEMARNAT, 2004).
- c) NOM-161-SEMARNAT-2011. Establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a Plan de Manejo; el listado de los mismos, el procedimiento para la inclusión o exclusión a dicho listado; así como los elementos y procedimientos para la formulación de los planes de manejo (DOF, 2014).
- d) NMX-AA-015-1985. Establece el método de cuarteo para los RSU y la obtención de especímenes para los análisis en el laboratorio (SEMARNAT, 1985a).
- e) NMX-AA-016-1984. Establece el método llamado de Estufa que determina el porcentaje de humedad, contenido en los residuos sólidos municipales; se basa en la pérdida de peso que sufre la muestra cuando se somete a las condiciones de tiempo y temperatura (SEMARNAT, 1984a).



- f) NMX-AA-018-1984. Establece el método de prueba para la determinación de cenizas de los RSU (SEMARNAT, 1984b).
 - g) NMX-AA-019-1985. Establece un método para determinar el peso volumétrico de los RSU en el lugar donde se efectuó la operación de "cuarteo" (SEMARNAT, 1985b).
 - h) NMX-AA-021-1985. Establece el método para la determinación de materia orgánica en los RSU (SEMARNAT, 1985c).
 - i) NMX-AA-022-1985. Establece la selección y el método para la cuantificación de subproductos contenidos en los RSU (SEMARNAT, 1985d).
 - j) NMX-AA-024-1984. Establece el método Kjeldahl para determinar la cantidad de nitrógeno total contenido en los RSU. Por este procedimiento se convierten todos los componentes del nitrógeno oxidados tales como nitratos y nitritos a nitrógeno reducido a sulfato de amonio (SEMARNAT, 1984c).
 - k) NMX-AA-025-1984. Establece el método potenciométrico para la determinación del valor del pH en los residuos sólidos. El cual se basa en la actividad de los iones hidrógeno presentes en una solución acuosa de residuos sólidos al 10% (SEMARNAT, 1984d).
 - l) NMX-AA-031-1976. Establece el método para la determinación de azufre transformado en ácido sulfúrico durante la combustión de residuos sólidos en el interior de una bomba calorimétrica, para fin de corrección (SEMARNAT, 1976a).
 - m) NMX-AA-032-1976. Establece el método fotométrico para la determinación de fósforo total contenido en residuos sólidos (SEMARNAT, 1976b).
-



- n) NMX-AA-033-1985. Especifica un método de prueba para determinar el poder calorífico superior de los RSU, empleando una bomba calorimétrica de los diferentes tipos para planear y diseñar los sistemas adecuados de disposición final de los mismos (SEMARNAT, 1985e).
 - o) NMX-AA-052-1985. Estable un método de preparación de muestras para su análisis (SEMARNAT, 1985f).
 - p) NMX-AA-061-1985. Especifica el método para determinar la generación de los RSU a partir de un muestreo estadístico aleatorio (SEMARNAT, 1985g).
 - q) NMX-AA-067-1985. Especifica un método para la determinación de la relación Carbono/Nitrógeno de los RSU, plantear y diseñar los sistemas adecuados para la disposición final de los mismos (SEMARNAT, 1985h).
 - r) NMX-AA-068-1986. Especifica un método para la determinación de Hidrógeno de los RSU, para planear y diseñar sus sistemas de disposición final (SEMARNAT, 1986a).
 - s) NMX-AA-080-1986. Especifica un método para la determinación del porcentaje de Oxígeno en Materia Orgánica presente en los RSU, que se evalúa por la transformación a Monóxido de Carbono, que posteriormente reacciona con Pentóxido de Yodo, formando Yodo absorbido en solución alcalina para ser valorada con Tiosulfato de Sodio, con el objeto de diseñar sus sistemas de manejo y disposición final (SEMARNAT, 1986b).
 - t) NMX-AA-091-1987. Establece un marco de referencia en cuanto a los términos más empleados en el ámbito de la prevención y control de la contaminación del suelo, originada por residuos sólidos (SEMARNAT, 1987).
-



- u) NMX-AA-092-1984. Establece el método para la determinación de azufre transformándolo en sulfato de sodio mediante el tostado de los residuos sólidos en presencia de oxilita (SEMARNAT, 1984e).
- v) NMX-AA-094-1985. Especifica un método de prueba para determinar el fósforo total contenido en los RSU y no es aplicable a productos que generan soluciones coloridas como son las del tipo denominado escorias básicas (SEMARNAT, 1985i).
- w) NMX-AA-180-SCFI-2018. Que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos finales (SEMARNAT, 2018).



1.2.4. Etapas que conforman un Relleno Sanitario

El RESA se proyectará en sus etapas de diseño, construcción, operación y clausura, según cómo se configurará y utilizará después de que se agote su capacidad de disposición de los RSU (Townsend *et al.*, 2015).

- a) Diseño. Su propósito es orientar el proyecto y planificar su construcción; es un documento tangible que se puede presentar a las autoridades municipales o al ayuntamiento y la comunidad a la hora de promover el proyecto y buscar fondos para el mismo. El diseño básico mostrará la delimitación del área total del sitio y del terreno a rellenar, indicará el método de construcción, el origen de la tierra de cobertura y el trazado de las obras de infraestructura. Además, las especificaciones del proyecto incluirán el cálculo de la generación de residuos por habitante y día, la vida útil del RESA, altura de relleno de cada capa/celda, el volumen de compactación de los RSU, su uso final y el costo global estimado del proyecto (Williams *et al.*, 2013).

Los factores importantes que se deben considerar en el diseño del RESA contemplan: el diseño y construcción de celdas, revestimiento del RESA, sistema de recolección de lixiviados, tratamiento de lixiviados, sistema de recolección y extracción de gas, instalaciones de quema de gas, instalaciones de monitoreo de gases y aguas subterráneas, desagües perimetrales, zanjas de drenaje, material de recubrimiento intermedio, cobertura final y caminos de acceso pavimentados (Tchobanoglous *et al.*, 2012).

- b) Construcción. Una vez diseñado el RESA, el siguiente paso es ejecutar el proyecto. A la hora de planificar la construcción y avance del RESA, es necesario disponer de una serie de planos para consulta para conocer: el diseño del proyecto, el plano general de ubicación de las obras, modificaciones al terreno (trazado inicial del emplazamiento) y detalles de las obras de infraestructura.



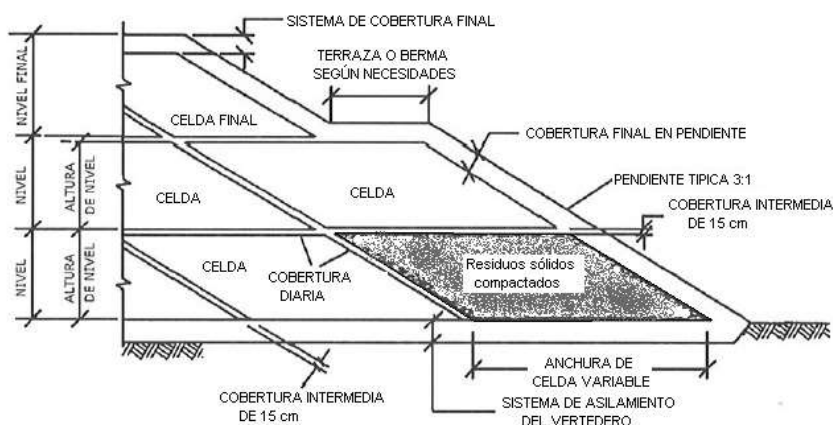
También se requiere el plano y perfiles de las zanjas o terraplenes, que indiquen la forma de excavación de las zanjas y la disposición del relleno de los terraplenes (Worrell *et al.*, 2012).

Las celdas de trabajo dentro del RESA son subdivisiones o compartimentos, separadas con capas de cobertura intermedias para independizarlas una de otra. Con esta división se persigue el aislamiento de las partes para optimizar el control de las emisiones de cada una, minimizando la generación de lixiviados, el área y tiempo de exposición de residuos reduciendo por tanto las exigencias de cobertura y minimizando el riesgo de arrastre de residuos con el viento (SEMARNAT, 2009).

El ancho de una celda de trabajo equivale al frente de trabajo necesario para que los vehículos recolectores puedan descargar los residuos al mismo tiempo y los equipos compactadores trabajen sin toparse (Figura 1.7) (Townsend *et al.*, 2015).

Su largo está definido por la cantidad de residuos que llega al relleno en un día y el grado de compactación logrado ya que los residuos son compactados mecánicamente de 600 kg/m³ a 950 kg/m³. Se debe jugar con estas dimensiones y la relación largo/ancho para seguir siempre una superficie cuadrada para homogeneizar el comportamiento de los residuos en el interior y minimizar las necesidades de tierra de cobertura.

El espesor de la cobertura de tierra diaria de las celdas debe de ser de 15-25 cm. La cubierta final deberá ser de 60 cm de espesor mínimo.



Fuente: SEMARNAT, 2009.

Figura 1.7 Diseño y disposición de las celdas.

- c) Operación. El RESA se ejecuta siguiendo un plan general de operaciones preestablecido o con la orientación de un manual de operaciones, el cual debe ser lo suficientemente flexible para que el supervisor actúe por iniciativa propia cuando haya que enfrentar situaciones inesperadas. El contenido mínimo del manual de operación debe incluir: la tipología de residuos, cantidad de residuos recibida diariamente/anualmente, métodos e instrumentos para el control, mantenimiento y monitoreo ambiental de lixiviados, biogás y pluviales, mecanismos para el control de admisión de residuos, procedimientos de operación, recepción, depósito y procesamiento de los residuos, dimensiones de las celdas, grado de compactación, periodicidad y tipo de la cobertura, perfil de puestos y equipos, reglamento interno, plan propuesto para el cierre y clausura y un plan de mantenimiento posterior (Tchobanoglous *et al.*, 2012; SEMARNAT, 2009).

El tipo, tamaño y cantidad de equipo requerido dependerá del tamaño del RESA y del método de operación. Los tipos de equipo que se han utilizado en los RESA incluyen tractores de orugas, raspadores, compactadores, dragalinas y motoniveladoras (Worrell *et al.*, 2012).



- d) Clausura. El cierre del RESA y la atención posterior al cierre son los términos que se utilizan para describir lo que sucederá en el futuro con el RESA terminado. Cuando el RESA, o una de sus celdas, ha sido completamente utilizada, se debe llevar a cabo el sellado final. Este proceso representa el último paso para transformar el relleno en un sistema controlado a largo plazo, cuyo objetivo es minimizar las emisiones, prevenir la infiltración de agua pluvial y facilitar la restauración ambiental y paisajística del sitio. Previo a la acometida del sellado, se debe haber elaborado un plan de clausura y sellado del sitio que forma parte del plan de explotación del RESA (Townsend *et al.*, 2015; Worrell *et al.*, 2012).



1.2.5. Elementos generados en el relleno sanitario que impactan al ambiente

En la Tabla 1.4, se presentan los elementos generados en el RESA que impactan al ambiente, durante las etapas de construcción, operación y clausura.

Tabla 1.4 Elementos generados en el RESA que impactan al ambiente.

ELEMENTO	ORIGEN DEL ELEMENTO	CATEGORÍA AFECTADA
Emisión de gases de efecto invernadero (GEI) (metano, dióxido de carbono, etc.) ^{1,3,5,8}	Emisiones de motores, emisión difusiva de la superficie del relleno sanitario, avería de la planta de tratamiento de biogás, funcionamiento de cobertura intermedia/cobertura diaria, fallo del sistema de cubierta superior, quema del biogás, pozos de gas con fugas y la emisión directa del biogás a la atmósfera sin ser quemado.	Aire, clima.
Emisión de gases contaminantes del RESA (compuestos orgánicos distintos al metano, compuestos orgánicos volátiles, CFC, H ₂ S, etc.) ^{1,3,5,8}	Emisiones puntuales de bengalas y motores, emisión difusiva de la superficie del RESA, funcionamiento de cobertura intermedia/cobertura diaria, fallo del sistema de cubierta superior.	Aire, salud humana, biodiversidad.
Emisión de polvo y partículas (PM ₁₀) ¹	Suministro de material inerte, transporte de residuos (tráfico), funcionamiento de cobertura intermedia/cobertura diaria, sistema de cubierta superior, descarga de residuos.	Aire, salud humana, biodiversidad.
Tráfico ¹	Instalación e inicio de construcción, transporte de residuos.	Aire, salud humana, biodiversidad.



Tabla 1.4 Elementos generados en el RESA que impactan al ambiente (continuación).

ELEMENTO	ORIGEN DEL ELEMENTO	CATEGORÍA AFECTADA
Emisiones de olores ¹	Sin cobertura intermedia/operación de cobertura diaria, sin cubierta superior final, mal funcionamiento de la planta de tratamiento de lixiviados o del sistema de recogida de gases, baja compactación, descarga de residuos.	Aire, salud humana, biodiversidad.
Ruido ¹	Instalación e inicio de construcción, transporte de material para la construcción, transporte de residuos, compactación de residuos.	Salud humana, biodiversidad.
Consumo de material y energía para la construcción y operación de instalaciones del RESA ¹	Instalación e inicio de la construcción.	Biodiversidad.
Emisión de lixiviados (contaminación de agua y suelo por presencia de metales pesados, bacterias, materia orgánica, eutrofización y sustancias tóxicas) ¹⁻⁵	Concentración de contaminantes originados por lixiviados en aguas subterráneas y superficiales, costuras de geomembrana defectuosas y/o compactación de arcilla, daño de instalación, no salvaguardar el revestimiento, obstrucción del sistema de recolección y eliminación de lixiviados, fallo geotécnico, rotura de tuberías, niveles freáticos elevados en los RESA, que se filtran por pendientes o pozos.	Suelo, salud humana, biodiversidad, aguas superficiales y subterráneas.

Fuente: ¹Cossu *et al.*, 2019; ²Machorro-Román *et al.*, 2020; ³Makarenko *et al.*, 2017; ⁴Medus *et al.*, 2018; ⁵Ludwig *et al.*, 2003; ⁶Samadder *et al.*, 2016; ⁷Sánchez-Arias *et al.*, 2019; ⁸Vaverková *et al.*, 2019.



1.3. ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

“El ACV trata los aspectos ambientales e impactos potenciales a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o un servicio, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, utilización, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final (es decir, de la cuna a la tumba)” (ISO, 2006a, 2006b). Es una herramienta de gestión ambiental que se utiliza para comprender y comparar cómo se proporciona un producto o servicio "desde la cuna hasta la tumba" (Pires *et al.*, 2019; McDougall *et al.*, 2001).

1.3.1. Historia y estructura del Análisis del Ciclo de Vida

La primera evaluación del ACV se le atribuyó a Coca-Cola en 1969, tratando de determinar si usar envases de vidrio o plástico para entregar su producto, dadas las compensaciones entre los dos materiales (Matthews *et al.*, 2015). A principios de la década de 1990, varios grupos de investigadores debatieron la cuestión del uso de vasos de papel o plástico, el estudio se centró en el uso de energía y se estimó que un vaso de vidrio usado y lavado 15 veces requería la misma cantidad de energía que la fabricación de 15 vasos de papel. Los análisis encontraron que las implicaciones ambientales de elegir papel versus plástico eran muy similares. La lección más importante no fue si elegir un material sobre otro, sino más bien insistir en que el material elegido se fabrique en una planta respetuosa con el medio ambiente (Klöppfer *et al.*, 2014).

En los años 90, se estandarizó la norma ISO 14040, para llevar a cabo el ACV, así mismo las normas ISO 14041, ISO 14042 y la ISO 14043, enfocadas a gestión ambiental y ACV. En el año 2006, se realizaron actualizaciones y se anularon las ISO 14041, ISO 14042 y la ISO 14043, que se sustituyeron por la ISO 14044 (Eurofins Envira Ingenieros Asesores, 2021).



La estructura del ACV consta de cuatro fases distintas de acuerdo con la norma ISO 14040: definición de objetivos y alcance, análisis de inventario de ciclo de vida, evaluación del impacto del ciclo de vida e interpretación del ciclo de vida (ISO, 2006a).

1.3.2. Fase 1. Definición del Objetivo y Alcance

La definición del objetivo establece la razón para realizar un estudio específico, las opciones que se compararán y el uso previsto de los resultados (ISO, 2006a).

El alcance, por su parte, describe los parámetros dentro de los cuales se llevará a cabo el estudio, y éste debe ser compatible con los objetivos. Al definir el alcance de un estudio de ACV, se deben describir: las funciones de los sistemas de productos; la unidad funcional (UF); el sistema de producto a estudiar; los límites del sistema de productos; los procedimientos de asignación; los tipos de indicadores, la metodología de evaluación del impacto del ciclo de vida y la interpretación del ciclo de vida subsiguiente que se utilizará; los requerimientos de datos; los supuestos; las limitaciones; y los requisitos iniciales de calidad de los datos (ISO, 2006a).

En el ACV, el Sistema de Producto es la serie de operaciones interconectadas que ocurren durante el ciclo de vida de un producto o de un servicio definido. La UF es la base sobre la que se compararán los productos o servicios, ésta proporciona el punto de referencia con el que se relacionan tanto las entradas como las salidas y permite una comparación clara de los resultados de ACV. Los límites del sistema definen cuáles etapas, operaciones, entradas y salidas se incluyen en la evaluación y cuáles se omiten. La inclusión implica definir exactamente dónde se encuentran los límites o "cuna y tumba" del ciclo de vida (ISO, 2006a).

1.3.3. Fase 2. Análisis de Inventarios de Ciclo de Vida

Esta fase consiste en contabilizar todas las entradas y salidas de materiales y energía durante todo el ciclo de vida del producto o servicio. El procedimiento implica describir



el ciclo de vida como una serie de pasos y luego calcular las entradas y salidas para cada uno de estos pasos. Esto equivale a construir un balance de materiales y energía para cada paso del ciclo de vida. El análisis de todas las entradas y salidas para cada etapa del ciclo de vida se puede combinar para obtener el Inventario de Ciclo de Vida (ICV) general (ISO, 2006a).

1.3.4. Fase 3. Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida

La fase de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) proporciona una perspectiva de los problemas ambientales y de recursos para todo el ciclo de vida del producto o servicio. Para lograr esto, la EICV asigna los resultados del ICV a categorías de impacto específicas seleccionadas (una categoría de impacto se utiliza para agrupar ciertos resultados del ICV que están asociados con un problema ambiental en particular), que convierten los resultados del ICV en resultados de indicadores (ISO, 2006a). Para cada categoría de impacto, se seleccionan los indicadores apropiados y se utiliza un modelo de caracterización para calcular los resultados de los indicadores. Las categorías de impacto de punto medio (centradas en el impacto ambiental) son las más utilizadas, ya que presentan una menor incertidumbre al modelar una pequeña parte del mecanismo ambiental, mientras que las categorías de punto final (centradas en daños) pueden presentar una incertidumbre significativa. Sin embargo, las categorías de punto final son más fáciles de entender e interpretar para la toma de decisiones (PRé, 2013; PRé, 2020).

A continuación, se presentan las principales metodologías de evaluación de impactos y las categorías aplicadas en los estudios de ACV en el mundo.

a) Metodologías Europeas:

- CML-IA. Categorías de punto medio: Agotamiento de los Recursos Abióticos, Cambio Climático, Agotamiento del Ozono Estratosférico, Toxicidad Humana,



Ecotoxicidad Acuática de Agua Dulce, Ecotoxicidad Marina, Ecotoxicidad Terrestre, Potencial de Creación de Ozono Fotoquímico, Acidificación, Eutrofización.

- EDIP 2003. Categorías de punto medio: Cambio Climático, Destrucción de la Capa de Ozono, Acidificación, Eutrofización, Smog Fotoquímico, Ecotoxicidad Acuática, Ecotoxicidad del Suelo, Toxicidad Humana, Residuos, Uso de Recursos.
- ILCD 2011. Categorías de punto medio: Cambio climático, Agotamiento de la Capa de Ozono, Toxicidad Humana (efectos cancerígenos/no cancerosos), Material Particulado/Inorgánicos Respiratorios, Radiaciones Ionizantes (salud humana/ecosistemas), Formación de Ozono Fotoquímico, Acidificación, Eutrofización Terrestre/Acuática, Ecotoxicidad (agua dulce, terrestre y marina), Uso del Suelo, Agotamiento de Recursos (agua), Falta de Recursos (mineral, fósil y renovable); Categorías de punto final: Daño a la Salud Humana, Daño a la Calidad del Ecosistema, Pérdida de Biodiversidad, Pérdida de Recursos, Daño al Medio Ambiente Creado por el Hombre.
- Impact 2002+. Categorías de punto medio: Toxicidad Humana, Efectos Respiratorios, Radiación Ionizante, Destrucción de la Capa de Ozono, Smog Fotoquímico, Ecotoxicidad Acuática/del Suelo, Acidificación Acuática/del Suelo, Acidificación y Eutrofización del Suelo, Ocupación del Suelo, Cambio Climático, Energías no Renovables, Uso de Recursos; Categorías de daño o punto final: Salud Humana, Calidad del Ecosistema, Cambio Climático, Recursos.
- Eco-indicator 99. Categorías de punto medio: Carcinogénicos, Respiratorios Orgánicos/Inorgánicos, Cambio Climático, Radiación, Destrucción de la Capa de Ozono, Ecotoxicidad, Acidificación y Eutrofización, Uso de Suelo, Uso de Recursos Minerales, Uso de Combustibles Fósiles.

b) Metodología Global:

- ReCiPe. Categorías de punto medio: Cambio climático, Agotamiento del Ozono Estratosférico, Radiación Ionizante, Formación de Ozono (salud humana), Formación de Partículas Finas, Formación de Ozono (ecosistemas terrestres), Acidificación Terrestre, Eutrofización del Agua Dulce/Marina, Ecotoxicidad



Terrestre/del Agua Dulce/Marina, Toxicidad Cancerígena Humana/No Cancerígena, Uso de la Tierra, Escasez de Recursos Minerales, Escasez de Recursos Fósiles, Uso del Agua; Categorías de punto final: Salud Humana, Ecosistemas, Escasez de Recursos.

c) Metodología Americana:

- TRACI. Categorías de punto medio: Agotamiento de la Capa de Ozono, Calentamiento Global, Smog, Acidificación, Eutrofización, Carcinógenos/No Cancerígenos, Efectos Respiratorios, Ecotoxicidad, Agotamiento de los Combustibles Fósiles.

d) Metodología de un solo indicador:

- IPCC. Potencial de Calentamiento Global.

1.3.5. Fase 4. Interpretación del Ciclo de Vida

La interpretación implica una revisión de todas las fases del proceso del ACV y una verificación de que todos los supuestos son consistentes. Se debe verificar la calidad de los datos y realizar un análisis de sensibilidad para establecer la importancia de la incertidumbre de los datos sobre los resultados del estudio. Este procedimiento incluye informes transparentes, ya que estos resultados se pueden utilizar como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con la fase de definición de objetivos y alcances (ISO, 2006a).



1.4. CASOS DE ESTUDIO

En la Tabla 1.5, se presentan diferentes casos de estudio evaluados a través del ACV, para determinar el impacto ambiental asociado al manejo y disposición final de RSU, para diferentes escenarios. Los trabajos de Caicedo-Concha *et al.* (2021), Wang *et al.* (2021) y Ziegler-Rodríguez *et al.* (2019), se enfocaron en la evaluación del impacto ambiental de los SDF. Por otro lado, los de Ouedraogo *et al.* (2024), Avarand *et al.* (2023), Bajracharya *et al.* (2022), Cheela *et al.* (2021), Khandelwal *et al.* (2019) y Slorach *et al.* (2019), evaluaron la combinación de diferentes tecnologías para el manejo de los RSU.

Tabla 1.5 Casos de estudio evaluados a través del ACV.

AUTORES	PAÍS	Escenarios (E)	PRINCIPALES RESULTADOS
Caicedo-Concha <i>et al.</i> (2021)	Colombia	E0: RESA sin tratamiento de biogás e infiltración de lixiviados.	El E3 tuvo los menores impactos ambientales
		E1: RESA con tratamiento de lixiviados, captura y venteo del biogás.	
		E2: RESA con quema del biogás y tratamiento de lixiviados.	
		E3: RESA con recuperación de energía y tratamiento de lixiviados.	
Wang <i>et al.</i> (2021)	Estados Unidos	E1: RESA con venteo pasivo.	La captura del biogás del RESA logró reducir las emisiones entre un 20 % y un 52 %.
		E2: RESA con quemado de biogás.	
		E3: RESA con recuperación de energía.	
Ziegler-Rodríguez <i>et al.</i> (2019)	Perú	E1: RESA con quemado de biogás.	El E2 redujo considerablemente los GEI en comparación con el E1 y E3.
		E2: RESA con recuperación de energía.	
		E3: SNC.	



Tabla 1.5 Casos de estudio evaluados a través del ACV (continuación).

AUTORES	PAÍS	Escenarios (E)	PRINCIPALES RESULTADOS
Ouedraogo <i>et al.</i> (2024)	Estados Unidos	E1: RESA E2: Gasificación	El E2 generó los más bajos impactos ambientales
Avarand <i>et al.</i> (2023)	Iran	E1: Compostaje, reciclaje, RESA. E2: Compostaje, RESA. E3: Compostaje, incineración, RESA. E4: Compostaje, reciclaje, incineración, RESA.	E4 tuvo los efectos más positivos sobre el medio ambiente.
Bajracharya <i>et al.</i> (2022)	Nepal	E1: RESA. E2: Compostaje, RESA. E3: Reciclaje, compostaje, RESA. E4: Reciclaje, DA, RESA.	E4 mostró la mayor ventaja ambiental.
Cheela <i>et al.</i> (2021)	India	E1: SNC E2: RESA E3: RESA con venteo E4: DA, RESA E5: Incineración, RESA	El E4 fue la opción con menores impactos.
Khandelwal <i>et al.</i> (2019)	India	E1: Compostaje combinado con RESA. E2: Instalación de recuperación de material (MRF) y compostaje combinado con RESA. E3: MRF y DA combinado con RESA. E4: MRF, DA y compostaje combinado con RESA.	El E2 tuvo los menores impactos ambientales sobre el calentamiento global, la toxicidad humana, la eutrofización y las categorías de potencial de creación de ozono fotoquímico.
Slorach <i>et al.</i> (2019)	Reino Unido	E1: DA E2: Compostaje E3: Incineración E4: RESA	E1 tuvo los impactos ambientales más bajos.



2. MÉTODO

El método de ACV aplicado para la realización de este trabajo se basó en las normas ISO 14040 y 14044 (ISO, 2006a, 2006b), el cual comprende las cuatro fases: a) definición de objetivo y alcance, b) inventario de ciclo de vida, c) evaluación de los impactos ambientales y d) interpretación de resultados. Como se muestra en la Figura 2.1, se incorporó una etapa previa para la selección de los SDF a estudiar y una etapa de cierre para la comparación de inventarios,.

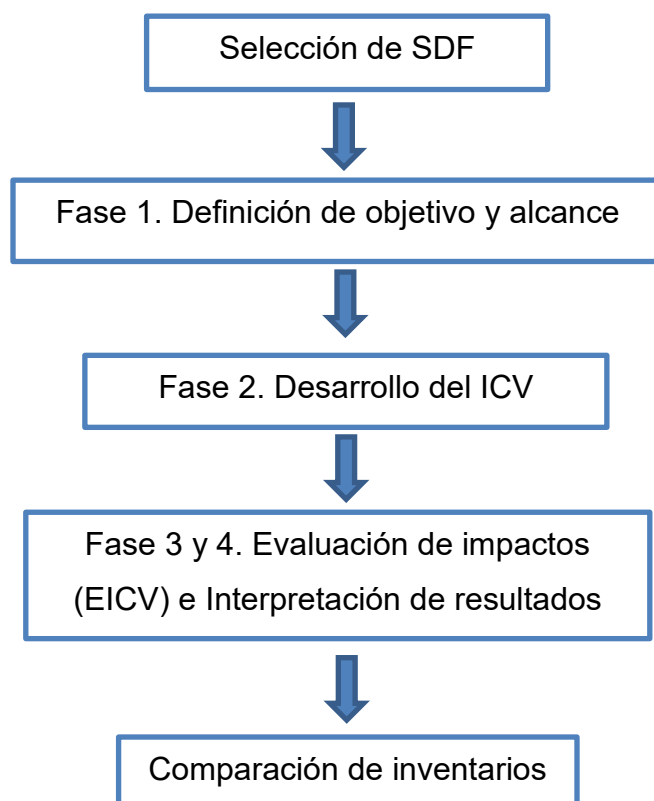


Figura 2.1 Esquema de actividades del método.



2.1. SELECCIÓN DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Tomando como base los SDF reportados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para el Estado de México y la información disponible con respecto a su emplazamiento, se contactó a los responsables de tres RESA, tres SC y tres SNC. Se analizó la información reunida y de acuerdo con su grado de colaboración se eligió un tipo de cada SDF, de los cuales se recabó información histórica y actual de sus instalaciones.

2.2. FASE 1. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE PARA EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El objetivo se definió con base en las opciones a comparar, que en este trabajo se consideraron la construcción, la operación y la clausura para cada tipo de sitio. El alcance se estableció de acuerdo con los parámetros dentro de los cuales se llevó a cabo el estudio. La UF se especificó conforme a las entradas y las salidas del sistema, debido a que es el punto de referencia con el que se relacionan éstas. Asimismo, se definieron los límites del sistema y se elaboró un diagrama de bloques para cada escenario.

2.3. FASE 2. DESARROLLO DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

Para el desarrollo del ICV de las etapas de construcción, operación y clausura para los escenarios considerados, se recabó información primaria y secundaria.

La información de campo (datos primarios) se consiguió con los responsables de los SDF elegidos y comprendió los siguientes aspectos: la superficie ocupada por los SDF, la capacidad de almacenamiento de los RSU, la duración de las etapas de construcción, la operación y clausura de los SDF, el tipo de maquinaria y vehículos



utilizados, el tiempo de funcionamiento de la maquinaria, el consumo de diésel, la cantidad de energía eléctrica requerida, la cantidad de agua utilizada, los materiales empleados en las diferentes etapas, la distancia de traslado de materiales, así como la cantidad y capacidad de los vehículos recolectores que ingresaron a los SDF. La composición de los RSU fue caracterizada *in-situ*.

En cuanto a las emisiones producidas por las actividades de construcción en las instalaciones, emisiones de gases y líquidos liberadas por la maquinaria, generación de gases y lixiviados producidos por los RSU, se estimaron a partir de diferentes reportes (Ziegler-Rodriguez *et al.*, 2019; Manfredi *et al.*, 2009; Ménard *et al.*, 2004). Las emisiones de biogás, lixiviados y, emisiones de los vehículos y maquinaria no se analizaron *in-situ*. Las estimaciones realizadas fueron las siguientes:

- a) Para la estimación de las emisiones generadas por la maquinaria en los SDF, se utilizó la metodología propuesta por la EPA (2010 y 2014); mientras que, para las emisiones de los vehículos recolectores dentro del sitio, se utilizó la base de datos de Ecoinvent (Ecoinvent, 2023).
- b) En cuanto a la determinación de la generación de biogás por la degradación de los RSU, se utilizó el Modelo Mexicano de Biogás 2.0 (MMB 2.0) (Ludwig *et al.*, 2009). Para ello, se utilizaron caracterizaciones reportadas por estudios *in-situ* y por el INEGI (López-Gasca, 2021; Martínez-Morales, 2021; INEGI, 2021). Para la estimación del biogás generado en cada SDF por la UF, se tomó en cuenta el biogás producido durante 100 años (operación y clausurado), dividiéndose el total entre las toneladas de RSU depositadas.
- c) Se calcularon los compuestos presentes en el biogás en las etapas de operación y clausura de los SDF, a partir de compuestos reportados en artículos (Olesen & Damgaard, 2014; Beylot *et al.*, 2013; Doka, 2009) (Figura 2.2). En la operación del RESA y SC, se consideró que el 65% del biogás fue emitido a través de la

cobertura intermedia y el 35% liberado por los pozos de venteo (Anexo D y M); mientras que, para el clausurado, el 75% del biogás capturado fue quemado y el 25% restante liberado a través de emisiones fugitivas por la cobertura final (Olesen & Damgaard, 2014) (Anexo G y P). Para el caso del SNC, las emisiones son liberadas a través de los RSU y la cobertura final (Anexo T y W), la cual no necesariamente se aplica en todos los sitios de este tipo.

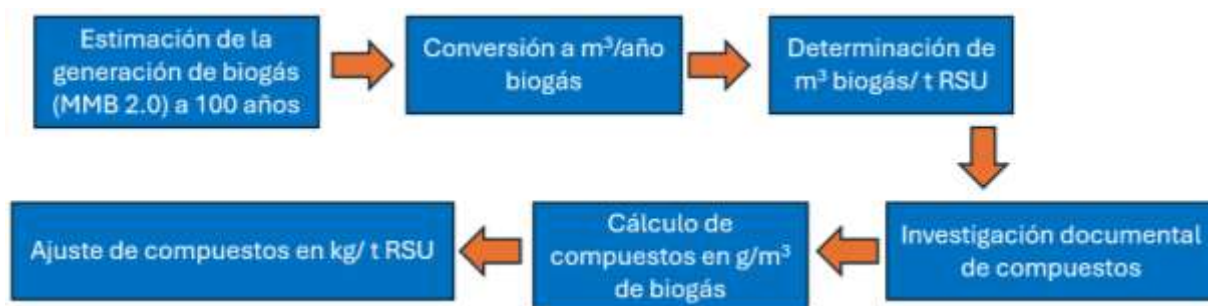


Figura 2.2 Proceso para la elaboración de compuestos en el biogás.

- d) Para la estimación de los lixiviados generados en la macrocelda en las etapas de operación y clausura, se utilizó el modelo del balance hídrico propuesto por Tchobanoglous *et al.* (2012), adaptado a las condiciones de los sitios en México. Para la estimación del lixiviado generado en cada SDF por la UF, se tomó en cuenta el lixiviado producido en 100 años (operación y clausurado), dividiéndose el total entre las toneladas de RSU depositadas.
- e) Se calcularon los compuestos presentes en los lixiviados en las etapas de operación y clausura de los SDF, a partir de los compuestos reportados en artículos (Olesen & Damgaard, 2014; Doka, 2009) (Figura 2.3). En la operación y clausura del RESA se consideró la infiltración del 0.1% de acuerdo con reportes de Olesen & Damgaard (2014) (Anexo D y G); mientras que para la operación y clausura del SC y SNC fue del 100%, debido a que carecen de geomembrana (Anexo M, P, T y W).



Figura 2.3 Proceso para la determinación del ICV de compuestos en los lixiviados.

Para las actividades donde no fue posible acceder a información de fuentes primarias (fabricación de geomembrana y tubos de PVC, así como de los vehículos recolectores), se hizo uso de las bases de datos de Ecoinvent (Ecoinvent, 2023).

Los flujos de entrada y salida de materiales, combustibles y emisiones, se calcularon en función de 1.0 t de RSU. Una vez desarrollados los ICV, se crearon los datasets correspondientes en Ecoinvent para cada escenario, en los cuales se incorporaron los ICV.

2.4. EVALUACIÓN DE IMPACTOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Esta sección comprende las Fases 3 y 4 de las ISO 14040 y 14044. Para la EICV se utilizó la metodología ReCiPe (PRé, 2020), que es un método global debido a que cumple con los estándares de dichas ISO (ISO, 2006a, 2006b), además de formar parte del software SimaPro® 10 (PRé, 2020).

Se evaluaron los impactos: Calentamiento Global, Agotamiento del Ozono Estratosférico, Formación de Ozono (salud humana y ecosistemas terrestres), Formación de Partículas Finas, Acidificación, Eutrofización, Ecotoxicidad Terrestre y de Agua Dulce, Toxicidad Cancerígena Humana/No Cancerígena, Uso de Suelo y la Agotamiento de Recursos Fósiles; para cubrir los principales problemas ambientales



relacionados con los SDF en México. De acuerdo con la ISO 14040/14044, los resultados se presentan en gráficas para facilitar su análisis (ISO, 2006a, 2006b).

2.5. COMPARACIÓN DE INVENTARIOS

Se realizó la simulación utilizando los datasets contruidos a partir del ICV del RESA y del SNC seleccionados y los datasets de Sanitary Landfill {ROW} y Unsanitary Landfill {GLO} disponibles en la base de datos Ecoinvent, con el objetivo de comparar el desempeño ambiental de los sitios estudiados frente a escenarios estándar de disposición final de Ecoinvent. Cabe mencionar que Ecoinvent emplea la misma composición de RSU para los dataset de Sanitary Landfill y UnSanitary Landfill, para los casos de estudio Quebec (Canadá), Suiza, y el resto del mundo (RoW, por sus siglas en inglés Rest of World).

Para las simulaciones se utilizó también la metodología ReCiPe (PRé, 2020) y el software SimaPro 10 (PRé, 2020), evaluándose la categorías: Calentamiento Global, Agotamiento del Ozono Estratosférico, Formación de Ozono (salud humana y ecosistemas terrestres), Formación de Partículas Finas, Acidificación, Eutrofización, Ecotoxicidad Terrestre y de Agua Dulce, Toxicidad Cancerígena Humana/No Cancerígena, Uso de Suelo y la Agotamiento de Recursos Fósiles; para cubrir los principales problemas ambientales relacionados con los SDF en México.

Para realizar la comparación del ICV desarrollado en este trabajo con el inventario de Ecoinvent, se tabularon los resultados obtenidos de las simulaciones para RESA y SNC para las diferentes categorías.

3. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados de las etapas descritas en la sección del Método de la investigación, así como su discusión.

3.1. SELECCIÓN DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acuerdo con el grado de colaboración con los responsables de los SDF en el Estado de México, se eligieron los siguientes sitios (Figura 3.1):

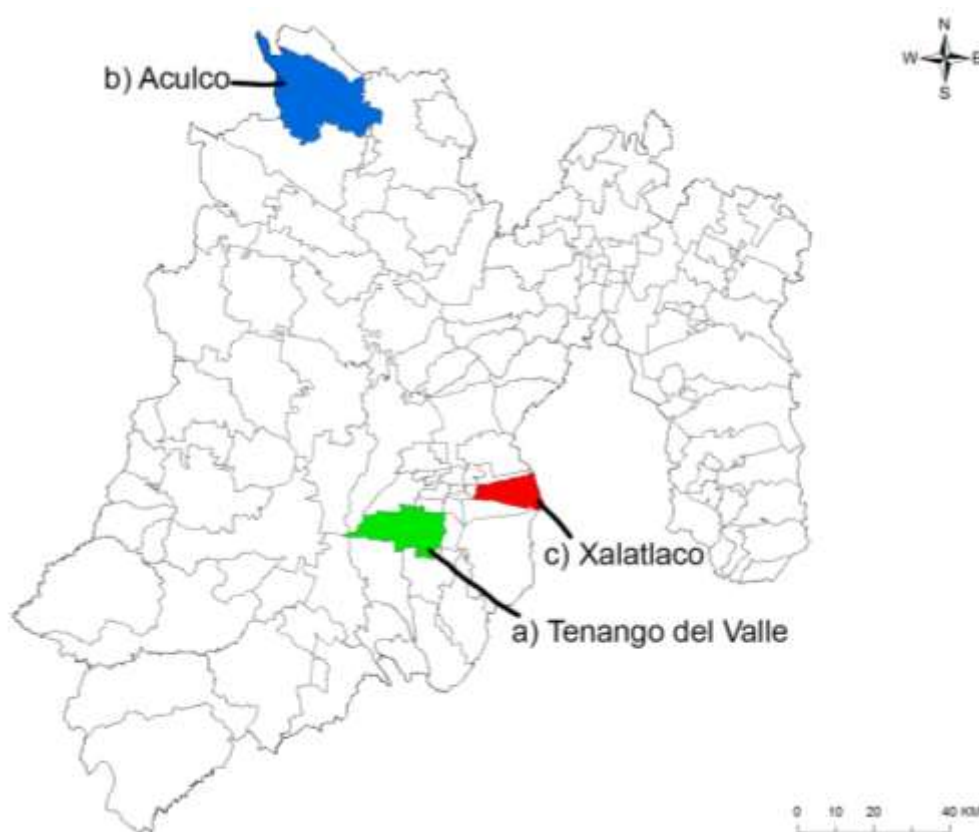


Figura 3.1 Ubicación de los SDF en el Estado de México.

- a) RESA ubicado en Tenango del Valle, con las coordenadas: 19°5'15.80"N, 99°37'36.23"O (Figura 3.2), que está a cargo de la empresa Constructora y Operadora de Rellenos Sanitarios, S.A. de C.V. De acuerdo con la información brindada por esta empresa, en 1985 este SDF inició como un SNC y en 2015 iniciaron los trabajos de saneamiento. Actualmente el sitio cuenta con dos celdas saneadas y clausuradas, y una en proceso de clausura, la cual tiene una capacidad de 329,945.17 t de RSU y abarca 16,742.73 m².



Figura 3.2 RESA ubicado en Tenango del Valle.

- b) El SC de Aculco con las coordenadas: 20°08'15.9"N, 99°50'26"O (Figura 3.3), está administrado por el municipio y opera como SC bajo la norma NOM-083-SEMARNAT-2003. De acuerdo con la información brindada por el personal del municipio, en 2018 este SDF comenzó a operar como SC. Actualmente el sitio cuenta con una celda en operación, la cual tiene una capacidad de 60,930 t de RSU y abarca 5,402.30 m².



Figura 3.3 SC ubicado en Aculco.

- c) El SNC ubicado en Xalatlaco, con las coordenadas: 19°09'28.2"N, 99°24'55.3"O (Figura 3.4), está administrado por el municipio. De acuerdo con la información brindada por el personal del municipio, en 1997 este SDF comenzó a operar como SNC. Actualmente el sitio está en etapa de operación, el cual tiene una capacidad de 255,966 t de RSU y abarca 20,210.55 m².



Figura 3.4 SNC ubicado en Xalatlaco.



A manera de síntesis en la tabla 3.1 se concentran los datos relevantes de cada SDF.

Tabla 3.1 Datos relevantes de cada SDF.

CARACTERÍSTICAS	RESA	SC	SNC
RSU depositados totales (t)	329,945	60,930	255,966
Tiempo de construcción (años)	0.5	0.4	0
Tiempo de operación (años)	3	10	32
Tiempo de clausurado (años)	97	90	68
Área del SDF (m ²)	16,743	5,402	20,211
Área del SDF (m ² /t RSU)	5.074E-02	8.866E-02	7.895E-02
Profundidad de la celda (m)	20	10	0
Altura de la celda	20	10	25

3.2. DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y ALCANCE PARA EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El objetivo del presente estudio fue determinar los impactos ambientales del ciclo de vida generados en tres escenarios de disposición de RSU: RESA, SC y SNC, en las etapas de construcción, operación y clausura.

Dentro del alcance, se consideraron los procesos de transformación de materiales extraídos desde la naturaleza para la construcción (grava, arena, cemento, diésel, geomembrana, etc.), operación (diésel, aceite para máquinas, tubos de PVC, etc.) y clausura (diésel y aceite para máquinas), es decir desde la cuna a la tumba; para el caso de los RSU, se consideró de la puerta a tumba.

La UF se especificó como “disponer 1.0 t de RSU” y las emisiones de biogás y lixiviados en un tiempo horizonte de 100 años, conforme a las entradas y las salidas del sistema. En varios de los trabajos consultados la UF se especifica como una tonelada de residuos dispuesta (Khandelwal *et al.*, 2019; Ziegler-Rodríguez *et al.*, 2019).

Se definieron los límites del sistema de cada escenario y se elaboraron los diagramas de bloques conforme a las siguientes hipótesis:

- a) El RESA se estableció como el escenario base (E0), donde se consideraron todos los requerimientos de la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004) (Figura 3.5). Los límites del sistema abarcaron el transporte y abastecimiento de materiales, los combustibles utilizados por la maquinaria y vehículos recolectores dentro del sitio y, el uso de energía eléctrica a lo largo de las tres etapas principales analizadas. No se incluyó el proceso de recolección y transporte de los residuos hacia el RESA, así como materiales para la fabricación de la maquinaria.

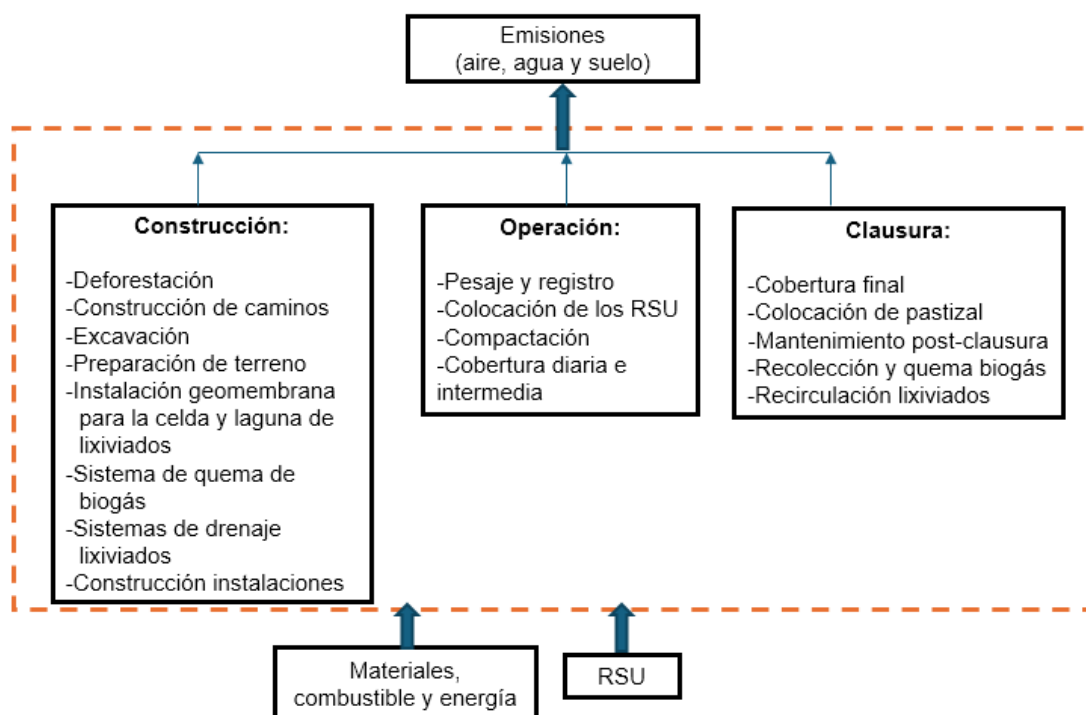


Figura 3.5 Límites del sistema para el RESA (E0).

- b) El SC se estableció como el escenario 1 (E1), que cumple con las especificaciones de un RESA, respecto a infraestructura y operación, pero no de impermeabilización (DOF, 2004) (Figura 3.6).

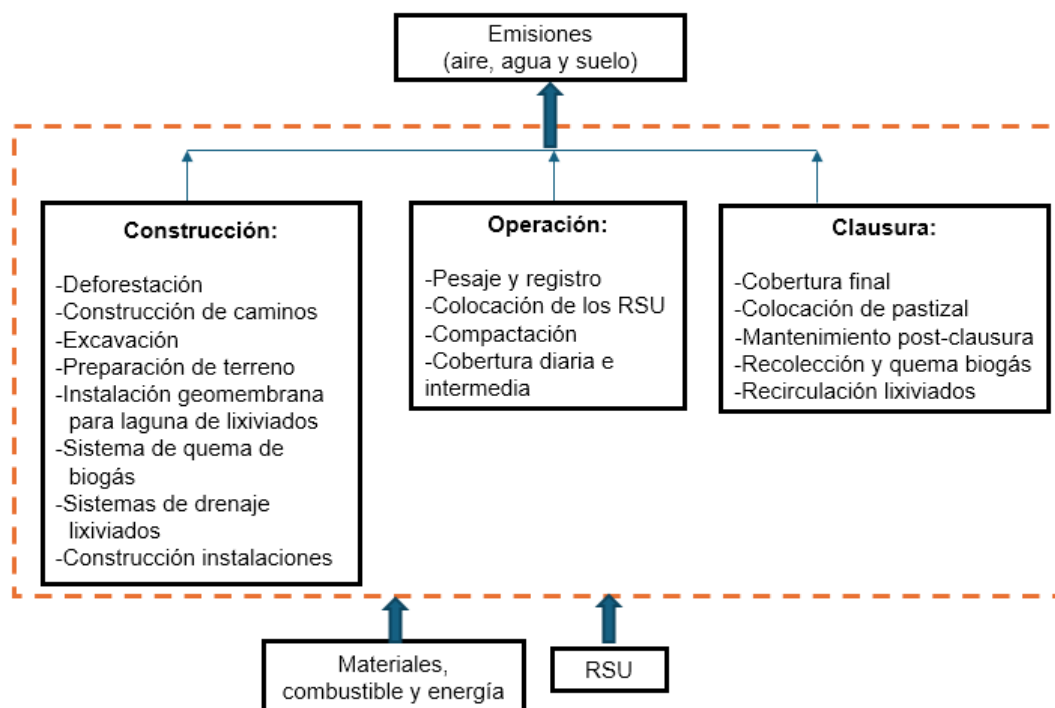


Figura 3.6 Límites del sistema para el SC (E1).

- c) El SNC se especificó como el escenario 2 (E2), éste no cumple con ninguno de los requisitos de la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004) (Figura 3.7).

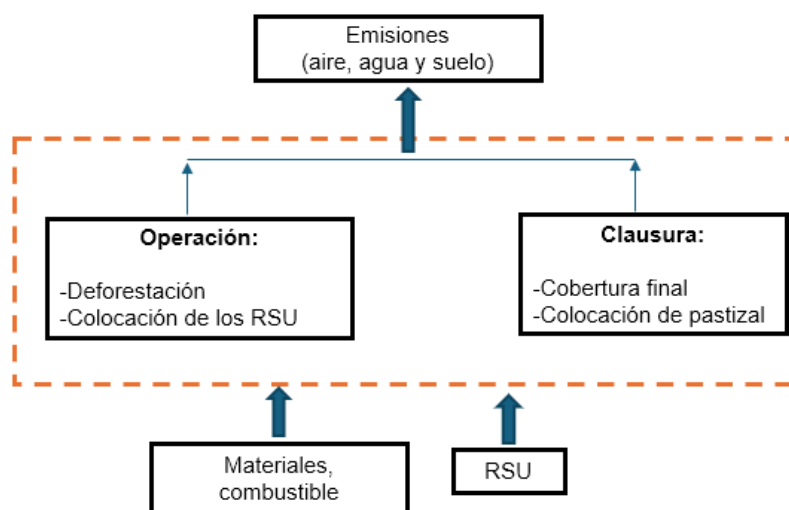


Figura 3.7 Límites del sistema para el SNC (E2).



3.3. DESARROLLO DEL INVENTARIO DE CICLO DE VIDA

A continuación, se presentan los resultados del desarrollo de cada uno de los ocho ICV, donde para el RESA y el SC incluyen la construcción, operación y clausura, mientras que para el SNC solamente se consideran la operación y clausura.

La información recabada para los ICV del E0 (RESA) y del E1 (SC) se basó en las actividades descritas en el “Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y Residuos de Manejo Especial (RME)” publicado por SEMARNAT (2009) y en la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004), como se describe en las figuras 3.4 y 3.5 anteriormente presentadas.

Para el E2 (SNC), se consideraron solamente las etapas de operación y clausura, ya que, de acuerdo con la norma NOM-083-SEMARNAT-2003, estos SDF no cuentan con actividades de construcción (DOF, 2004), como se indica en la figura 3.6 mostrada previamente.

Cabe mencionar que el formato utilizado en las tablas de este subapartado sigue la estructura de los inventarios desarrollados por la base de datos Ecoinvent.

3.3.1. Inventario de la construcción del Relleno Sanitario

Para el ICV de la etapa de construcción del RESA, se consideraron las entradas de materiales de la naturaleza y la tecnosfera, la energía y los procesos asociados a la deforestación, creación de caminos (bulldozer), excavación de la celda y laguna de lixiviados (excavadora, retroexcavadora), movimiento de tierra dentro de la celda (bulldozer), compactación del suelo de la celda (compactadora de rodillos vibratorios), y transporte de materiales dentro y fuera del SDF (vehículos), así como la instalación de los tubos de PVC para los pozos de venteo y la colocación de la geomembrana en la celda y la laguna de lixiviados. Todos estos procesos fueron modelados a partir de



la operación de la maquinaria correspondiente, cuyos datasets se presentan en las Tablas 3.2 a 3.5. Estos datasets fueron incluidos en la Tabla 3.6. Asimismo, en el Anexo A se muestran los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.2 Inventario del Bulldozer en la construcción del RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Operación de máquina bulldozer, diésel RESA-Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	124	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado Corte, U	2108	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	84.797	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	5.353E+00	kg
Monóxido de carbono fósil	1.426E-02	kg
Óxidos de nitrógeno	5.549E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	3.754E-03	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	3.870E-03	kg
Dióxido de azufre	4.921E-05	kg
Hidrocarburos, sin especificar	3.691E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	73.783	kg



Tabla 3.3 Inventario de la Excavadora 320 en la construcción del RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Excavadora 320 Operación de máquina, diésel RESA-Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	3185	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado Corte, U	67690	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	2178.343	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	1.549E+02	kg
Monóxido de carbono fósil	1.200E+00	kg
Óxidos de nitrógeno	8.507E-01	kg
Partículas, < 2,5 um	6.766E-01	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	6.976E-01	kg
Dióxido de azufre	1.424E-03	kg
Hidrocarburos, sin especificar	7.802E-02	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	1895.405	kg

Tabla 3.4 Inventario de la Retroexcavadora 580 en la construcción del RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Retroexcavadora 580 Operación de máquina, diésel RESA-Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	159	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado Corte, U	1352	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	108.732	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	1.975E+00	kg
Monóxido de carbono fósil	5.743E-03	kg
Óxidos de nitrógeno	9.005E-03	kg
Partículas, < 2,5 um	1.265E-03	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	1.304E-03	kg
Dióxido de azufre	1.816E-05	kg
Hidrocarburos, sin especificar	7.462E-04	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	94.609	kg



Tabla 3.5 Inventario de la Compactadora de Rodillos Vibratorios en la construcción del RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Operación de Máquina Compactadora de Rodillos Vibratorios, diésel RESA-Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	8	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado Corte, U	40.8	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	5.470	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	3.124E-01	kg
Monóxido de carbono fósil	7.934E-04	kg
Óxidos de nitrógeno	1.547E-03	kg
Partículas, < 2,5 um	1.597E-04	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	1.646E-04	kg
Dióxido de azufre	2.872E-06	kg
Hidrocarburos, sin especificar	1.150E-04	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	4.760	kg



En la Tabla 3.6, se muestra el ICV de los materiales, energía y maquinaria utilizados para la etapa de construcción de la macrocelda del RESA en función de 1.0 t de RSU. Cabe destacar que los datos primarios fueron obtenidos directamente del sitio y los procesos secundarios como la geomembrana y los tubos de PVC, de los cuales no se disponía de información, se utilizaron los datos de Ecoinvent. En el Anexo B, se presentan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV, considerando los Datasets de los procesos de Ecoinvent (PRODUCTO) y los requerimientos para el RESA de Tenango del Valle, Estado de México.

Tabla 3.6 Construcción del RESA en función de 1.0 t de RSU.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Relleno sanitario - Construcción {MX} Materiales y Construcción Construcción Corte, U	1	p
Productos evitados		
Recursos de la naturaleza		
Transformación, de bosque, extensivo, MX	5.074E-02	m ²
Arcilla	1.44E+03	kg
Materiales/combustibles		
Acero de refuerzo {MX} mercado Corte, U	4.930E-03	kg
Cemento, Portland {MX} mercado Corte, U	2.220E-02	kg
Grava, triturada {MX} Mercado de grava triturada Corte, U	6.060E-02	kg
Piedra caliza, sin procesar {MX} Mercado de piedra caliza sin procesar Corte, U	2.730E-01	kg
Arena {MX} Mercado de la arena Corte, U	4.700E-02	kg
Agua del grifo {MX} Grupo de mercado para Corte, U	1.380E+02	kg
Ladrillo silicocalcáreo {MX} mercado para Corte, U	1.320E-02	kg
* Operación de máquina bulldozer, diésel RESA-Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	9.654E-03	hr
** Excavadora 320 Operación de máquina, diésel RESA-Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	2.425E-05	hr
*** Retroexcavadora 580 Operación de máquina, diésel RESA-Construcción {MX} operación de máquina, diésel Corte, U	3.758E-04	hr
**** Operación de Máquina Compactadora de Rodillos Vibratorios, diésel RESA-Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	4.819E-04	hr
Extrusión, película plástica {GLO} mercado para Corte, U	3.040E-02	kg



Tabla 3.6 Construcción del RESA en función de 1.0 t de RSU (continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Relleno sanitario - Construcción {MX} Materiales y Construcción Construcción Corte, U	1	p
Materiales/combustibles		
Polietileno, alta densidad, granulado {GLO} mercado para Corte, U	2.972E-02	kg
Extrusión, tubos de plástico {GLO} mercado para Corte, U	5.820E-04	kg
Cloruro de polivinilo, polimerizado en suspensión {GLO} mercado para Corte, U	5.116E-04	kg
Polietileno, lineal de baja densidad, granulado {RER} Producción Corte, U	3.376E-05	kg
Carbonato de calcio, precipitado {RER} Producción de carbonato de calcio precipitado Corte, U	2.794E-05	kg
Cloruro de polivinilo, polimerizado en suspensión {RER} Producción de cloruro de polivinilo, polimerización en suspensión Corte, U	5.820E-06	kg
Polipropileno, granulado {RER} Producción Corte, U	2.910E-06	kg
Electricidad/calor		
Transporte de arcilla banco de materiales, mercancías, camión 16-32 toneladas, EURO3 - RESA- Construcción {RER} transporte, carga, camión 16-32 toneladas, EURO3 Corte, U	1.508E+01	tkm
Transporte de materiales, carga, camión 16-32 tonelada métrica, euro5 {RER} mercado para transporte, mercancías, camión 16-32 toneladas, EURO5 Corte, U	8.340E-01	tkm
Transporte de geomembrana, carga, camión 16-32 tonelada métrica, euro5 {RER} mercado para transporte, mercancías, camión 16-32 toneladas, EURO5 Corte, U	1.100E-02	tkm

* Dataset de la máquina Bulldozer presentado en la Tabla 3.2.

** Dataset de la Excavadora 320 presentado en la Tabla 3.3.

*** Dataset de la Retroexcavadora 580 presentado en la Tabla 3.4.

**** Dataset de máquina Compactadora de Rodillos Vibratorios presentado en la Tabla 3.5.

3.3.2. Inventario de la operación del Relleno Sanitario

Para el ICV de la etapa de operación del RESA, se consideraron las entradas de materiales de la naturaleza y la tecnosfera, la energía eléctrica (báscula) y los procesos asociados a la compactación de los RSU (Máquina compactadora de RSU), la excavación para la extracción de material de cobertura del banco de materiales (excavadora), colocación de cobertura (retroexcavadora), y el transporte de materiales



y de los RSU (vehículos). Todos estos procesos fueron modelados a partir de la operación de la maquinaria correspondiente, cuyos datasets se presentan en las Tablas 3.7 a 3.10. Estos datasets fueron incluidos en la Tabla 3.11. Asimismo, en el Anexo B se muestran los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.7 Inventario del Compactador de RSU en la operación del RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Operación de máquina compactadora de residuos, diésel RESA-Operación {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	7195.32	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	232409	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	4920.536	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	6.907E+02	kg
Monóxido de carbono fósil	1.952E+00	kg
Óxidos de nitrógeno	3.447E+00	kg
Partículas, < 2,5 um	3.481E-01	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	3.589E-01	kg
Dióxido de azufre	6.349E-03	kg
Hidrocarburos, sin especificar	2.369E-01	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	4281.423	kg



Tabla 3.8 Inventario de la Retroexcavadora 580 en la operación del RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Retroexcavadora 580 Operación de máquina, diésel RESA-Operación {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	1752	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado Corte, U	14892	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	1198.109	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	2.176E+01	kg
Monóxido de carbono fósil	6.328E-02	kg
Óxidos de nitrógeno	9.922E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	1.393E-02	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	1.436E-02	kg
Dióxido de azufre	2.001E-04	kg
Hidrocarburos, sin especificar	8.222E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	1042.490	kg

Tabla 3.9 Inventario de la Excavadora 320 en la operación del RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Excavadora 320 Operación de máquinas, diésel RESA -Operación {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	905	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	19231	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	618.88	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	4.399E+01	kg
Monóxido de carbono fósil	1.764E-01	kg
Óxidos de nitrógeno	2.246E-01	kg
Partículas, < 2,5 um	7.041E-02	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	7.258E-02	kg
Dióxido de azufre	4.044E-04	kg
Hidrocarburos, sin especificar	1.788E-02	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites usados Corte, U	538.501	kg



En la Tabla 3.10, se muestra la estimación de las emisiones generadas por los vehículos recolectores dentro del RESA. Cabe mencionar que se utilizó y se adaptó el inventario de Ecoinvent para poder determinar las emisiones producidas por estos.

Tabla 3.10 Inventario de emisiones de los vehículos recolectores en el RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Transporte de recolección de residuos municipales mediante camión de 21 toneladas -RESA- Operación {MX} Procesamiento Corte, U	19.242	tkm
Materiales/combustibles		
Diésel {MX} Grupo de mercado para Corte, U	0.300	kg
Camión de recogida de residuos, 21 toneladas métricas {GLO} mercado para Corte, U	8.6974E-06	p
Emisiones a la atmósfera		
Amoníaco	1.530E-04	kg
Benceno	1.303E-03	kg
Cadmio	8.620E-08	kg
Dióxido de carbono fósil	2.040E+01	kg
Monóxido de carbono fósil	5.253E-02	kg
Cromo	3.252E-07	kg
Cobre	1.099E-05	kg
Monóxido de dinitrógeno	1.010E-03	kg
Plomo	9.371E-08	kg
Metano, fósil	1.628E-03	kg
Níquel	4.522E-07	kg
Óxidos de nitrógeno	1.459E-01	kg
COVNM, compuestos orgánicos volátiles no metánicos	6.638E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	1.183E-02	kg
Partículas, > 10 um	3.367E-03	kg
Partículas, > 2.5 um y < 10 um	2.020E-03	kg
Selenio	6.465E-08	kg
Dióxido de azufre	3.887E-03	kg
Tolueno	5.215E-04	kg
Xileno	5.215E-04	kg
Zinc	6.408E-05	kg

En la Tabla 3.11, se muestran los datasets creados para la operación del RESA. Asimismo, en el Anexo D, se presentan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.



Tabla 3.11 Operación del RESA en función de 1.0 t de RSU.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Cargas específicas del proceso, RESA - (OPERACIÓN) {MX} Cargas específicas del proceso, relleno sanitario Corte, U	1	t
Productos evitados		
Recursos de la naturaleza		
Arcilla	411.76	kg
Materiales/combustibles		
*Operación de máquina compactadora de residuos, diésel RESA-Operación {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	2.181E-02	hr
**Excavadora 320 Operación de máquinas, diésel RESA -Operación {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	2.743E-03	hr
***Retroexcavadora 580 Operación de máquina, diésel RESA-Operación {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	5.310E-03	hr
Electricidad/calor		
Electricidad de baja tensión para báscula {MX} mercado para Corte, U	8.020E-04	kWh
Transporte de recolección de residuos municipales mediante camión de 21 toneladas -RESA- Operación {RER} Procesamiento Corte, U	1.924E+01	tkm
Transporte de arcilla banco de materiales, carga, camión 16-32 tonelada, EURO3 - RESA- Operación {RER} transporte, carga, camión 16-32 toneladas, EURO3 Corte, U	1.508E+01	tkm
Transporte de materiales, carga, camión 16-32 tonelada métrica, euro5 {RER} mercado para transporte, mercancías, camión 16-32 toneladas, EURO5 Corte, U	8.340E-01	tkm
Residuos a tratamiento		
RESA RSU Etapa Operación {MX} tratamiento, relleno sanitario Corte, U	1	t

* Dataset de la máquina compactadora de residuos presentado en la Tabla 3.7.

** Dataset de la Retroexcavadora 580 presentado en la Tabla 3.8.

*** Dataset de la Excavadora 320 presentado en la Tabla 3.9.

Para la etapa de operación, de acuerdo con la experiencia de las personas que laboran en el sitio, los RSU son colocados en una macrocelda. La macrocelda ha reemplazado la utilización de celdas individuales, debido a que con ellas los lixiviados permanecían confinados sin permitir su flujo, provocando el afloramiento en los taludes (Figura 3.8).



Figura 3.8 Macrocela.

En la Figura 3.9 se muestra la caracterización promedio de los residuos dispuestos en temporada de lluvias y estiaje en la macrocelda del RESA (López-Gasca, 2021).

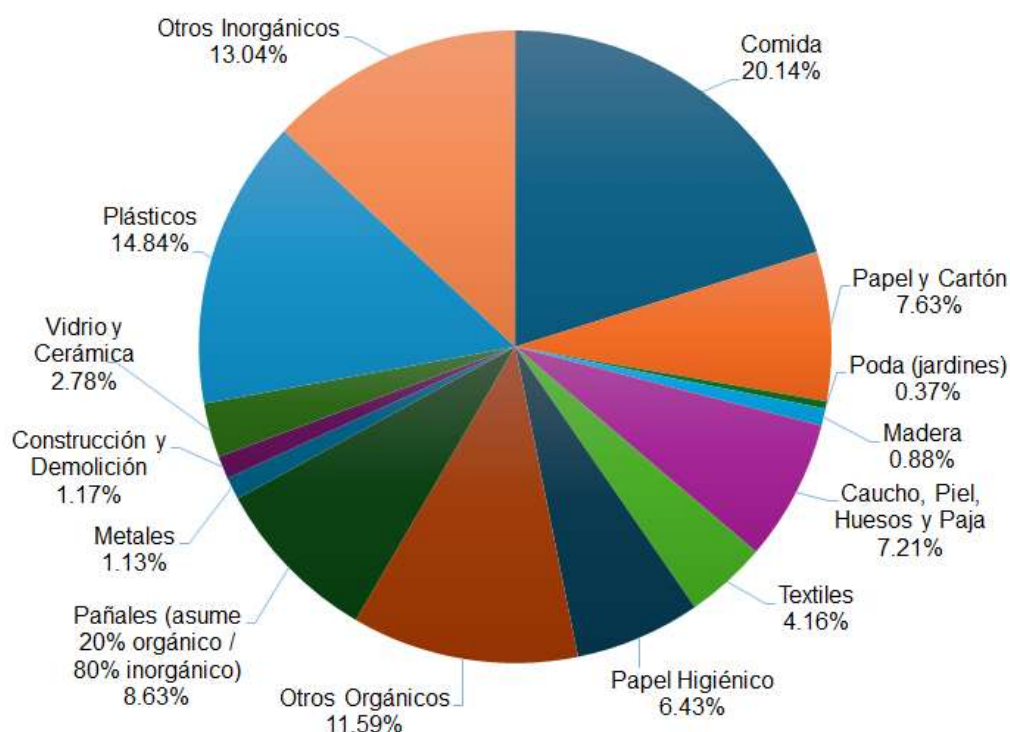


Figura 3.9 Composición promedio de los RSU dispuestos en la macrocelda.

Con la disposición inicial de 110,535 t de RSU y un incremento anual en la disposición de RSU del 2.7%, se alcanzaría la capacidad total de la celda de 329,945 t de RSU en 3 años.

Los resultados de la estimación de generación de biogás con el MMB 2.0 en un tiempo horizonte de 100 años, mostraron que se obtendría un total de biogás de 44,388,919 m³ (concentración del 50% de CH₄), donde la etapa de clausura tendría la mayor aportación de CH₄ (Tabla 3.12) (Anexo E).

Tabla 3.12 Emisiones Biogás y CH₄ en las etapas del RESA.

ACTIVIDAD	BIOGÁS (m ³)	BIOGÁS (kg/t RSU)	CH ₄ (kg/t RSU)
Operación (3 años)	3,144,126	9.52	3.41
Clausurado (97 años)	41,244,792	125.00	44.80



En la Tabla 3.13 se muestra el ICV de la estimación de los compuestos presentes en el biogás y los lixiviados emitidos durante la etapa de operación del RESA. Cabe destacar que con el ICV desarrollado, se logró una mayor cantidad de compuestos para el RESA, en comparación con el inventario que está disponible en Ecoinvent.

En esta etapa se consideró que el 35% del biogás es liberado por los pozos de venteo y el 65% restante es emitido a través de la cobertura intermedia, con un porcentaje de oxidación (Olesen & Damgaard, 2014). Por otro lado, en la generación de lixiviados, se consideró la infiltración del 0.1% a la capa freática (Ecoinvent, 2023). En el Anexo F, se presentan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.13 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
RESA RSU Etapa Operación {MX} tratamiento, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Productos evitados			
Recursos desde la naturaleza			
Materiales/combustibles			
Electricidad/calor			
Emisiones a la atmósfera			
Aluminio	Bajo. pop.	3.73E-06	kg
Antimonio	Bajo. pop.	1.24E-07	kg
Arsénico	Bajo. pop.	1.43E-07	kg
Bario	Bajo. pop.	1.21E-05	kg
Cadmio	Bajo. pop.	1.81E-07	kg
Monóxido de carbono biogénico	Bajo. pop.	2.67E-04	kg
Cromo	Bajo. pop.	1.43E-07	kg
Cobre	Bajo. pop.	1.14E-07	kg
Hierro	Bajo. pop.	4.38E-07	kg
Plomo	Bajo. pop.	8.58E-08	kg
Manganeso	Bajo. pop.	1.91E-07	kg
Mercurio	Bajo. pop.	9.53E-09	kg
Metano biogénico	Bajo. pop.	2.63E+00	kg
Molibdeno	Bajo. pop.	3.81E-08	kg



Tabla 3.13 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del RESA
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
RESA RSU Etapa Operación {MX} tratamiento, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Níquel	Bajo. pop.	6.67E-08	kg
Óxidos de nitrógeno	Bajo. pop.	4.38E-05	kg
Dióxido de azufre	Bajo. pop.	6.29E-05	kg
Zinc	Bajo. pop.	5.88E-06	kg
Sulfuro de hidrógeno	Bajo. pop.	3.43E-04	kg
COV, compuestos orgánicos volátiles como C	Bajo. pop.	2.00E-04	kg
Benceno	Bajo. pop.	6.63E-05	kg
Clorobenceno	Bajo. pop.	1.49E-05	kg
Propilbenceno	Bajo. pop.	1.72E-05	kg
Cloroformo	Bajo. pop.	1.97E-06	kg
Xileno	Bajo. pop.	3.13E-04	kg
Tolueno	Bajo. pop.	8.18E-04	kg
Fenol	Bajo. pop.	7.43E-06	kg
Naftalina	Bajo. pop.	5.43E-06	kg
Metano, triclorofluoro-, CFC-11	Bajo. pop.	5.24E-06	kg
Metano, diclorodifluoro-, CFC-12	Bajo. pop.	4.05E-05	kg
Etano, 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Bajo. pop.	4.76E-06	kg
Metano, diclorofluoro-, HCFC-21	Bajo. pop.	6.67E-05	kg
Metano, clorodifluoro-, HCFC-22	Bajo. pop.	2.29E-05	kg
2-Propanol	Bajo. pop.	1.17E-03	kg
Acetona	Bajo. pop.	1.59E-04	kg
Acrilonitrilo	Bajo. pop.	1.31E-04	kg
Sulfuro de carbonilo	Bajo. pop.	1.15E-05	kg
Sulfuro de dimetilo	Bajo. pop.	1.89E-04	kg
Etano	Bajo. pop.	1.04E-02	kg
Metilmercaptano	Bajo. pop.	4.67E-05	kg
Tiol de etano	Bajo. pop.	5.52E-05	kg
Hexano	Bajo. pop.	2.21E-04	kg
Pentano	Bajo. pop.	9.25E-05	kg
Propano	Bajo. pop.	1.91E-04	kg
Amoníaco	Bajo. pop.	6.48E-05	kg
Metano, dicloro-, HCC-30	Bajo. pop.	6.85E-05	kg
Metano, tetracloro-, CFC-10	Bajo. pop.	6.67E-05	kg
Metano, monocloro-, R-40	Bajo. pop.	4.76E-06	kg
Triclorobencenos	Bajo. pop.	4.21E-06	kg



Tabla 3.13 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del RESA
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
RESA RSU Etapa Operación {MX} tratamiento, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Etano, 1,1,1-tricloro-, HCFC-140	Bajo. pop.	5.24E-07	kg
Etano, 1,2-dicloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Bajo. pop.	7.08E-06	kg
etano, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Bajo. pop.	2.10E-05	kg
Isobutano	Bajo. pop.	6.83E-05	kg
Decano	Bajo. pop.	1.82E-03	kg
Nonano	Bajo. pop.	1.85E-04	kg
Undecano	Bajo. pop.	8.64E-04	kg
3-Metiloctano	Bajo. pop.	6.84E-04	kg
Pentano	Bajo. pop.	1.14E-04	kg
Heptano	Bajo. pop.	1.20E-04	kg
Dodecano	Bajo. pop.	1.59E-04	kg
Etanol	Bajo. pop.	4.88E-04	kg
Butano	Bajo. pop.	1.14E-04	kg
Emisiones al agua			
Amoníaco	agua subterránea	4.53E-04	kg
Antimonio	agua subterránea	9.89E-09	kg
Arsénico	agua subterránea	4.49E-09	kg
Bario	agua subterránea	6.66E-08	kg
Benceno	agua subterránea	8.99E-10	kg
DBO ₅ (Demanda Biológica de Oxígeno)	agua subterránea	1.68E-03	kg
Boro	agua subterránea	9.76E-07	kg
Cadmio	agua subterránea	1.83E-09	kg
Calcio	agua subterránea	1.56E-04	kg
Cloruro	agua subterránea	2.79E-04	kg
Cromo VI	agua subterránea	9.89E-09	kg
Cobalto	agua subterránea	8.89E-09	kg
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	agua subterránea	2.40E-03	kg
Cobre	agua subterránea	1.05E-08	kg
DOC, Carbono Orgánico Disuelto	agua subterránea	2.43E-04	kg
Flúor	agua subterránea	8.21E-08	kg
Azufre	agua subterránea	5.99E-06	kg
Hierro	agua subterránea	1.03E-04	kg
Plomo	agua subterránea	6.89E-09	kg
Magnesio	agua subterránea	6.09E-05	kg



Tabla 3.13 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del RESA
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
RESA RSU Etapa Operación {MX} tratamiento, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones al agua			
Manganeso	agua subterránea	4.55E-07	kg
Mercurio	agua subterránea	4.80E-11	kg
Naftalina	agua subterránea	4.49E-09	kg
Níquel	agua subterránea	1.05E-08	kg
Fosfato	agua subterránea	1.50E-07	kg
Potasio	agua subterránea	3.27E-05	kg
Selenio	agua subterránea	1.38E-09	kg
Plata	agua subterránea	1.56E-08	kg
Sodio	agua subterránea	9.18E-05	kg
Sulfato	agua subterránea	6.78E-05	kg
TOC, Carbono Orgánico Total	agua subterránea	5.76E-08	kg
Zinc	agua subterránea	5.28E-07	kg
Tolueno	agua subterránea	1.23E-08	kg
Xileno	agua subterránea	1.14E-08	kg
Fenol	agua subterránea	3.88E-10	kg
Cloroformo	agua subterránea	4.49E-11	kg
Berilio	agua subterránea	7.19E-10	kg
Estroncio	agua subterránea	2.63E-07	kg



3.3.3. Inventario de la clausura del Relleno Sanitario

Para el ICV de la etapa de clausura del RESA, se consideraron las entradas de materiales de la naturaleza y la tecnosfera, el combustible para maquinaria y los procesos asociados a la extracción de material de cobertura final desde el banco de materiales (excavadora), el movimiento de tierra dentro de la celda (bulldozer), la compactación de la cobertura (compactadora de rodillos vibratorios), la colocación de pastizal, el transporte de materiales dentro y fuera del SDF (vehículos), así como la extracción de material de cobertura desde el banco de materiales para mantenimiento (excavadora) y el bombeo de lixiviados (combustible). Todos estos procesos fueron modelados a partir de la operación de la maquinaria correspondiente, cuyos datasets se presentan en las Tablas 3.14 a 3.16. Estos datasets fueron incluidos en la Tabla 3.17. Asimismo, en el Anexo G se muestran los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.14 Inventario de la Excavadora 320 en la clausura del RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Excavadora 320 Manejo de máquinas, diésel RESA-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	112	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	2380	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	76.591	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	5.444E+00	kg
Monóxido de carbono fósil	1.475E-02	kg
Óxidos de nitrógeno	2.706E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	3.470E-03	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	3.577E-03	kg
Dióxido de azufre	5.005E-05	kg
Hidrocarburos, sin especificar	2.029E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	66.643	kg



Tabla 3.15 Inventario del Bulldozer en la clausura del RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Operación de máquina bulldozer, diésel RESA-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	265	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	4505	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	181.221	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	1.144E+01	kg
Monóxido de carbono fósil	3.225E-02	kg
Óxidos de nitrógeno	1.203E-01	kg
Partículas, < 2,5 um	1.011E-02	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	1.042E-02	kg
Dióxido de azufre	1.052E-04	kg
Hidrocarburos, sin especificar	8.057E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	157.683	kg

Tabla 3.16 Inventario del compactador de rodillos en la clausura del RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Operación de la máquina compactadora de rodillos vibratorios, diésel RESA-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	16	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	82	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	10.942	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	6.249E-01	kg
Monóxido de carbono fósil	1.595E-03	kg
Óxidos de nitrógeno	3.096E-03	kg
Partículas, < 2,5 um	3.254E-04	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	3.355E-04	kg
Dióxido de azufre	5.744E-06	kg
Hidrocarburos, sin especificar	2.303E-04	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	9.520	kg



En la Tabla 3.17, se muestran los datasets creados para la etapa de clausura del RESA. En el Anexo H se detallan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV. Para las actividades de esta etapa se tomaron los datos de otra celda clausurada en el mismo sitio, donde la recolección y almacenamiento de los lixiviados se lleva a cabo en una laguna impermeabilizada con geomembrana, para posteriormente ser reinyectados a través de los pozos de biogás.

Tabla 3.17 Clausura del RESA en función de 1.0 t de RSU.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Relleno sanitario - RESA CLAUSURA {MX} Clausura Corte, U	1	p
Productos evitados		
Recursos de la naturaleza		
Transformación, a pastizal/pradera, MX	5.074E-02	m ²
Arcilla	5.117E+01	kg
Materiales/combustibles		
Agua del grifo {MX} Grupo de mercado Corte, U	1.212E-01	kg
*Excavadora 320 Manejo de máquinas, diésel RESA-Clausura{MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	8.032E-04	hr
**Operación de máquina bulldozer, diésel RESA-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	3.395E-04	hr
***Operación de la máquina compactadora de rodillos vibratorios, diésel RESA-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	4.849E-05	hr
Extrusión, tubos de plástico {GLO} mercado para Corte, U	1.047E-03	kg
Polietileno, alta densidad, granulado {GLO} mercado para Corte, U	1.024E-03	kg
Electricidad/calor		
Gasolina, baja en azufre {RoW} mercado Corte, U	1.719E-02	kg
Transporte de arcilla banco de materiales, carga, camión 16-32 toneladas, EURO3 - RESA- Clausura {RER} transporte, carga, camión 16-32 toneladas, EURO3 Corte, U	1.51E+01	tkm
Transporte de materiales, carga, camión 16-32 toneladas métrica, euro5 {RER} mercado para transporte, mercancías, camión 16-32 toneladas, EURO5 Corte, U	8.630E-01	tkm
Residuos a tratamiento		
RSU Etapa Clausura RESA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t

* Dataset de la Excavadora 320 presentado en la Tabla 3.14.



** Dataset del Bulldozer presentado en la Tabla 3.15.

*** Dataset del compactador de rodillos vibratorios presentado en la Tabla 3.16.

En esta etapa el biogás es quemado en las antorchas de los pozos de venteo, donde se consideró una eficiencia promedio de captación y quemado de biogás del 75% de acuerdo con reportes de la EPA (Olesen & Damgaard, 2014; Doka, 2009), mientras que el 25% restante es liberado a la atmósfera a través emisiones fugitivas, con un porcentaje de oxidación debido a la cobertura de suelo. Por otro lado, en la generación de lixiviados, se consideró una infiltración del 0.1% a la capa freática (Olesen & Damgaard, 2014) (Tabla 3.18). En el Anexo I, se presentan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.18 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del RESA.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
RSU Etapa Clausura RESA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Productos evitados			
Materiales/combustibles			
Electricidad/calor			
Emisiones a la atmósfera			
Aluminio	Bajo. pop.	1.22E-05	kg
Antimonio	Bajo. pop.	4.06E-07	kg
Arsénico	Bajo. pop.	4.69E-07	kg
Bario	Bajo. pop.	3.95E-05	kg
Cadmio	Bajo. pop.	5.94E-07	kg
Monóxido de carbono biogénico	Bajo. pop.	3.56E-02	kg
Cromo	Bajo. pop.	4.69E-07	kg
Cobre	Bajo. pop.	3.75E-07	kg
Ácido clorhídrico	Bajo. pop.	7.97E-03	kg
Fluoruro de hidrógeno	Bajo. pop.	1.88E-03	kg
Hierro	Bajo. pop.	1.44E-06	kg
Plomo	Bajo. pop.	2.81E-07	kg
Manganeso	Bajo. pop.	6.25E-07	kg
Mercurio	Bajo. pop.	3.13E-08	kg



Tabla 3.18 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del RESA
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
RSU Etapa Clausura RESA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Metano biogénico	Bajo. pop.	9.13E+00	kg
Molibdeno	Bajo. pop.	1.25E-07	kg
Níquel	Bajo. pop.	2.19E-07	kg
Óxidos de nitrógeno	Bajo. pop.	4.28E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	Bajo. pop.	3.28E-03	kg
Dióxido de azufre	Bajo. pop.	8.18E-03	kg
Zinc	Bajo. pop.	1.93E-05	kg
Sulfuro de hidrógeno	Bajo. pop.	1.13E-03	kg
COV, compuestos orgánicos volátiles como C	Bajo. pop.	1.59E-03	kg
Benceno	Bajo. pop.	2.18E-04	kg
Clorobenceno	Bajo. pop.	4.88E-05	kg
Propilbenceno	Bajo. pop.	5.63E-05	kg
Cloroformo	Bajo. pop.	6.47E-06	kg
Xileno	Bajo. pop.	1.03E-03	kg
Tolueno	Bajo. pop.	2.68E-03	kg
Fenol	Bajo. pop.	2.44E-05	kg
Naftalina	Bajo. pop.	1.78E-05	kg
Metano, triclorofluoro-, CFC-11	Bajo. pop.	1.72E-05	kg
Metano, diclorodifluoro-, CFC-12	Bajo. pop.	1.33E-04	kg
Etano, 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Bajo. pop.	1.56E-05	kg
Metano, diclorofluoro-, HCFC-21	Bajo. pop.	2.19E-04	kg
Metano, clorodifluoro-, HCFC-22	Bajo. pop.	7.50E-05	kg
2-Propanol	Bajo. pop.	3.85E-03	kg
Acetona	Bajo. pop.	5.20E-04	kg
Acrilonitrilo	Bajo. pop.	4.29E-04	kg
Sulfuro de carbonilo	Bajo. pop.	3.76E-05	kg
Sulfuro de dimetilo	Bajo. pop.	6.21E-04	kg
Etano	Bajo. pop.	3.41E-02	kg
Metilmercaptano	Bajo. pop.	1.53E-04	kg
Tiol de etano	Bajo. pop.	1.81E-04	kg
Hexano	Bajo. pop.	7.23E-04	kg
Pentano	Bajo. pop.	3.03E-04	kg
Propano	Bajo. pop.	6.25E-04	kg
Amoníaco	Bajo. pop.	2.13E-04	kg
Metano, dicloro-, HCC-30	Bajo. pop.	2.25E-04	kg



Tabla 3.18 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del RESA
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
RSU Etapa Clausura RESA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Metano, tetracloro-, CFC-10	Bajo. pop.	2.19E-04	kg
Metano, monocloro-, R-40	Bajo. pop.	1.56E-05	kg
Triclorobencenos	Bajo. pop.	1.38E-05	kg
Etano, 1,1,1-tricloro-, HCFC-140	Bajo. pop.	1.72E-06	kg
Etano, 1,2-dicloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Bajo. pop.	2.32E-05	kg
etano, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Bajo. pop.	6.88E-05	kg
Isobutano	Bajo. pop.	2.24E-04	kg
Decano	Bajo. pop.	5.97E-03	kg
Nonano	Bajo. pop.	6.06E-04	kg
Undecano	Bajo. pop.	2.83E-03	kg
3-Metiloctano	Bajo. pop.	2.24E-03	kg
Pentano	Bajo. pop.	3.75E-04	kg
Heptano	Bajo. pop.	3.95E-04	kg
Dodecano	Bajo. pop.	5.23E-04	kg
Dioxinas (EQT)	Bajo. pop.	3.14E-11	kg
Butano	Bajo. pop.	3.73E-04	kg
Etanol	Bajo. pop.	1.60E-03	kg
Emisiones al agua			
Amoníaco	agua subterránea	1.64E-04	kg
Antimonio	agua subterránea	5.11E-08	kg
Arsénico	agua subterránea	2.32E-08	kg
Bario	agua subterránea	1.31E-07	kg
Benceno	agua subterránea	3.15E-09	kg
DBO ₅ (Demanda Biológica de Oxígeno)	agua subterránea	8.19E-05	kg
Boro	agua subterránea	5.05E-06	kg
Cadmio	agua subterránea	4.81E-09	kg
Calcio	agua subterránea	7.25E-05	kg
Cloruro	agua subterránea	3.18E-04	kg
Cromo VI	agua subterránea	3.18E-08	kg
Cobalto	agua subterránea	4.60E-08	kg
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	agua subterránea	5.54E-04	kg
Cobre	agua subterránea	5.42E-08	kg
DOC, Carbono Orgánico Disuelto	agua subterránea	1.26E-03	kg
Flúor	agua subterránea	4.25E-07	kg



Tabla 3.18 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del RESA (continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
RSU Etapa Clausura RESA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Hierro	agua subterránea	2.78E-05	kg
Azufre	agua subterránea	3.10E-05	kg
Plomo	agua subterránea	1.63E-08	kg
Magnesio	agua subterránea	5.60E-05	kg
Manganeso	agua subterránea	2.35E-06	kg
Mercurio	agua subterránea	8.27E-11	kg
Naftalina	agua subterránea	1.55E-08	kg
Níquel	agua subterránea	5.42E-08	kg
Fosfato	agua subterránea	7.74E-07	kg
Potasio	agua subterránea	1.69E-04	kg
Selenio	agua subterránea	2.48E-09	kg
Plata	agua subterránea	1.04E-08	kg
Sodio	agua subterránea	9.12E-05	kg
Sulfato	agua subterránea	7.10E-05	kg
TOC, Carbono Orgánico Total	agua subterránea	2.98E-07	kg
Zinc	agua subterránea	6.16E-07	kg
Tolueno	agua subterránea	1.71E-08	kg
Xileno	agua subterránea	3.95E-08	kg
Fenol	agua subterránea	2.43E-09	kg
Cloroformo	agua subterránea	2.32E-10	kg
Berilio	agua subterránea	3.72E-09	kg
Estroncio	agua subterránea	1.36E-06	kg

3.3.4. Inventario de la construcción del Sitio Controlado

Para el ICV de la etapa de construcción del SC, se consideraron las entradas de materiales de la naturaleza y la tecnosfera, la energía y los procesos asociados a la deforestación, creación de caminos (bulldozer), excavación de la celda y laguna de lixiviados (excavadora, retroexcavadora), movimiento de tierra dentro de la celda (bulldozer), compactación del suelo de la celda (compactadora de rodillos vibratorios), y transporte de materiales dentro y fuera del SDF (vehículos), así como la instalación



de los tubos de PVC para los pozos de venteo y la colocación de la geomembrana en la laguna de lixiviados. Todos estos procesos fueron modelados a partir de la operación de la maquinaria correspondiente, cuyos datasets se presentan en las Tablas 3.19 a 3.21. Estos datasets fueron incluidos en la Tabla 3.22. Asimismo, en el Anexo J se muestran los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.19 Inventario de la Excavadora 320 en la construcción del SC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Excavadora 320 Operación de máquina, diésel SC-Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	477	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	10136	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	326.197	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	2.319E+01	kg
Monóxido de carbono fósil	7.671E-02	kg
Metano, fósil	2.000E-01	kg
Óxidos de nitrógeno	1.167E-01	kg
Partículas, < 2,5 um	2.505E-02	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	2.583E-02	kg
Dióxido de azufre	2.132E-04	kg
Hidrocarburos, sin especificar	9.000E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	283.828	kg



Tabla 3.20 Inventario del Bulldozer en la construcción del SC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Operación de máquina bulldozer, diésel SC-Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	64	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	1090	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	43.767	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	2.763E+00	kg
Monóxido de carbono fósil	7.180E-03	kg
Óxidos de nitrógeno	2.846E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	1.723E-03	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	1.800E-03	kg
Dióxido de azufre	2.540E-05	kg
Hidrocarburos, sin especificar	1.900E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	38.082	kg

Tabla 3.21 Inventario del Compactador de Rodillos en la construcción del SC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Operación de Máquina Compactadora de Rodillos Vibratorios, diésel SC- Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	6	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	30.6	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	4.103	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	2.343E-01	kg
Monóxido de carbono fósil	5.943E-04	kg
Óxidos de nitrógeno	1.161E-03	kg
Partículas, < 2,5 um	1.192E-04	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	1.229E-04	kg
Dióxido de azufre	2.154E-06	kg
Hidrocarburos, sin especificar	8.626E-05	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites usados Corte, U	3.570	kg



En la Tabla 3.22, se muestran los datasets creados para la construcción del SC. Asimismo, en el Anexo K, se presentan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.22 Construcción del SC en función de 1.0 t de RSU.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Instalación de Sitio Controlado (SC) CONSTRUCCIÓN {MX} Construcción Corte, U	1	p
Recursos de la naturaleza		
Transformación, de bosque, extensivo, MX	8.866E-02	m ²
Arcilla	1.13E+03	kg
Materiales/combustibles		
Acero de refuerzo {MX} mercado Corte, U	2.670E-02	kg
Cemento, Portland {MX} mercado Corte, U	1.200E-01	kg
Grava, triturada {MX} Mercado de grava triturada Corte, U	2.190E-04	kg
Piedra caliza, sin procesar {MX} Mercado de piedra caliza sin procesar Corte, U	9.850E-04	kg
Arena {MX} Mercado de la arena Corte, U	2.210E-04	kg
Agua del grifo {MX} Grupo de mercado Corte, U	8.960E-02	kg
Ladrillo silicocalcáreo {MX} mercado para Corte, U	7.130E-02	kg
*Excavadora 320 Operación de máquina, diésel SC-Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	9.847E-05	hr
**Operación de máquina bulldozer, diésel SC-Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U		
***Operación de Máquina Compactadora de Rodillos Vibratorios, diésel SC-Construcción {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	1.050E-03	hr
Extrusión, película plástica {GLO} mercado para Corte, U	2.290E-02	kg
Polietileno, alta densidad, granulado {GLO} mercado para Corte, U	2.238E-02	kg
Extrusión, tubos de plástico {GLO} mercado para Corte, U	3.150E-03	kg
Cloruro de polivinilo, polimerizado en suspensión {GLO} mercado Corte, U	2.769E-03	kg
Polietileno, lineal de baja densidad, granulado {RoW} Producción Corte, U	1.827E-04	kg
Carbonato de calcio, precipitado {RER} Producción de carbonato de calcio precipitado Corte, U	1.512E-04	kg
Cloruro de polivinilo, polimerizado en suspensión {RER} Producción de cloruro de polivinilo, polimerización en suspensión Corte, U	3.150E-05	kg
Polipropileno, granulado {RER} Producción Corte, U	1.575E-05	kg



Tabla 3.22 Construcción del SC en función de 1.0 t de RSU (continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Instalación de Sitio Controlado (SC) CONSTRUCCIÓN {MX} Construcción Corte, U	1	p
Recursos de la naturaleza		
Transformación, de bosque, extensivo, MX	8.866E-02	m ²
Arcilla	1.13E+03	kg
Electricidad/calor		
Transporte de arcilla a banco de materiales, carga, camión 16-32 tonelada, EURO3 - SC Construcción {MX} transporte, carga, camión 16-32 toneladas, EURO3 Corte, U	1.400E+01	tkm
Transporte de materiales, carga, camión 7,5-16 tonelada métrica, euro5 {RER} mercado para transporte, mercancías, camión 7,5-16 tonelada métrica, EURO5 Corte, U	8.340E-01	tkm
Transporte de geomembrana para laguna, carga, camión 3,5-7,5 tonelada métrica, euro5 {RER} mercado para transporte, mercancías, camión 3,5-7,5 tonelada métrica, EURO5 Corte, U	1.100E-02	tkm

* Dataset de la Excavadora 320 presentado en la Tabla 3.19.

** Dataset del Bulldozer presentado en la Tabla 3.20.

*** Dataset del Compactador de Rodillos Vibratorios presentado en la Tabla 3.21.

3.3.5. Inventario de la operación del Sitio Controlado

Para el ICV de la etapa de operación del SC, se consideraron las entradas de materiales de la naturaleza y la tecnosfera, la energía eléctrica (báscula) y los procesos asociados a la compactación de los RSU (Máquina compactadora de RSU), la excavación para extracción de material de cobertura del banco de materiales (excavadora), colocación de cobertura (retroexcavadora), y el transporte de materiales y de los RSU (vehículos). Todos estos procesos fueron modelados a partir de la operación de la maquinaria correspondiente, cuyos datasets se presentan en las Tablas 3.23 a 3.26. Estos datasets fueron incluidos en la Tabla 3.27. Asimismo, en el Anexo L se muestran los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.



Tabla 3.23 Inventario del Compactador de RSU 826 en la operación del SC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Operación de Máquina Compactadora de Residuos, diésel SC-Operación{MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	23984.4	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	774696	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	16401.790	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	2.302E+03	kg
Monóxido de carbono fósil	6.508E+00	kg
Óxidos de nitrógeno	1.149E+01	kg
Partículas, < 2,5 um	1.160E+00	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	1.196E+00	kg
Dióxido de azufre	2.116E-02	kg
Hidrocarburos, sin especificar	7.896E-01	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	14271.413	kg

Tabla 3.24 Inventario de la Retroexcavadora 580 en la operación del SC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Retroexcavadora 580 Operación de máquina, diésel SC-Operación {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	323	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	2746	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	220.884	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	4.012E+00	kg
Monóxido de carbono fósil	1.167E-02	kg
Óxidos de nitrógeno	1.829E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	2.569E-03	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	2.648E-03	kg
Dióxido de azufre	3.688E-05	kg
Hidrocarburos, sin especificar	1.516E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	192.194	kg



Tabla 3.25 Inventario de la Excavadora 320 en la operación del SC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Excavadora 320 Operación de máquina, diésel SC-Operación {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	167	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	3549	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	114.203	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	8.118E+00	kg
Monóxido de carbono fósil	2.273E-02	kg
Óxidos de nitrógeno	4.043E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	5.716E-03	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	5.893E-03	kg
Dióxido de azufre	7.463E-05	kg
Hidrocarburos, sin especificar	3.044E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	99.369	kg



En la Tabla 3.26, se muestra la estimación de las emisiones generadas por los vehículos recolectores dentro del SC. Es importante destacar que se utilizó y se adaptó el inventario de Ecoinvent para poder determinar las emisiones producidas por los vehículos recolectores.

Tabla 3.26 Inventario de emisiones de los vehículos recolectores en el SC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Transporte de recolección de residuos municipales en camión de 21 toneladas -SC - Operación {MX} Procesamiento Corte, U		13.912	tkm
Materiales/combustibles			
Diésel {MX} Grupo de mercado para Corte, U		0.5185	kg
Camión de recogida de residuos, 21 toneladas métricas {GLO} mercado para Corte, U		6.288E-06	p
Emisiones a la atmósfera			
Amoníaco	Alto. pop.	1.106E-04	kg
Benceno	Alto. pop.	9.418E-04	kg
Cadmio	Alto. pop.	6.233E-08	kg
Dióxido de carbono fósil	Alto. pop.	1.475E+01	kg
Monóxido de carbono fósil	Alto. pop.	3.798E-02	kg
Cromo	Alto. pop.	2.351E-07	kg
Cobre	Alto. pop.	7.944E-06	kg
Monóxido de dinitrógeno	Alto. pop.	7.304E-04	kg
Plomo	Alto. pop.	6.775E-08	kg
Metano, fósil	Alto. pop.	1.177E-03	kg
Níquel	Alto. pop.	3.269E-07	kg
Óxidos de nitrógeno	Alto. pop.	1.055E-01	kg
COVNM, compuestos orgánicos volátiles no metánicos	Alto. pop.	4.800E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	Alto. pop.	8.556E-03	kg
Partículas, > 10 um	Alto. pop.	2.435E-03	kg
Partículas, > 2.5 um y < 10 um	Alto. pop.	1.461E-03	kg
Selenio	Alto. pop.	4.674E-08	kg
Dióxido de azufre	Alto. pop.	2.810E-03	kg
Tolueno	Alto. pop.	3.770E-04	kg
Xileno	Alto. pop.	3.770E-04	kg
Zinc	Alto. pop.	4.633E-05	kg



En la Tabla 3.27, se muestran los datasets creados para la operación del SC. Asimismo, en el Anexo M, se presentan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.27 Operación del SC en función de 1.0 t de RSU.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Cargas específicas del proceso, SC OPERACIÓN {MX} cargas específicas del proceso, sitio controlado Corte, U	1	t
Productos evitados		
Recursos de la naturaleza		
Arcilla	411.6	kg
Materiales/combustibles		
*Operación de Máquina Compactadora de Residuos, diésel SC-Operación{MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	3.936E-01	hr
**Retroexcavadora 580 Operación de máquina, diésel SC-Operación {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	2.741E-03	hr
***Excavadora 320 Operación de máquina, diésel SC-Operación {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	5.301E-03	hr
Electricidad/calor		
Electricidad de baja tensión {MX} mercado para Corte, U	1.500E-03	kWh
Transporte de recolección de residuos municipales en camión de 21 toneladas -SC - Operación {MX} Procesamiento Corte, U	1.391E+01	tkm
Transporte de arcilla banco de materiales, carga, camión 16-32 toneladas, EURO3 - SC Operación {MX} transporte, carga, camión 16-32 toneladas, EURO3 Corte, U	1.400E+01	tkm
Transporte de materiales, carga, camión 16-32 toneladas métrica, euro5 {RER} mercado para transporte, mercancías, camión 16-32 toneladas, EURO5 Corte, U	8.340E-01	tkm
Residuos a tratamiento		
Residuos sólidos urbanos Etapa Operación SC {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t

* Dataset de la máquina Compactadora presentado en la Tabla 3.23.

** Dataset de la Retroexcavadora 580 presentado en la Tabla 3.24.

*** Dataset de la Excavadora 320 presentado en la Tabla 3.25.

Esta etapa al igual que el RESA, comprende la disposición de los RSU, la compactación y la cobertura intermedia. En la Figura 3.10 se muestra la composición promedio de los residuos dispuestos en el SC, la cual fue obtenida de las bases de datos del INEGI (INEGI, 2021).

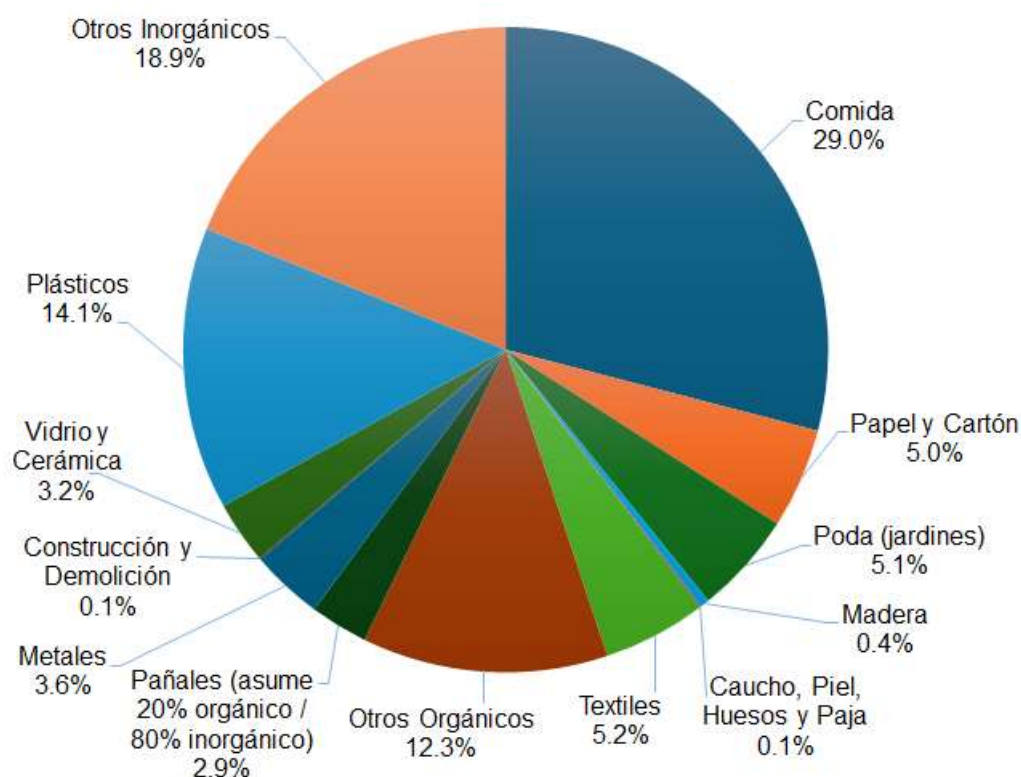


Figura 3.10 Composición de los RSU dispuestos en el SC.

Con la disposición inicial de 5,600 t de RSU y un incremento anual en la disposición de RSU del 2%, se alcanzaría la capacidad total del sitio de 60,930 t de RSU en 10 años.

Los resultados de la estimación de generación de biogás con el MMB 2.0 en un tiempo horizonte de 100 años, mostraron que se obtendría un total de biogás de 6,713,876 m³ (concentración del 50% de CH₄). En la Tabla 3.28 y el Anexo N, se presenta el CH₄ obtenido en las etapas de operación y clausura.

Tabla 3.28 Emisiones Biogás y CH₄ en las etapas del SC.

ACTIVIDAD	BIOGÁS (m ³)	BIOGÁS (kg/t RSU)	CH ₄ (kg/t RSU)
Operación (10 años)	2,027,096	33.26	11.92
Clausurado (90 años)	4,686,780	76.92	27.56

En la Tabla 3.29 y el Anexo O, se muestra el resultado de la estimación de los compuestos presentes en el biogás y lixiviados emitidos en la etapa de operación del SC. Se consideró que el 35% del biogás es liberado por los pozos de venteo y el 65% restante es emitido a través de la cobertura intermedia, con un porcentaje de oxidación (Olesen & Damgaard, 2014). Por otro lado, en la generación de lixiviados, se consideró una infiltración del 100% a la capa freática (Ecoinvent, 2023).

Tabla 3.29 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del SC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Operación SC {MX} tratamiento de, relleno sanitario (TOTAL EMISIONES RSU) Corte, U	1	tonelada	RSU
Productos evitados			
Recursos			
Materiales/combustibles			
Electricidad/calor			
Emisiones a la atmósfera			
Aluminio	Bajo. pop.	9.76E-06	kg
Antimonio	Bajo. pop.	3.24E-07	kg
Arsénico	Bajo. pop.	3.74E-07	kg



Tabla 3.29 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del SC
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Operación SC {MX} tratamiento de, relleno sanitario (TOTAL EMISIONES RSU) Corte, U	1	tonelada	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Bario	Bajo. pop.	3.16E-05	kg
Cadmio	Bajo. pop.	4.74E-07	kg
Monóxido de carbono biogénico	Bajo. pop.	6.99E-04	kg
Cromo	Bajo. pop.	3.74E-07	kg
Cobre	Bajo. pop.	3.00E-07	kg
Hierro	Bajo. pop.	1.15E-06	kg
Plomo	Bajo. pop.	2.25E-07	kg
Manganeso	Bajo. pop.	4.99E-07	kg
Mercurio	Bajo. pop.	2.50E-08	kg
Metano biogénico	Bajo. pop.	1.01E+01	kg
Molibdeno	Bajo. pop.	9.98E-08	kg
Níquel	Bajo. pop.	1.75E-07	kg
Óxidos de nitrógeno	Bajo. pop.	1.15E-04	kg
Dióxido de azufre	Bajo. pop.	1.65E-04	kg
Zinc	Bajo. pop.	1.54E-05	kg
Sulfuro de hidrógeno	Bajo. pop.	9.12E-04	kg
COV, compuestos orgánicos volátiles como C	Bajo. pop.	5.54E-04	kg
Benceno	Bajo. pop.	1.77E-04	kg
Clorobenceno	Bajo. pop.	4.04E-05	kg
Propilbenceno	Bajo. pop.	4.56E-05	kg
Cloroformo	Bajo. pop.	5.48E-06	kg
Xileno	Bajo. pop.	8.43E-04	kg
Tolueno	Bajo. pop.	2.22E-03	kg
Fenol	Bajo. pop.	2.02E-05	kg
Naftalina	Bajo. pop.	1.43E-05	kg
Metano, triclorofluoro-, CFC-11	Bajo. pop.	1.52E-05	kg
Metano, diclorodifluoro-, CFC-12	Bajo. pop.	1.09E-04	kg
Etano, 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Bajo. pop.	1.25E-05	kg
Metano, diclorofluoro-, HCFC-21	Bajo. pop.	1.85E-04	kg
Metano, clorodifluoro-, HCFC-22	Bajo. pop.	6.19E-05	kg
2-Propanol	Bajo. pop.	3.07E-03	kg
Acetona	Bajo. pop.	4.15E-04	kg
Acrilonitrilo	Bajo. pop.	3.43E-04	kg
Sulfuro de carbonilo	Bajo. pop.	3.00E-05	kg



Tabla 3.29 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del SC
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Operación SC {MX} tratamiento de, relleno sanitario (TOTAL EMISIONES RSU) Corte, U	1	tonelada	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Sulfuro de dimetilo	Bajo. pop.	4.96E-04	kg
Etano	Bajo. pop.	2.73E-02	kg
Metilmercaptano	Bajo. pop.	1.22E-04	kg
Tiol de etano	Bajo. pop.	1.45E-04	kg
Hexano	Bajo. pop.	5.78E-04	kg
Pentano	Bajo. pop.	2.42E-04	kg
Propano	Bajo. pop.	4.99E-04	kg
Amoníaco	Bajo. pop.	1.70E-04	kg
Metano, dicloro-, HCC-30	Bajo. pop.	1.94E-04	kg
Metano, tetracloro-, CFC-10	Bajo. pop.	1.75E-04	kg
Metano, monocloro-, R-40	Bajo. pop.	1.25E-05	kg
Triclorobencenos	Bajo. pop.	1.10E-05	kg
Etano, 1,1,1-tricloro-, HCFC-140	Bajo. pop.	1.37E-06	kg
Etano, 1,2-dicloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Bajo. pop.	1.85E-05	kg
etano, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Bajo. pop.	5.49E-05	kg
Isobutano	Bajo. pop.	1.79E-04	kg
Decano	Bajo. pop.	4.77E-03	kg
Nonano	Bajo. pop.	4.84E-04	kg
Undecano	Bajo. pop.	2.26E-03	kg
3-Metiloctano	Bajo. pop.	1.79E-03	kg
Pentano	Bajo. pop.	2.99E-04	kg
Heptano	Bajo. pop.	3.16E-04	kg
Dodecano	Bajo. pop.	4.18E-04	kg
Etanol	Bajo. pop.	1.28E-03	kg
Butano	Bajo. pop.	2.98E-04	kg
Emisiones al agua			
Amoníaco	agua subterránea	1.48E-01	kg
Antimonio	agua subterránea	5.89E-06	kg
Arsénico	agua subterránea	2.68E-06	kg
Bario	agua subterránea	2.73E-05	kg
Benceno	agua subterránea	4.51E-07	kg
DBO ₅ (Demanda Biológica de Oxígeno)	agua subterránea	1.26E-01	kg
Boro	agua subterránea	5.82E-04	kg



Tabla 3.29 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de operación del SC
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Operación SC {MX} tratamiento de, relleno sanitario (TOTAL EMISIONES RSU) Corte, U	1	tonelada	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Cadmio	agua subterránea	8.16E-07	kg
Calcio	agua subterránea	5.10E-02	kg
Cloruro	agua subterránea	1.01E-01	kg
Cromo VI	agua subterránea	4.95E-06	kg
Cobalto	agua subterránea	5.30E-06	kg
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	agua subterránea	4.87E-01	kg
Cobre	agua subterránea	6.25E-06	kg
DOC, Carbono Orgánico Disuelto	agua subterránea	1.45E-01	kg
Flúor	agua subterránea	4.90E-05	kg
Azufre	agua subterránea	3.57E-03	kg
Hierro	agua subterránea	3.00E-02	kg
Plomo	agua subterránea	3.17E-06	kg
Magnesio	agua subterránea	2.20E-02	kg
Manganeso	agua subterránea	2.71E-04	kg
Mercurio	agua subterránea	1.83E-08	kg
Naftalina	agua subterránea	1.83E-06	kg
Níquel	agua subterránea	6.25E-06	kg
Fosfato	agua subterránea	8.93E-05	kg
Potasio	agua subterránea	1.95E-02	kg
Selenio	agua subterránea	5.48E-07	kg
Plata	agua subterránea	5.52E-06	kg
Sodio	agua subterránea	3.31E-02	kg
Sulfato	agua subterránea	2.31E-02	kg
TOC, Carbono Orgánico Total	agua subterránea	3.43E-05	kg
Zinc	agua subterránea	1.93E-04	kg
Tolueno	agua subterránea	4.59E-06	kg
Xileno	agua subterránea	5.85E-06	kg
Fenol	agua subterránea	4.38E-07	kg
Cloroformo	agua subterránea	2.68E-08	kg
Berilio	agua subterránea	4.29E-07	kg
Estroncio	agua subterránea	1.57E-04	kg



3.3.6. Inventario de la clausura del Sitio Controlado

Para el ICV de la etapa de clausura del SC, se consideraron las entradas de materiales de la naturaleza y la tecnosfera, el combustible para maquinaria y los procesos asociados a la extracción de material de cobertura final desde el banco de materiales (excavadora), el movimiento de tierra dentro de la celda (bulldozer), la compactación de la cobertura (compactadora de rodillos vibratorios), la colocación de pastizal, el transporte de materiales dentro y fuera del SDF (vehículos), así como la extracción de material de cobertura desde el banco de materiales para mantenimiento (excavadora) y el bombeo de lixiviados (combustible). Todos estos procesos fueron modelados a partir de la operación de la maquinaria correspondiente, cuyos datasets se presentan en las Tablas 3.30 a 3.32. Estos datasets fueron incluidos en la Tabla 3.33. Asimismo, en el Anexo P se muestran los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.30 Inventario de la Excavadora 320 en la clausura del SC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Excavadora 320 Manejo de máquinas, diésel SC-Clausura{MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	74	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	1562	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	50.263	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	3.573E+00	kg
Monóxido de carbono fósil	9.456E-03	kg
Óxidos de nitrógeno	1.774E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	2.110E-03	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	2.175E-03	kg
Dióxido de azufre	3.285E-05	kg
Hidrocarburos, sin especificar	1.326E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	43.734	kg



Tabla 3.31 Inventario del Bulldozer en la clausura del SC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Operación de máquina bulldozer, diésel SC-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	138	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	2346	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	94.372	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	5.957E+00	kg
Monóxido de carbono fósil	1.597E-02	kg
Óxidos de nitrógeno	6.184E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	4.286E-03	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	4.418E-03	kg
Dióxido de azufre	5.476E-05	kg
Hidrocarburos, sin especificar	4.116E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	82.114	kg

Tabla 3.32 Inventario del Compactador de Rodillos en la clausura del SC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Operación de la máquina compactadora de rodillos vibratorios, diésel SC- Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	8	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	41	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	5.471	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	3.124E-01	kg
Monóxido de carbono fósil	7.934E-04	kg
Óxidos de nitrógeno	1.547E-03	kg
Partículas, < 2,5 um	1.597E-04	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	1.646E-04	kg
Dióxido de azufre	2.872E-06	kg
Hidrocarburos, sin especificar	1.150E-04	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	4.760	kg



En la Tabla 3.33, se muestran los datasets creados para la operación del RESA. Asimismo, en el Anexo Q, se presentan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV. Cabe resaltar que, para la estimación de los materiales de este inventario, se ocupó como base lo requerido para la clausura del RESA.

Tabla 3.33 Clausura del SC en función de 1.0 t de RSU.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Instalación de Sitio Controlado (SC) - SC CLAUSURA {MX} Clausura Corte, U	1	p
Recursos de la naturaleza		
Transformación, a pastizal/pradera, MX	8.866E-02	m ²
Arcilla	1.82E+02	kg
Materiales/combustibles		
Agua del grifo {MX} Grupo de mercado para Corte, U	3.282E-01	kg
*Excavadora 320 Manejo de máquinas, diésel SC-Clausura{MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	1.2063E-03	hr
**Operación de máquina bulldozer, diésel SC-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	2.265E-03	hr
***Operación de la máquina compactadora de rodillos vibratorios, diésel SC-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	1.313E-04	hr
Extrusión, tubos de plástico {GLO} mercado para Corte, U	5.672E-03	kg
Polietileno, alta densidad, granulado {GLO} mercado para Corte, U	5.544E-03	kg
Electricidad/calor		
Gasolina, baja en azufre {RoW} mercado para Corte, U	5.585E-02	kg
Transporte de arcilla, carga, camión 16-32 toneladas, EURO3 - SC Clausura {MX} transporte, carga, camión 16-32 toneladas, EURO3 Corte, U	9.333E+00	tkm
Transporte de materiales, carga, camión 16-32 toneladas métrica, euro5 {RER} mercado para transporte, mercancías, camión 16-32 toneladas, EURO5 Corte, U	8.340E-01	tkm
Residuos a tratamiento		
Residuos sólidos urbanos Etapa Clausura SC {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t

* Dataset de la Excavadora 320 presentado en la Tabla 3.30.

** Dataset del Bulldozer presentado en la Tabla 3.31.

*** Dataset del compactador de rodillos vibratorios presentado en la Tabla 3.32.



En esta etapa el biogás es quemado en las antorchas de los pozos de venteo, donde se consideró una eficiencia promedio de captación y quemado de biogás del 75% de acuerdo con reportes de la EPA (Olesen & Damgaard, 2014; Doka, 2009), mientras que el 25% restante es liberado a la atmósfera a través emisiones fugitivas, con un porcentaje de oxidación debido a la cobertura de suelo (Olesen & Damgaard, 2014) (Anexo R).

Por otro lado, en la generación de lixiviados, se tomó en cuenta la infiltración del 100% a la capa freática (Ecoinvent, 2023) (Tabla 3.34). En el Anexo R, se detallan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.34 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del SC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Clausura SC {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Productos evitados			
Recursos			
Materiales/combustibles			
Electricidad/calor			
Emisiones a la atmósfera			
Aluminio	Bajo. pop.	7.52E-06	kg
Antimonio	Bajo. pop.	2.50E-07	kg
Arsénico	Bajo. pop.	2.88E-07	kg
Bario	Bajo. pop.	2.43E-05	kg
Cadmio	Bajo. pop.	3.65E-07	kg
Monóxido de carbono biogénico	Bajo. pop.	2.19E-02	kg
Cromo	Bajo. pop.	2.88E-07	kg
Cobre	Bajo. pop.	2.31E-07	kg
Ácido clorhídrico	Bajo. pop.	4.90E-03	kg
Fluoruro de hidrógeno	Bajo. pop.	1.15E-03	kg
Hierro	Bajo. pop.	8.85E-07	kg
Plomo	Bajo. pop.	1.73E-07	kg



Tabla 3.34 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del SC
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Clausura SC {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Manganeso	Bajo. pop.	3.85E-07	kg
Mercurio	Bajo. pop.	1.92E-08	kg
Metano biogénico	Bajo. pop.	5.62E+00	kg
Molibdeno	Bajo. pop.	7.69E-08	kg
Níquel	Bajo. pop.	1.35E-07	kg
Óxidos de nitrógeno	Bajo. pop.	2.63E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	Bajo. pop.	2.02E-03	kg
Dióxido de azufre	Bajo. pop.	5.03E-03	kg
Zinc	Bajo. pop.	1.19E-05	kg
Sulfuro de hidrógeno	Bajo. pop.	6.92E-04	kg
COV, compuestos orgánicos volátiles como C	Bajo. pop.	9.81E-04	kg
Benceno	Bajo. pop.	1.34E-04	kg
Clorobenceno	Bajo. pop.	3.00E-05	kg
Propilbenceno	Bajo. pop.	3.46E-05	kg
Cloroformo	Bajo. pop.	3.98E-06	kg
Xileno	Bajo. pop.	6.31E-04	kg
Tolueno	Bajo. pop.	1.65E-03	kg
Fenol	Bajo. pop.	1.50E-05	kg
Naftalina	Bajo. pop.	1.10E-05	kg
Metano, triclorofluoro-, CFC-11	Bajo. pop.	1.06E-05	kg
Metano, diclorodifluoro-, CFC-12	Bajo. pop.	8.17E-05	kg
Etano, 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Bajo. pop.	9.62E-06	kg
Metano, diclorofluoro-, HCFC-21	Bajo. pop.	1.35E-04	kg
Metano, clorodifluoro-, HCFC-22	Bajo. pop.	4.62E-05	kg
2-Propanol	Bajo. pop.	2.37E-03	kg
Acetona	Bajo. pop.	3.20E-04	kg
Acrilonitrilo	Bajo. pop.	2.64E-04	kg
Sulfuro de carbonilo	Bajo. pop.	2.31E-05	kg
Sulfuro de dimetilo	Bajo. pop.	3.82E-04	kg
Etano	Bajo. pop.	2.10E-02	kg
Metilmercaptano	Bajo. pop.	9.42E-05	kg
Tiol de etano	Bajo. pop.	1.11E-04	kg
Hexano	Bajo. pop.	4.45E-04	kg
Pentano	Bajo. pop.	1.87E-04	kg



Tabla 3.34 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del SC
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Clausura SC {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Propano	Bajo. pop.	3.85E-04	kg
Amoníaco	Bajo. pop.	1.31E-04	kg
Metano, dicloro-, HCC-30	Bajo. pop.	1.38E-04	kg
Metano, tetracloro-, CFC-10	Bajo. pop.	1.35E-04	kg
Metano, monocloro-, R-40	Bajo. pop.	9.62E-06	kg
Triclorobencenos	Bajo. pop.	8.50E-06	kg
Etano, 1,1,1-tricloro-, HCFC-140	Bajo. pop.	1.06E-06	kg
Etano, 1,2-dicloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Bajo. pop.	1.43E-05	kg
etano, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Bajo. pop.	4.23E-05	kg
Isobutano	Bajo. pop.	1.38E-04	kg
Decano	Bajo. pop.	3.68E-03	kg
Nonano	Bajo. pop.	3.73E-04	kg
Undecano	Bajo. pop.	1.74E-03	kg
3-Metiloctano	Bajo. pop.	1.38E-03	kg
Pentano	Bajo. pop.	2.31E-04	kg
Heptano	Bajo. pop.	2.43E-04	kg
Dodecano	Bajo. pop.	3.22E-04	kg
Dioxinas (EQT)	Bajo. pop.	1.93E-11	kg
Butano	Bajo. pop.	2.30E-04	kg
Etanol	Bajo. pop.	9.85E-04	kg
Emisiones al agua			
Amoníaco	agua subterránea	1.59E-01	kg
Antimonio	agua subterránea	9.52E-05	kg
Arsénico	agua subterránea	4.33E-05	kg
Bario	agua subterránea	2.31E-04	kg
Benceno	agua subterránea	5.77E-06	kg
DBO ₅ (Demanda Biológica de Oxígeno)	agua subterránea	5.77E-02	kg
Boro	agua subterránea	9.40E-03	kg
Cadmio	agua subterránea	8.65E-06	kg
Calcio	agua subterránea	8.65E-02	kg
Cloruro	agua subterránea	5.19E-01	kg
Cromo VI	agua subterránea	5.77E-05	kg



Tabla 3.34 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del SC
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Clausura SC {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Cobalto	agua subterránea	8.56E-05	kg
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	agua subterránea	5.77E-01	kg
Cobre	agua subterránea	1.01E-04	kg
DOC, Carbono Orgánico Disuelto	agua subterránea	2.34E+00	kg
Flúor	agua subterránea	7.91E-04	kg
Azufre	agua subterránea	5.77E-02	kg
Hierro	agua subterránea	2.16E-02	kg
Plomo	agua subterránea	2.88E-05	kg
Magnesio	agua subterránea	8.65E-02	kg
Manganeso	agua subterránea	4.38E-03	kg
Mercurio	agua subterránea	1.44E-07	kg
Naftalina	agua subterránea	2.88E-05	kg
Níquel	agua subterránea	1.01E-04	kg
Fosfato	agua subterránea	1.44E-03	kg
Potasio	agua subterránea	3.15E-01	kg
Selenio	agua subterránea	4.33E-06	kg
Plata	agua subterránea	1.44E-05	kg
Sodio	agua subterránea	1.44E-01	kg
Sulfato	agua subterránea	1.15E-01	kg
TOC, Carbono Orgánico Total	agua subterránea	5.54E-04	kg
Zinc	agua subterránea	1.01E-03	kg
Tolueno	agua subterránea	2.88E-05	kg
Xileno	agua subterránea	7.21E-05	kg
Fenol	agua subterránea	4.33E-06	kg
Cloroformo	agua subterránea	4.33E-07	kg
Berilio	agua subterránea	6.92E-06	kg
Estroncio	agua subterránea	2.53E-03	kg



3.3.7. Inventario de la operación del Sitio No Controlado

Para el ICV de la etapa de operación del SNC, se consideraron las entradas de materiales de la naturaleza y la tecnosfera, el combustible para maquinaria y los procesos asociados a la deforestación, el esparcimiento de los RSU (cargador frontal de orugas) y el transporte de materiales y de los RSU (vehículos). Estos procesos fueron modelados a partir de la operación de la maquinaria correspondiente, cuyos datasets se presentan en las Tablas 3.35 a 3.36. Estos datasets fueron incluidos en la Tabla 3.37. Asimismo, en el Anexo S se muestran los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.35 Inventario del Cargador frontal en la operación del SNC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Residuos Cargador frontal de orugas Operación de máquinas, diésel TCA - Operación {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	48490.2	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	741900	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	33160.140	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	4.654E+03	kg
Monóxido de carbono fósil	1.167E+01	kg
Óxidos de nitrógeno	2.323E+01	kg
Partículas, < 2,5 um	2.346E+00	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	2.419E+00	kg
Dióxido de azufre	4.278E-02	kg
Hidrocarburos, sin especificar	1.758E+00	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	28853.074	kg



En la Tabla 3.36, se muestra la estimación de las emisiones generadas por los vehículos recolectores dentro del SNC. Cabe mencionar que se utilizó y se adaptó el inventario de Ecoinvent para poder determinar las emisiones producidas por los vehículos recolectores.

Tabla 3.36 Inventario del transporte de los RSU dentro del SNC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Transporte de recolección de residuos municipales en camión de 21 toneladas -TCA - Operación {RER} Procesamiento Corte, U		20.837	tkm
Materiales/combustibles			
Diésel {MX} Grupo de mercado para Corte, U		3.915E-01	kg
Camión de recogida de residuos, 21 toneladas métricas {GLO} mercado para Corte, U		9.418E-06	p
Emisiones a la atmósfera			
Amoníaco	Alto. pop.	1.657E-04	kg
Benceno	Alto. pop.	1.411E-03	kg
Cadmio	Alto. pop.	9.335E-08	kg
Dióxido de carbono fósil	Alto. pop.	2.209E+01	kg
Monóxido de carbono fósil	Alto. pop.	5.689E-02	kg
Cromo	Alto. pop.	3.521E-07	kg
Cobre	Alto. pop.	1.190E-05	kg
Monóxido de dinitrógeno	Alto. pop.	1.094E-03	kg
Plomo	Alto. pop.	1.015E-07	kg
Metano, fósil	Alto. pop.	1.763E-03	kg
Níquel	Alto. pop.	4.897E-07	kg
Óxidos de nitrógeno	Alto. pop.	1.579E-01	kg
COVNM, compuestos orgánicos volátiles no metánicos	Alto. pop.	7.189E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	Alto. pop.	1.281E-02	kg
Partículas, > 10 um	Alto. pop.	3.646E-03	kg
Partículas, > 2.5 um y < 10 um	Alto. pop.	2.188E-03	kg
Selenio	Alto. pop.	7.001E-08	kg
Dióxido de azufre	Alto. pop.	4.209E-03	kg
Tolueno	Alto. pop.	5.647E-04	kg
Xileno	Alto. pop.	5.647E-04	kg
Zinc	Alto. pop.	6.939E-05	kg



En la Tabla 3.37, se muestran los datasets creados para la operación del SNC. Asimismo, en el Anexo T, se presentan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV. Cabe destacar que en esta etapa los RSU fueron esparcidos con un Cargador frontal de orugas para maximizar el espacio del SNC.

Tabla 3.37 Operación del SNC en función de 1.0 t de RSU.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Cargas específicas del proceso, NCS (TCA)- OPERACIÓN {MX} cargas específicas del proceso, sin sitio controlado Corte, U	1	t
Productos evitados		
Recursos de la naturaleza		
Transformación, de bosque, intensivo, MX	7.896E-02	m ²
Materiales/combustibles		
*Residuos Cargador frontal de orugas Operación de máquinas, diésel TCA - Operación{MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	1.894E-01	hr
Electricidad/calor		
Transporte recolector de residuos municipales en camión de 21 toneladas -TCA - Operación {RER} Procesamiento Corte, U	2.084E+01	tkm
Transporte de materiales, carga, camión 16-32 tonelada métrica, euro5 {RER} mercado para transporte, mercancías, camión 16-32 toneladas, EURO5 Corte, U	8.340E-01	tkm
Residuos a tratamiento		
Residuos sólidos urbanos Etapa Operación TCA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t

* Dataset del Cargador frontal de orugas presentado en la Tabla 3.35.

En la Figura 3.11 se presenta la composición de los residuos almacenados en el SNC, la cual fue obtenida de la caracterización *in-situ* (Martínez-Morales, 2021).

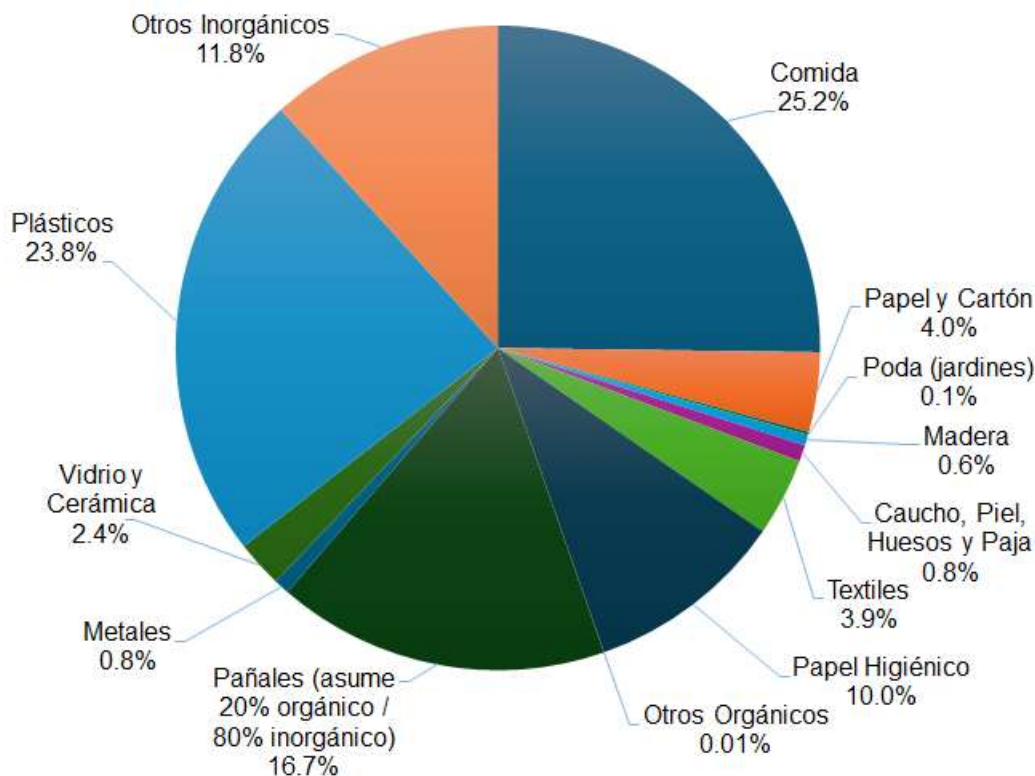


Figura 3.11 Composición de los RSU almacenados en el SNC.

Con la disposición inicial de 6,600 t de RSU y un incremento anual en la disposición de RSU del 1.1%, se alcanzaría la capacidad total del sitio de 255,965.83 t de RSU en 32 años.

Con los resultados de la estimación de generación de biogás con el MMB 2.0 en un tiempo horizonte de 100 años, se obtendría un total de biogás de 14,152,738 m³ (concentración del 50% de CH₄). En la Tabla 3.38 y el Anexo U, se presenta el CH₄ obtenido en las etapas de operación y clausura.

Tabla 3.38 Emisiones Biogás y CH₄ en las etapas del SNC.

ACTIVIDAD	BIOGÁS (m ³)	BIOGÁS (kg/t RSU)	CH ₄ (kg/t RSU)
Operación (32 años)	8,133,969	31.77	11.38
Clausurado (68 años)	6,018,768	23.51	8.42

En la Tabla 3.39, se muestra el resultado de la estimación de los compuestos presentes en el biogás y los lixiviados en la operación del SNC. En la etapa de operación se consideró que el 100% del biogás es emitido directamente a la atmósfera, debido a que los residuos no son cubiertos con material de cobertura. Por otro lado, en la generación de lixiviados, se consideró una infiltración del 100% a la capa freática (Ecoinvent, 2023). En el Anexo V, se detallan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.39 Compuestos en el biogás y lixiviados en la operación del SNC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Operación TCA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Productos evitados			
Recursos			
Materiales/combustibles			
Electricidad/calor			
Emisiones a la atmósfera			
Aluminio	Bajo. pop.	1.24E-05	kg
Antimonio	Bajo. pop.	4.13E-07	kg
Arsénico	Bajo. pop.	4.77E-07	kg
Bario	Bajo. pop.	4.02E-05	kg
Cadmio	Bajo. pop.	6.04E-07	kg



Tabla 3.39 Compuestos en el biogás y lixiviados en la operación del SNC
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Operación TCA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Monóxido de carbono biogénico	Bajo. pop.	8.90E-04	kg
Cromo	Bajo. pop.	4.77E-07	kg
Cobre	Bajo. pop.	3.81E-07	kg
Hierro	Bajo. pop.	1.46E-06	kg
Plomo	Bajo. pop.	2.86E-07	kg
Manganeso	Bajo. pop.	6.36E-07	kg
Mercurio	Bajo. pop.	3.18E-08	kg
Metano biogénico	Bajo. pop.	1.14E+01	kg
Molibdeno	Bajo. pop.	1.27E-07	kg
Níquel	Bajo. pop.	2.22E-07	kg
Óxidos de nitrógeno	Bajo. pop.	1.46E-04	kg
Dióxido de azufre	Bajo. pop.	2.10E-04	kg
Zinc	Bajo. pop.	1.96E-05	kg
Sulfuro de hidrógeno	Bajo. pop.	1.27E-03	kg
COV, compuestos orgánicos volátiles como C	Bajo. pop.	9.53E-04	kg
Benceno	Bajo. pop.	2.54E-04	kg
Clorobenceno	Bajo. pop.	6.36E-05	kg
Propilbenceno	Bajo. pop.	6.36E-05	kg
Cloroformo	Bajo. pop.	9.53E-06	kg
Xileno	Bajo. pop.	1.27E-03	kg
Tolueno	Bajo. pop.	3.50E-03	kg
Fenol	Bajo. pop.	3.18E-05	kg
Naftalina	Bajo. pop.	1.91E-05	kg
Metano, triclorofluoro-, CFC-11	Bajo. pop.	3.18E-05	kg
Metano, diclorodifluoro-, CFC-12	Bajo. pop.	1.59E-04	kg
Etano, 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Bajo. pop.	1.59E-05	kg
Metano, diclorofluoro-, HCFC-21	Bajo. pop.	3.18E-04	kg
Metano, clorodifluoro-, HCFC-22	Bajo. pop.	9.53E-05	kg
2-Propanol	Bajo. pop.	3.91E-03	kg
Acetona	Bajo. pop.	5.29E-04	kg
Acrilnitrilo	Bajo. pop.	4.36E-04	kg
Sulfuro de carbonilo	Bajo. pop.	3.82E-05	kg
Sulfuro de dimetilo	Bajo. pop.	6.31E-04	kg
Etano	Bajo. pop.	3.47E-02	kg
Metilmercaptano	Bajo. pop.	1.56E-04	kg



Tabla 3.39 Compuestos en el biogás y lixiviados en la operación del SNC
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Operación TCA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Tiol de etano	Bajo. pop.	1.84E-04	kg
Hexano	Bajo. pop.	7.35E-04	kg
Pentano	Bajo. pop.	3.08E-04	kg
Propano	Bajo. pop.	6.36E-04	kg
Amoníaco	Bajo. pop.	2.16E-04	kg
Metano, dicloro-, HCC-30	Bajo. pop.	3.69E-04	kg
Metano, tetracloro-, CFC-10	Bajo. pop.	2.22E-04	kg
Metano, monocloro-, R-40	Bajo. pop.	1.59E-05	kg
Triclorobencenos	Bajo. pop.	1.40E-05	kg
Etano, 1,1,1-tricloro-, HCFC-140	Bajo. pop.	1.75E-06	kg
Etano, 1,2-dicloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Bajo. pop.	2.36E-05	kg
etano, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Bajo. pop.	6.99E-05	kg
Isobutano	Bajo. pop.	2.28E-04	kg
Decano	Bajo. pop.	6.07E-03	kg
Nonano	Bajo. pop.	6.16E-04	kg
Undecano	Bajo. pop.	2.88E-03	kg
3-Metiloctano	Bajo. pop.	2.28E-03	kg
Pentano	Bajo. pop.	3.81E-04	kg
Heptano	Bajo. pop.	4.02E-04	kg
Dodecano	Bajo. pop.	5.32E-04	kg
Etanol	Bajo. pop.	1.63E-03	kg
Butano	Bajo. pop.	3.80E-04	kg
Emisiones al agua			
Amoníaco	agua subterránea	5.16E-01	kg
Antimonio	agua subterránea	5.41E-05	kg
Arsénico	agua subterránea	2.46E-05	kg
Bario	agua subterránea	1.72E-04	kg
Benceno	agua subterránea	3.57E-06	kg
DBO ₅ (Demanda Biológica de Oxígeno)	agua subterránea	8.96E-01	kg
Boro	agua subterránea	5.35E-03	kg
Cadmio	agua subterránea	5.80E-06	kg
Calcio	agua subterránea	1.91E-01	kg
Cloruro	agua subterránea	5.10E-01	kg
Cromo VI	agua subterránea	3.69E-05	kg



Tabla 3.39 Compuestos en el biogás y lixiviados en la operación del SNC
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Operación TCA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones al agua			
Cobalto	agua subterránea	4.87E-05	kg
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	agua subterránea	2.06E+00	kg
Cobre	agua subterránea	5.74E-05	kg
DOC, Carbono Orgánico Disuelto	agua subterránea	1.33E+00	kg
Flúor	agua subterránea	4.50E-04	kg
Azufre	agua subterránea	3.28E-02	kg
Hierro	agua subterránea	1.04E-01	kg
Plomo	agua subterránea	2.05E-05	kg
Magnesio	agua subterránea	1.00E-01	kg
Manganeso	agua subterránea	2.49E-03	kg
Mercurio	agua subterránea	1.12E-07	kg
Naftalina	agua subterránea	1.70E-05	kg
Níquel	agua subterránea	5.74E-05	kg
Fosfato	agua subterránea	8.20E-04	kg
Potasio	agua subterránea	1.79E-01	kg
Selenio	agua subterránea	3.34E-06	kg
Plata	agua subterránea	2.23E-05	kg
Sodio	agua subterránea	1.57E-01	kg
Sulfato	agua subterránea	1.17E-01	kg
TOC, Carbono Orgánico Total	agua subterránea	3.15E-04	kg
Zinc	agua subterránea	9.80E-04	kg
Tolueno	agua subterránea	2.52E-05	kg
Xileno	agua subterránea	4.51E-05	kg
Fenol	agua subterránea	2.76E-06	kg
Cloroformo	agua subterránea	2.46E-07	kg
Berilio	agua subterránea	3.94E-06	kg
Estroncio	agua subterránea	1.44E-03	kg



3.3.8. Inventario para la clausura del Sitio No Controlado

Para el ICV de la etapa de clausura del SNC, se consideraron las entradas de materiales de la naturaleza y la tecnosfera, el combustible para maquinaria y los procesos asociados a la extracción de material de cobertura final (excavadora y retroexcavadora), al esparcimiento de cobertura (bulldozer), la compactación de la cobertura (compactadora de rodillos vibratorios), la colocación de pastizal, y el transporte de materiales dentro y fuera del SDF (vehículos). Todos estos procesos fueron modelados a partir de la operación de la maquinaria correspondiente, cuyos datasets se presentan en las Tablas 3.40 a 3.43. Estos datasets fueron incluidos en la Tabla 3.44. Asimismo, en el Anexo W se muestran los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.40 Inventario de la Excavadora 320 en la clausura del SNC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Excavadora 320 Manejo de máquinas, diésel TCA-Clausura{MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	248	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	5270	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	169.595	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	1.206E+01	kg
Monóxido de carbono fósil	3.536E-02	kg
Óxidos de nitrógeno	6.020E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	9.675E-03	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	9.974E-03	kg
Dióxido de azufre	1.108E-04	kg
Hidrocarburos, sin especificar	4.562E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	147.567	kg



Tabla 3.41 Inventario de la Retroexcavadora 580 en la clausura del SNC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Retroexcavadora 580 Operación de máquina, diésel TCA-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	286	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	2430	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	195.582	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	3.553E+00	kg
Monóxido de carbono fósil	1.033E-02	kg
Óxidos de nitrógeno	1.620E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	2.275E-03	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	2.345E-03	kg
Dióxido de azufre	3.266E-05	kg
Hidrocarburos, sin especificar	1.342E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	170.178	kg

Tabla 3.42 Inventario del Bulldozer en la clausura del SNC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Operación de máquina bulldozer, diésel TCA-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	207	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	3519	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	141.557	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	8.936E+00	kg
Monóxido de carbono fósil	2.463E-02	kg
Óxidos de nitrógeno	9.341E-02	kg
Partículas, < 2,5 um	7.227E-03	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	7.450E-03	kg
Dióxido de azufre	8.215E-05	kg
Hidrocarburos, sin especificar	6.239E-03	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	123.171	kg



Tabla 3.43 Inventario del Compactador de rodillos vibratorios en la clausura del SNC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
Operación de la máquina compactadora de rodillos vibratorios, diésel TCA-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	8	hr
Materiales/combustibles		
Diésel {GLO} Grupo de mercado para Corte, U	40.8	kg
Aceite lubricante {RoW} Mercado de aceites lubricantes Corte, U	5.471	kg
Emisiones a la atmósfera		
Dióxido de carbono fósil	3.124E-01	kg
Monóxido de carbono fósil	7.934E-04	kg
Óxidos de nitrógeno	1.547E-03	kg
Partículas, < 2,5 um	1.597E-04	kg
Partículas, < 10 um (móvil)	1.646E-04	kg
Dióxido de azufre	2.872E-06	kg
Hidrocarburos, sin especificar	1.150E-04	kg
Residuos a tratamiento		
Aceite mineral usado {RoW} Mercado de aceites minerales usados Corte, U	4.760	kg



En la Tabla 3.44, se muestran los datasets creados para la clausura del SNC. Asimismo, en el Anexo X, se presentan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.44 Clausura del SNC en función de 1.0 t de RSU.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD
No Instalación de Sitio Controlado (SNC) (TCA) CLAUSURA {MX} Clausura Corte, U	1	p
Recursos de la naturaleza		
Transformación, a pastizal/pradera, MX	7.895E-02	m ²
Arcilla	1.28E+02	kg
Materiales/combustibles		
*Excavadora 320 Manejo de máquinas, diésel TCA-Clausura{MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	9.689E-04	hr
**Retroexcavadora 580 Operación de máquina, diésel TCA-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	8.087E-04	hr
***Operación de máquina bulldozer, diésel TCA-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U	3.125E-05	hr
****Operación de la máquina compactadora de rodillos vibratorios, diésel TCA-Clausura {MX} Funcionamiento de la máquina, diésel Corte, U		
Electricidad/calor		
Transporte, carga, camión 16-32 tonelada métrica, EURO3 - TCA- Clausura {MX} transporte, carga, camión 16-32 toneladas, EURO3 Corte, U	3.015E+01	tkm
Transporte, carga, camión 16-32 tonelada métrica, euro5 {RER} mercado para transporte, mercancías, camión 16-32 toneladas, EURO5 Corte, U	8.340E-01	tkm
Residuos a tratamiento		
Residuos sólidos urbanos Etapa Clausura TCA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t

* Dataset de la Excavadora 320 presentado en la Tabla 3.40.

** Dataset de la Retroexcavadora 580 presentado en la Tabla 3.41.

*** Dataset del Bulldozer presentado en la Tabla 3.42.

**** Dataset del compactador de rodillos vibratorios presentado en la Tabla 3.43.



En la Tabla 3.45, se muestran los compuestos presentes en el biogás y los lixiviados en la clausura del SNC. En esta etapa el biogás se consideró que el 100% del biogás es liberado a la atmósfera a través de la cobertura final con un porcentaje de oxidación de los compuestos (Anexo Y).

Por otro lado, en la generación de lixiviados, se consideró una infiltración del 100% a la capa freática (Ecoinvent, 2023). En el Anexo Y, se presentan los cálculos realizados para el desarrollo de este ICV.

Tabla 3.45 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del SNC.

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Clausura TCA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Productos evitados			
Recursos			
Materiales/combustibles			
Electricidad/calor			
Emisiones a la atmósfera			
Aluminio	Bajo. pop.	9.19E-06	kg
Antimonio	Bajo. pop.	3.06E-07	kg
Arsénico	Bajo. pop.	3.53E-07	kg
Bario	Bajo. pop.	2.97E-05	kg
Cadmio	Bajo. pop.	4.47E-07	kg
Monóxido de carbono biogénico	Bajo. pop.	6.58E-04	kg
Cromo	Bajo. pop.	3.53E-07	kg
Cobre	Bajo. pop.	2.82E-07	kg
Ácido clorhídrico	Bajo. pop.	1.08E-06	kg
Fluoruro de hidrógeno	Bajo. pop.	2.12E-07	kg
Hierro	Bajo. pop.	4.70E-07	kg
Plomo	Bajo. pop.	2.35E-08	kg
Manganeso	Bajo. pop.	6.74E+00	kg
Mercurio	Bajo. pop.	9.41E-08	kg
Metano biogénico	Bajo. pop.	1.65E-07	kg



Tabla 3.45 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del SNC
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Clausura TCA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Molibdeno	Bajo. pop.	1.08E-04	kg
Níquel	Bajo. pop.	1.55E-04	kg
Óxidos de nitrógeno	Bajo. pop.	1.45E-05	kg
Partículas, < 2,5 um	Bajo. pop.	8.47E-04	kg
Dióxido de azufre	Bajo. pop.	4.94E-04	kg
Zinc	Bajo. pop.	9.19E-06	kg
Sulfuro de hidrógeno	Bajo. pop.	3.06E-07	kg
COV, compuestos orgánicos volátiles como C	Bajo. pop.	3.53E-07	kg
Benceno	Bajo. pop.	1.64E-04	kg
Clorobenceno	Bajo. pop.	3.67E-05	kg
Propilbenceno	Bajo. pop.	4.23E-05	kg
Cloroformo	Bajo. pop.	4.87E-06	kg
Xileno	Bajo. pop.	7.71E-04	kg
Tolueno	Bajo. pop.	2.02E-03	kg
Fenol	Bajo. pop.	1.83E-05	kg
Naftalina	Bajo. pop.	1.34E-05	kg
Metano, triclorofluoro-, CFC-11	Bajo. pop.	1.29E-05	kg
Metano, diclorodifluoro-, CFC-12	Bajo. pop.	9.99E-05	kg
Etano, 1,1,2-tricloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	Bajo. pop.	1.18E-05	kg
Metano, diclorofluoro-, HCFC-21	Bajo. pop.	1.65E-04	kg
Metano, clorodifluoro-, HCFC-22	Bajo. pop.	5.64E-05	kg
2-Propanol	Bajo. pop.	2.89E-03	kg
Acetona	Bajo. pop.	3.91E-04	kg
Acrilonitrilo	Bajo. pop.	3.23E-04	kg
Sulfuro de carbonilo	Bajo. pop.	2.83E-05	kg
Sulfuro de dimetilo	Bajo. pop.	4.67E-04	kg
Etano	Bajo. pop.	2.57E-02	kg
Metilmercaptano	Bajo. pop.	1.15E-04	kg
Tiol de etano	Bajo. pop.	1.36E-04	kg
Hexano	Bajo. pop.	5.44E-04	kg
Pentano	Bajo. pop.	2.28E-04	kg
Propano	Bajo. pop.	4.70E-04	kg
Amoníaco	Bajo. pop.	1.60E-04	kg
Metano, dicloro-, HCC-30	Bajo. pop.	1.69E-04	kg



Tabla 3.45 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del SNC
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Clausura TCA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones a la atmósfera			
Metano, tetracloro-, CFC-10	Bajo. pop.	1.65E-04	kg
Metano, monocloro-, R-40	Bajo. pop.	1.18E-05	kg
Triclorobencenos	Bajo. pop.	1.04E-05	kg
Etano, 1,1,1-tricloro-, HCFC-140	Bajo. pop.	1.29E-06	kg
Etano, 1,2-dicloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	Bajo. pop.	1.75E-05	kg
etano, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	Bajo. pop.	5.17E-05	kg
Isobutano	Bajo. pop.	1.69E-04	kg
Decano	Bajo. pop.	4.49E-03	kg
Nonano	Bajo. pop.	4.56E-04	kg
Undecano	Bajo. pop.	2.13E-03	kg
3-Metiloctano	Bajo. pop.	1.69E-03	kg
Pentano	Bajo. pop.	2.82E-04	kg
Heptano	Bajo. pop.	2.97E-04	kg
Dodecano	Bajo. pop.	3.93E-04	kg
Butano	Bajo. pop.	2.81E-04	kg
Etanol	Bajo. pop.	1.20E-03	kg
Emisiones al agua			
Amoníaco	agua subterránea	9.04E-02	kg
Antimonio	agua subterránea	5.42E-05	kg
Arsénico	agua subterránea	2.46E-05	kg
Bario	agua subterránea	1.31E-04	kg
Benceno	agua subterránea	3.29E-06	kg
DBO ₅ (Demanda Biológica de Oxígeno)	agua subterránea	3.29E-02	kg
Boro	agua subterránea	5.35E-03	kg
Cadmio	agua subterránea	4.93E-06	kg
Calcio	agua subterránea	4.93E-02	kg
Cloruro	agua subterránea	2.96E-01	kg
Cromo VI	agua subterránea	3.29E-05	kg
Cobalto	agua subterránea	4.88E-05	kg
DQO (Demanda Química de Oxígeno)	agua subterránea	3.29E-01	kg
Cobre	agua subterránea	5.75E-05	kg
DOC, Carbono Orgánico Disuelto	agua subterránea	1.33E+00	kg
Flúor	agua subterránea	4.50E-04	kg



Tabla 3.45 Compuestos en el biogás y lixiviados en la etapa de clausura del SNC
(continuación).

PRODUCTO	CANTIDAD	UNIDAD	PRODUCTO
Residuos sólidos urbanos Etapa Clausura TCA {MX} tratamiento de, relleno sanitario Corte, U	1	t	RSU
Emisiones al agua			
Azufre	agua subterránea	3.29E-02	kg
Hierro	agua subterránea	1.23E-02	kg
Plomo	agua subterránea	1.64E-05	kg
Magnesio	agua subterránea	4.93E-02	kg
Manganeso	agua subterránea	2.49E-03	kg
Mercurio	agua subterránea	8.22E-08	kg
Naftalina	agua subterránea	1.64E-05	kg
Níquel	agua subterránea	5.75E-05	kg
Fosfato	agua subterránea	8.22E-04	kg
Potasio	agua subterránea	1.79E-01	kg
Selenio	agua subterránea	2.46E-06	kg
Plata	agua subterránea	8.22E-06	kg
Sodio	agua subterránea	8.22E-02	kg
Sulfato	agua subterránea	6.57E-02	kg
TOC, Carbono Orgánico Total	agua subterránea	3.16E-04	kg
Zinc	agua subterránea	5.75E-04	kg
Tolueno	agua subterránea	1.64E-05	kg
Xileno	agua subterránea	4.11E-05	kg
Fenol	agua subterránea	2.46E-06	kg
Cloroformo	agua subterránea	2.46E-07	kg
Berilio	agua subterránea	3.94E-06	kg
Estroncio	agua subterránea	1.44E-03	kg



3.3.9. Características en los SDF evaluados

En la Tabla 3.46 se concentran las principales características de los SDF evaluados y los valores estimados en cuanto a la generación de biogás y lixiviados a un tiempo horizonte de 100 años. Cabe destacar que el SNC generó menores emisiones de biogás en comparación al RESA, debido a la presencia de condiciones aerobias. En cuanto a la generación de lixiviados, este sitio produjo el mayor volumen.

Tabla 3.46 Características en los SDF evaluados.

CARACTERÍSTICAS	RESA	SC	SNC
RSU depositados totales (t)	329,945	60,930	255,966
Tiempo de construcción (años)	0.5	0.4	0
Tiempo de operación (años)	3	10	32
Tiempo de Clausurado (años)	97	90	68
Área del SDF (m ²)	16,743	5,402	20,211
Área del SDF (m ² /t RSU)	5.074E-02	8.866E-02	7.895E-02
Profundidad de la celda (m)	20	10	0
Altura de la celda	20	10	25
Generación de biogás 100 años (m ³)	44,388,919	6,713,876	14,152,738
Generación de biogás 100 años (m ³ /t RSU)	134.534	110.190	55.292
Generación de lixiviados 100 años (L)	304,922,660	93,305,223	420,227,571
Generación de lixiviados 100 años (L/t RSU)	924.16	1,531.35	1,641.73

3.4. EVALUACIÓN DE IMPACTOS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Con los datasets de los ocho ICV, se aplicó la metodología ReCiPe (PRé, 2020), mediante el software SimaPro 10 (PRé, 2020).

Las categorías de impacto seleccionadas como: Calentamiento Global, Agotamiento del Ozono Estratosférico, Formación de Ozono (salud humana y ecosistemas terrestres), Formación de Partículas Finas, Acidificación, Eutrofización, Ecotoxicidad Terrestre y de Agua Dulce, Toxicidad Humana Cancerígena/no cancerígena, Uso de Suelo y la Agotamiento de Recursos Fósiles, son de suma importancia debido a la

escasez de estudios en México que demuestren los impactos ambientales al aire, agua y suelo ocasionados por los SDF.

3.4.1. Calentamiento Global

Como puede apreciarse en la Figura 3.12, en cuanto a la etapa de construcción, las del RESA y del SC tuvieron una baja contribución en esta categoría.

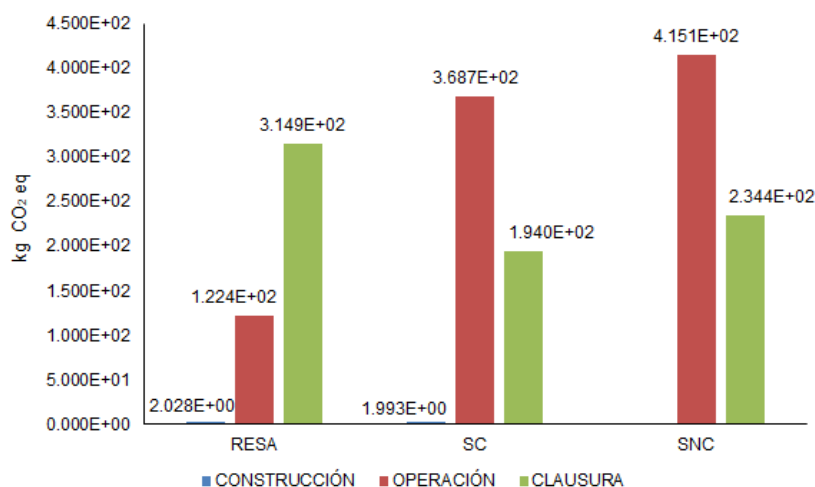


Figura 3.12 Impacto de los SDF en el Calentamiento Global.

Considerando la etapa de operación, la del SNC es la que tuvo el mayor impacto, como resultado del tiempo que estuvo operando sin ser clausurado (32 años).

En la etapa de clausura, el RESA presentó la mayor contribución en emisiones de CO₂eq, debido a la generación de CH₄ a lo largo de los 97 años restantes, donde el 80% de las emisiones se produce en los primeros 35 años (Anexo C). Cabe destacar que el impacto de la clausura del RESA fue mayor al del SC y SNC, debido a factores como la cantidad y composición de los RSU dispuestos en el sitio, así como también la profundidad de la celda, lo que favorece las condiciones anaerobias para la generación de CH₄ (Figura 3.12). El manuscrito de Ziegler-Rodriguez *et al.*, (2019) reporta que una menor profundidad de la celda, aunado a la inexistencia de la

cobertura de los RSU, produjo condiciones aerobias, disminuyendo la generación de biogás en el sitio, lo cual ocurre en los SNC. En artículo de Ouedraogo *et al.*, (2024), la quema de biogás del RESA sin recuperación de energía, redujo el impacto del Calentamiento Global en 59%.

En cuanto al impacto total generado por cada SDF por UF, el RESA presentó una reducción del 32.35% en comparación con el SNC, mientras que el SC mostró una disminución del 13.06% con respecto a este último.

3.4.2. Agotamiento del Ozono Estratosférico

Para el Agotamiento del Ozono Estratosférico ocasionado por emisiones de N_2O , CFC-113, CFC-114, HCFC-22, CFC-12 y CFC-10, CFC-11 y Halón 1301 (Figura 3.13), las etapas de construcción del RESA y del SC son las que aportaron la menor cantidad de emisiones, en comparación con el resto de las etapas. Este impacto se debe a la producción y procesamiento de petróleo para la obtención de combustibles fósiles ocupados por la maquinaria en el SDF.

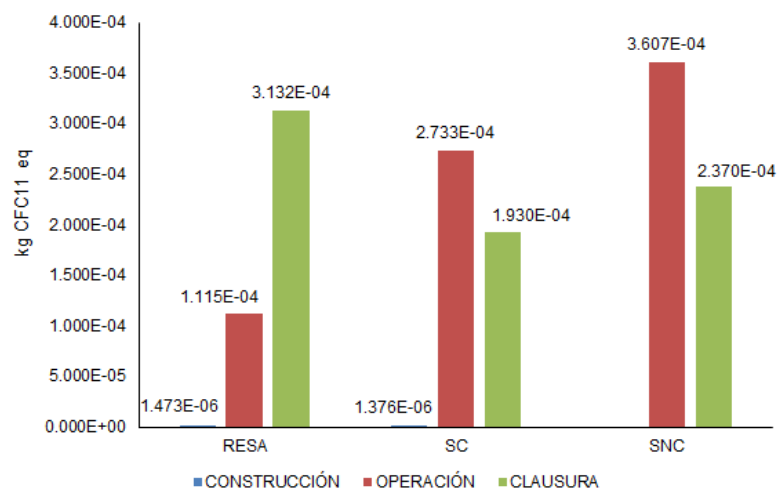


Figura 3.13 Impacto de los SDF en el Agotamiento del Ozono Estratosférico.



En la operación, el SNC tuvo el impacto más alto, principalmente por la liberación incontrolada de emisiones provocada por los RSU.

En la etapa de clausura, el RESA presentó el mayor impacto negativo respecto a los otros sitios, a causa de las emisiones de los compuestos en el biogás y de la obtención de combustible fósil (diésel y gasolina).

Los resultados anteriores coinciden con lo encontrado por Manfredi *et al.*, (2019), donde concluyeron que las emisiones fugitivas de biogás no oxidado tuvieron mayores impactos. Por el contrario, cuando el biogás es recolectado y utilizado para la generación de energía, se pueden obtener ahorros ambientales netos.

En el manuscrito de Weligama Thuppahige & Babel, (2022), el uso del biogás para producir electricidad, generó beneficios ambientales en esta categoría, al evitar las emisiones en la generación de electricidad por combustibles fósiles.

Por UF, el impacto total de los SDF en esta categoría se redujo un 28.71% para el RESA respecto al SNC, y un 21.75% en el caso del SC.

3.4.3. Formación de Ozono

En la Formación de Ozono causada por los NO_x con efectos a la salud humana (Figura 3.14) y ecosistemas terrestres (Figura 3.15), la etapa de construcción es la que presentó los menores impactos, en comparación con el resto de las etapas. Los impactos asociados a esta etapa se atribuyeron principalmente a la producción y procesamiento de petróleo para la obtención de combustibles fósiles ocupados por la maquinaria en el RESA y SC.

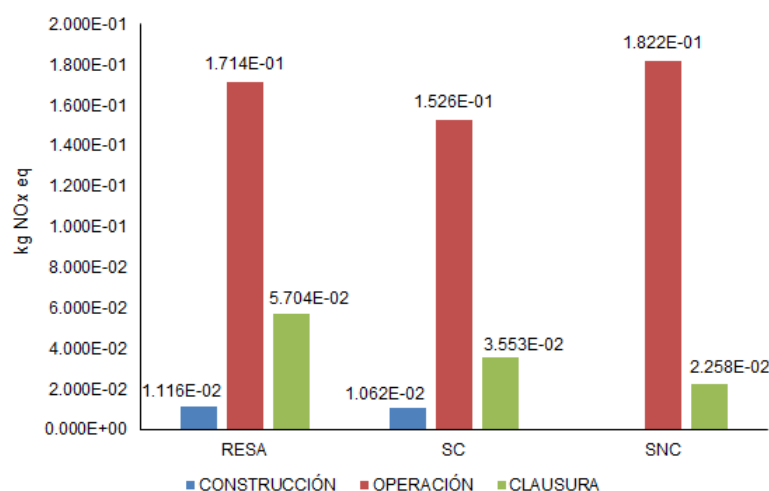


Figura 3.14 Impacto de los SDF en la Formación de Ozono, salud humana.

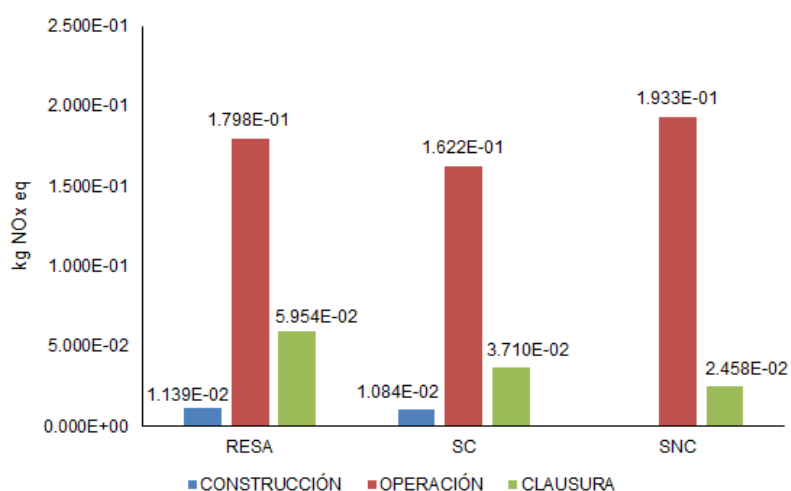


Figura 3.15 Impacto de los SDF en la Formación de Ozono, ecosistemas terrestres.

La etapa de operación es la que tuvo el mayor impacto para los tres SDF, principalmente debido a las emisiones generadas por la disposición de los RSU. En segundo lugar influyeron las emisiones provenientes de la maquinaria utilizada para el acomodo y compactación de los residuos, así como de los vehículos recolectores durante su permanencia en el sitio. Finalmente, la contribución de emisiones asociadas a la producción y procesamiento del petróleo utilizado para obtener los combustibles fósiles consumidos por la maquinaria y los vehículos en los SDF. De manera similar,



estos resultados coinciden con lo reportado por Rotthong *et al.* (2023), quienes señalaron que las emisiones generadas por los vehículos recolectores contribuyeron significativamente a esta categoría.

En la clausura, el RESA contribuyó en mayor medida con emisiones generadas por la gran cantidad de RSU dispuestos, seguido del SC y SNC. En el artículo de Ouedraogo *et al.*, (2021), la Formación de Ozono se atribuyó a las emisiones de biogás, principalmente CH₄ y COVs, a la presencia de cloro (Cl) en los lixiviados, y a la combustión de diésel, que genera COV, CO y NO_x.

Analizando el impacto total en la Formación de Ozono (salud humana) por UF de cada SDF, se observó que el SC disminuyó dicho impacto en un 17.02% en comparación con el RESA, mientras que el SNC lo redujo en un 14.53%.

En cuanto al impacto total asociado a la Formación de Ozono en ecosistemas terrestres, el SC mostró una reducción del 16.17% respecto al RESA, mientras que el SNC presentó una disminución del 13.09%.

3.4.4. Formación de Partículas Finas

Las emisiones de $PM_{2.5}$, NO_x , NH_3 y SO_2 fueron responsables de esta categoría (Figura 3.16).

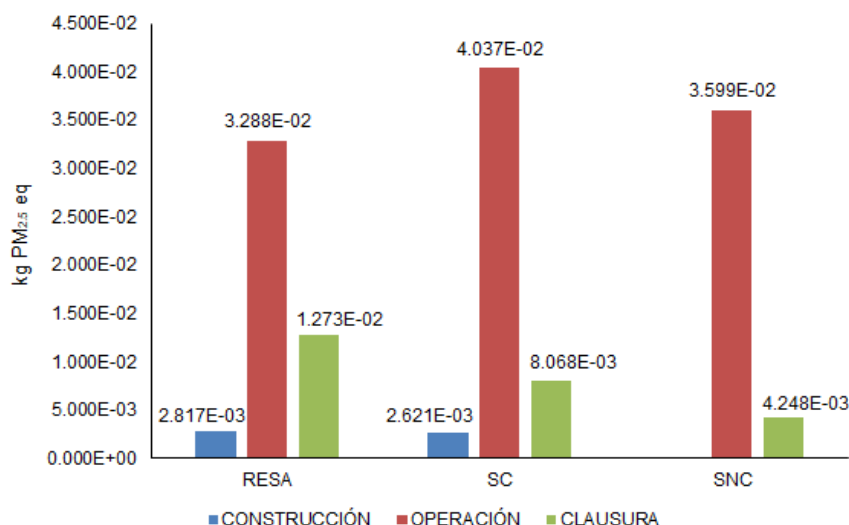


Figura 3.16 Impacto de los SDF en la Formación de Partículas Finas.

Las etapas de construcción del RESA y del SC generaron la menor cantidad de emisiones. Estas emisiones se atribuyen tanto al funcionamiento de la maquinaria utilizada en el sitio como a procesos externos al SDF, como la producción y el procesamiento del petróleo requerido para la obtención de los combustibles fósiles empleados por dicha maquinaria.

En la etapa de operación, el SC y SNC fueron los más adversos, debido a un mayor tiempo de funcionamiento (10 y 32 años, respectivamente) en comparación con el RESA, cuya operación fue de solo 3 años.

La clausura del RESA y del SC redujo impacto negativo en comparación con la etapa de operación, gracias a la captura y quemado del biogás. Similares resultados se

presentaron en el manuscrito de Rohrer, *et al.*, (2025), donde la quema del biogas capturado del RESA generó un impacto medio.

En cuanto al impacto total asociado a la Formación de Partículas Finas, el SNC mostró una reducción del 21.20% respecto al SC, mientras que el RESA presentó una disminución del 5.14%.

3.4.5. Acidificación

El impacto a esta categoría fue debido a emisiones de NH_3 , NO_x y SO_2 (Figura 3.17).

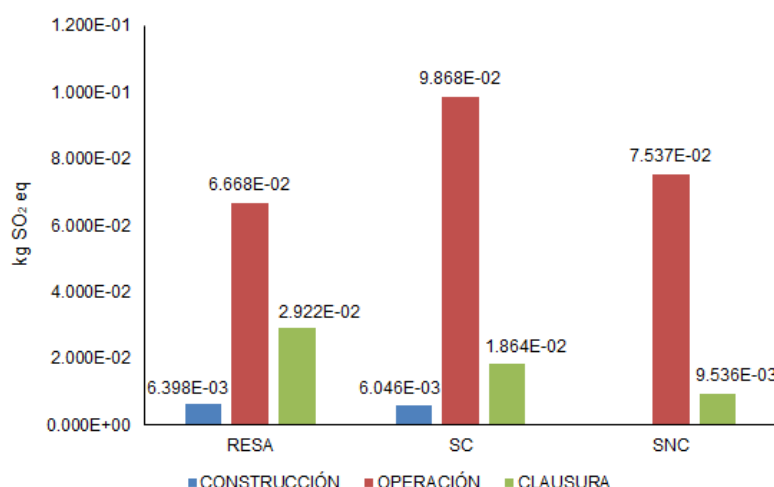


Figura 3.17 Impacto de los SDF en la Acidificación.

Las etapas de construcción del RESA y del SC fueron las que generaron los menores impactos a esta categoría. Las emisiones asociadas a esta etapa provienen tanto del funcionamiento de la maquinaria empleada en el sitio como de procesos externos al SDF, como la producción y el procesamiento del petróleo necesario para obtener los combustibles fósiles utilizados por la maquinaria y vehículos.



En la etapa de operación de los SDF, la estancia de los vehículos recolectores dentro de los sitios, la maquinaria utilizada y las emisiones de los RSU, tuvieron la mayor contribución comparada con el resto de las etapas.

La clausura de los SDF permitió reducir los impactos generados durante la etapa de operación, gracias a la quema de biogás en el RESA y el SC, así como a la oxidación de las emisiones provenientes de los RSU a través de la cobertura final aplicada en los SDF. Adicionalmente, el uso de maquinaria durante esta etapa tuvo una contribución baja. Los resultados anteriores coinciden con lo reportado por Cheela *et al.*, (2021), donde las actividades de manejo de residuos (compactación, nivelación y transporte interno) en el vertedero contribuyeron principalmente a esta categoría, mientras que la quema del biogás tuvo un bajo impacto. En la publicación de Almansour & Akrami, (2024) sugiere que la implementación de tecnologías para el tratamiento de los residuos orgánicos y el reciclaje de los inorgánicos, podría reducir significativamente el impacto en esta categoría.

En cuanto al impacto total asociado a la Acidificación, el SNC mostró una reducción del 31.17% respecto al SC, mientras que el RESA presentó una disminución del 17.08%.



3.4.6. Eutrofización

Las emisiones de P, P_4^{3-} , DQO y DBO fueron las responsables del impacto en esta categoría (Figura 3.18).

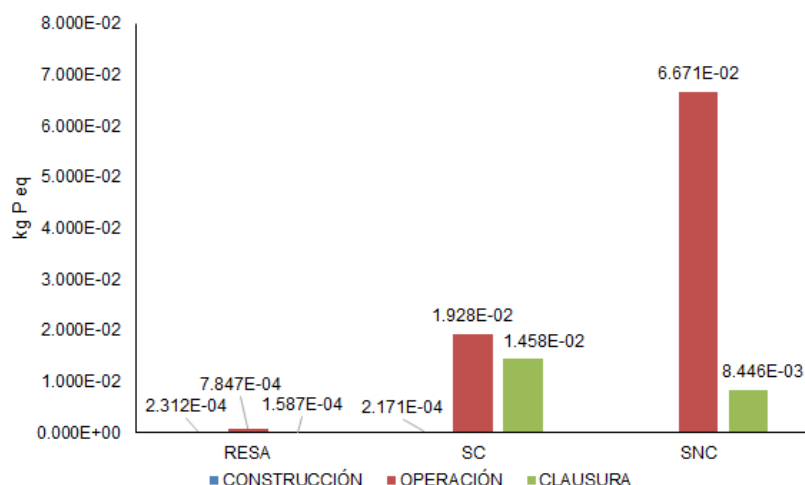


Figura 3.18 Impacto de los SDF en la Eutrofización.

La etapa de construcción del RESA y del SC aportó la menor cantidad de emisiones, en comparación con el resto de las etapas. Este impacto se atribuye principalmente a actividades externas al SDF, tales como la producción y el procesamiento del petróleo, los cuales son necesarios para la obtención de los combustibles fósiles utilizados por la maquinaria en estos sitios.

En la etapa de operación de los SDF, la alta concentración de compuestos en los lixiviados jóvenes, así como su porcentaje de infiltración hacia la capa freática (RESA: 0.1%; SC y SNC: 100%), fueron factores que contribuyeron en mayor medida en comparación con la etapa de clausura. Cabe resaltar que el RESA presentó la menor aportación, en comparación con el SC y el SNC, debido a la presencia de la geomembrana en la celda. Es importante destacar que el impacto del SNC fue mayor que el resto de los SDF, ya que durante esta etapa (32 años) no se cubrieron los RSU con material de cobertura, permitiendo un mayor ingreso de lluvia.



En la etapa de clausura, se redujo el impacto de los SDF, atribuible a la disminución en la concentración de compuestos presentes en los lixiviados, correspondientes a lixiviados envejecidos. De igual manera, el impacto asociado al SNC se mitigó como consecuencia de la aplicación de material de cobertura, la cual contribuyó a disminuir la infiltración de agua pluvial. Los resultados anteriores reflejan lo obtenido por Sauve & Van Acker (2020), donde la variación en la cantidad de lixiviados que llegan a las aguas subterráneas influyó en los resultados, además, de que la composición de los lixiviados depende de la composición de los residuos.

En el manuscrito de Shrestha, *et al.*, (2023), se demostró que la presencia de revestimientos sintéticos impermeables en los SDF y el tratamiento de lixiviados generó un menor impacto.

Por UF, el impacto total de los SDF se redujo en un 98.44% en el caso del RESA en comparación con el SNC, y en un 54.65% en el SC.

3.4.7. Ecotoxicidad

En la categoría de Ecotoxicidad Terrestre afectada por emisiones de Sb, Ba, Cu, Pb, Hg, Ni, Sn, V, Zn y Cd (Figura 3.19), la etapa de construcción del RESA y del SC aportó el menor impacto en comparación con el resto de las etapas. Este impacto se atribuye a las emisiones generadas por el uso de frenos y el desgaste de las llantas de los vehículos dentro de los SDF, así como de los vehículos empleados para el transporte de material. Cabe destacar también la contribución de emisiones provenientes de procesos externos a los SDF, como la producción y el procesamiento de petróleo para la obtención de combustibles fósiles utilizados por la maquinaria y los vehículos en los SDF.

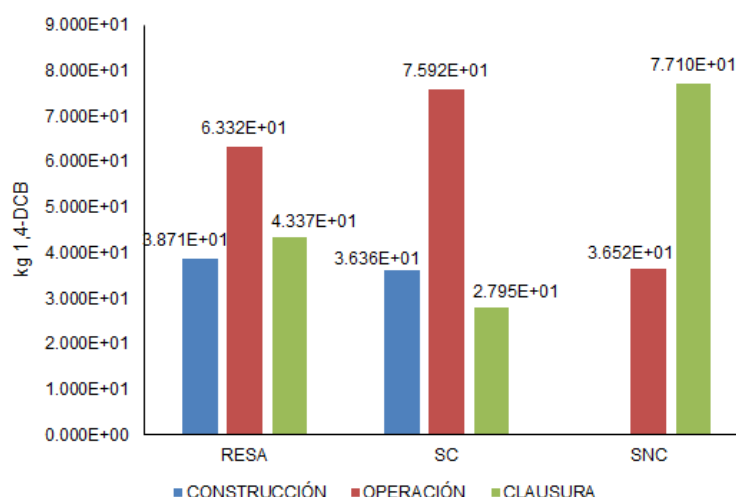


Figura 3.19 Impacto de los SDF en la Ecotoxicidad Terrestre.

En la etapa de operación, el RESA y el SC presentaron el mayor impacto debido a los compuestos liberados en el biogás y a las emisiones de los vehículos recolectores que permanecieron en los SDF, así como a procesos externos como la producción y el procesamiento de petróleo para la obtención de combustibles fósiles utilizados por la maquinaria y los vehículos. También contribuyeron las emisiones generadas por el uso de frenos y el desgaste de las llantas, tanto de los vehículos dentro de los SDF como de aquellos empleados para el transporte de material.

Las clausuras del RESA y del SC resultaron en menores impactos que la operación, debido a las bajas emisiones fugitivas de biogás. Por el contrario, el impacto de la clausura del SNC fue mayor que su etapa de operación, principalmente por las emisiones generadas por el uso de frenos y el desgaste de las llantas de los vehículos en el SDF, así como de aquellos utilizados para el transporte de materiales. Además, se identificó una contribución adicional asociada a procesos externos, como el procesamiento de petróleo destinados a la obtención de combustibles fósiles empleados por la maquinaria y los vehículos en el sitio.

En el manuscrito de Almansour & Akrami (2024), se sugiere que el remplazo de los SDF por otro tipo tecnologías de aprovechamiento y valorización de RSU, reduciría el impacto de una sustancia química para dañar a los organismos a entornos terrestres.

En la categoría de Ecotoxicidad de Agua Dulce afectada por emisiones de Sb, As, Ba, Be, Cr, Co, Cu, Ni, Ag y Zn (Figura 3.20), las etapas de construcción del RESA y del SC fueron las que aportaron el menor impacto debido a las emisiones generadas por el uso de frenos y el desgaste de las llantas de los vehículos en el SDF, así como de aquellos utilizados para el transporte de materiales. Asimismo, se identificó una contribución adicional proveniente de procesos externos, como la producción y el procesamiento de petróleo para la obtención de combustibles fósiles utilizados por la maquinaria y los vehículos en los SDF, además del tratamiento de residuos de aceite.

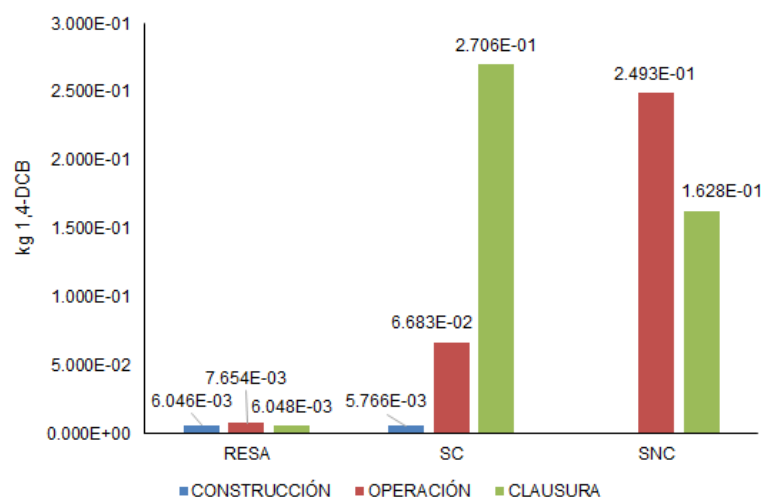


Figura 3.20 Impacto de los SDF en la Ecotoxicidad de Agua Dulce.

En la etapa de operación, la del SNC presentó el mayor impacto de los SDF, debido a la infiltración de lixiviados, como consecuencia de la ausencia de geomembrana (Cheela, *et al.*, 2021). En contraste, el SC mostró una menor contribución en esta etapa, atribuida a su corto tiempo de operación, lo que trasladó el impacto principalmente a la etapa de clausura. En el caso del RESA, la baja infiltración de los



lixiviados debido al uso de la geomembrana contribuyó a una menor afectación en esta categoría.

Las clausuras del RESA y del SNC resultaron en una reducción de impactos en comparación con la etapa de operación, gracias a la aplicación de material de cobertura, que permitió disminuir la infiltración de agua pluvial y, en consecuencia, la generación de lixiviados. Cabe destacar que la concentración de metales pesados en ambos sitios fue menor en comparación con la clausura del SC, la cual presentó un mayor impacto.

En el artículo de Ziegler-Rodriguez *et al.*, (2019) la lluvia que ingresó en el SNC, liberó fosfatos, nitratos y metales pesados que se infiltraron en el acuífero. Para disminuir este impacto se recomendó implementar sistemas de recolección de agua de lluvia y revestimientos inferiores y superiores impermeables y sistemas de drenaje adecuado para separar el agua de lluvia de los lixiviados.

La evaluación del impacto total por UF en la categoría de ecotoxicidad terrestre mostró una reducción del 21.86% en el SNC respecto al RESA, y del 3.56% en el SC.

Por otro lado, en la categoría de Ecotoxicidad de Agua Dulce, el RESA presentó una disminución del 95.21% en el impacto total de los SDF respecto al SNC, mientras que el SC mostró una reducción del 16.72%.

3.4.8. Toxicidad

En esta categoría, las emisiones de As, Cd, Cr VI, Pb, Zn, Furanos, Formaldehído y Acrilonitrilo fueron las principales contribuyentes a la Toxicidad Humana Cancerígena (Figura 3.21); mientras que el Sb, As, Ba, Cd, Pb, V, Zn, Mo, propiciaron impactos en la Toxicidad Humana No Cancerígena (Figura 3.22).

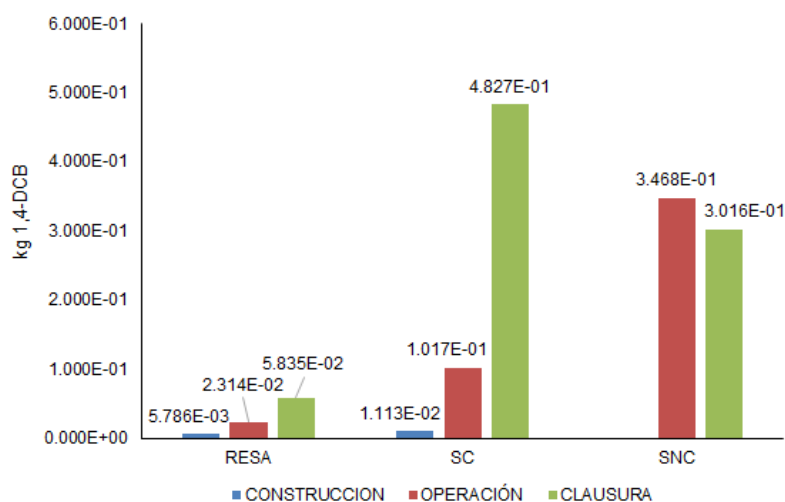


Figura 3.21 Impacto de los SDF en la Toxicidad Humana Cancerígena.

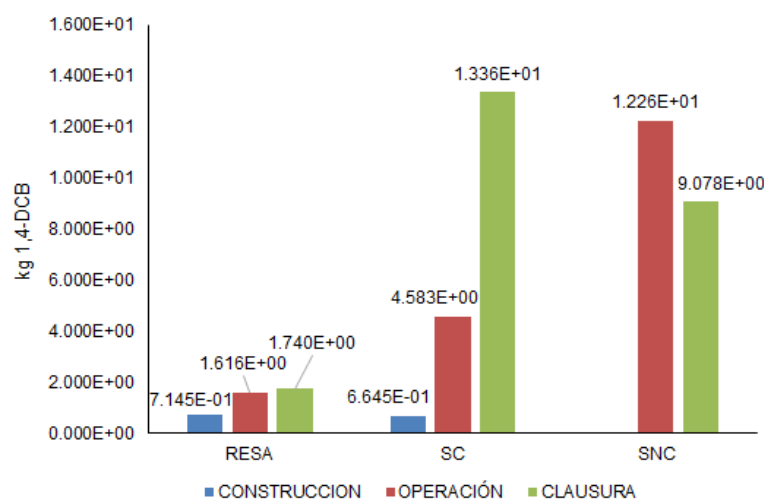


Figura 3.22 Impacto de los SDF en la Toxicidad Humana No Cancerígena.

En ambas categorías, las etapas de construcción del RESA y del SC presentaron el menor impacto. Esto se atribuyó principalmente a las emisiones generadas por los vehículos utilizados tanto en el SDF como en el transporte de materiales, así como a emisiones de procesos externos al sitio, como la producción y el procesamiento del petróleo requerido para la obtención de los combustibles fósiles empleados por la maquinaria y los vehículos del SDF.



En la etapa de operación, en ambas categorías, el RESA y el SC presentaron una contribución significativa en emisiones al aire y agua de los RSU. En el caso del SNC, la etapa de operación generó un mayor impacto, a causa de que el sitio estuvo más tiempo abierto y con ello liberando emisiones al aire y al agua, sobre todo de lixiviados en temporada de lluvias.

En la etapa de clausura, es importante destacar que las del SC y del SNC produjeron el mayor impacto, debido a la ausencia de la geomembrana que impidiera la infiltración de los lixiviados.

Los resultados de esta categoría se corroboran con lo obtenido en el manuscrito de Hadzic *et al.*, (2018), donde la infiltración de los lixiviados en el agua subterránea contribuyó a la toxicidad humana cancerígena, por la ausencia de una instalación de captación y tratamiento de lixiviados, así como la inexistencia de sistemas de revestimiento sintético adecuados. En el estudio de Caicedo-Concha *et al.*, (2021), el SNC generó un mayor impacto en comparación con los escenarios de relleno sanitario. Asimismo, en el artículo de Ouedraogo *et al.*, (2024), encontraron que los compuestos orgánicos (hexano, tolueno, xileno y benceno) en el biogás y metales pesados en los lixiviados sólidos causaron efectos no cancerígenos.

La evaluación del impacto total por UF en la categoría de Toxicidad Humana Cancerígena indicó una disminución del 86.54% en el RESA en comparación con el SNC. Por su parte, el SC presentó una reducción más moderada, del 8.15%, también respecto al SNC.

En cuanto a la Toxicidad Humana No Cancerígena, el RESA mostró una notable reducción del 80.92% frente al SNC, mientras que el SC evidenció una reducción parcial, del 12.81%.

3.4.9. Uso de suelo

En la categoría de Uso de Suelo (Figura 3.23), la etapa de construcción del RESA y del SC generó los mayores impactos, principalmente debido a las actividades de deforestación y excavación requeridas para la construcción y acondicionamiento de las celdas en ambos sitios.

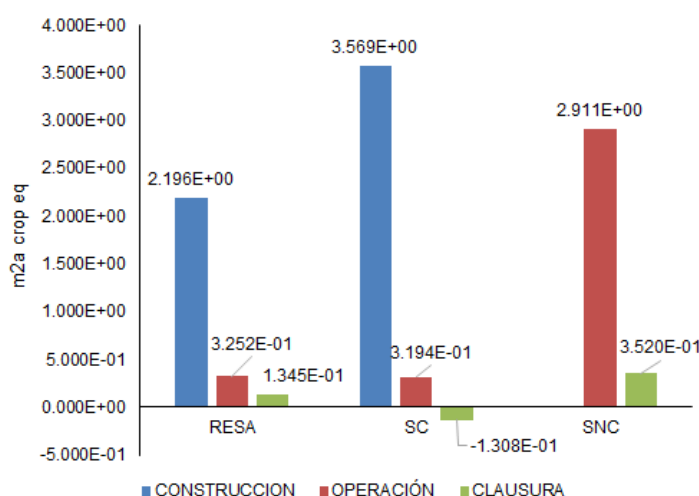


Figura 3.23 Impacto de los SDF en el Uso de Suelo.

En la etapa de operación, el SNC presentó el mayor impacto, a causa del deterioro del área boscosa ocupada para depositar los residuos, que fue mayor al resto de los SDF. El RESA y el SC tuvieron un menor impacto, debido al uso del material de cobertura intermedia, el cual fue extraído del mismo sitio.

La clausura de los SDF contribuyó con la disminución de impactos al convertirlos en pastizales. Cabe destacar que el SC tuvo un impacto positivo (benéfico), lo cual se le atribuyó a una menor área utilizada para la construcción del sitio.

Los resultados de esta categoría se relejan con lo obtenido por Slorach *et al.*, (2019), donde los SDF recuperados y clausurados pueden convertirse en terrenos naturales al final de su vida útil, obteniendo impactos positivos. Asimismo, en el manuscrito de

De Feo *et al.*, (2016), el impacto del uso de suelo del relleno sanitario se redujo al considerarse que después de la clausura el sitio será cubierto con vegetación y reforestado.

En cuanto al impacto total asociado al Uso de Suelo por UF, el RESA mostró una reducción del 29.32% respecto al SC, mientras que el SNC presentó una disminución del 13.17%.

3.4.10. Agotamiento de Recursos Fósiles

En el Agotamiento de Recursos Fósiles, los procesos externos al sitio, como la extracción y el procesamiento del petróleo requerido para la obtención de los combustibles fósiles utilizados por la maquinaria y los vehículos del SDF contribuyeron a esta categoría (Figura 3.24).

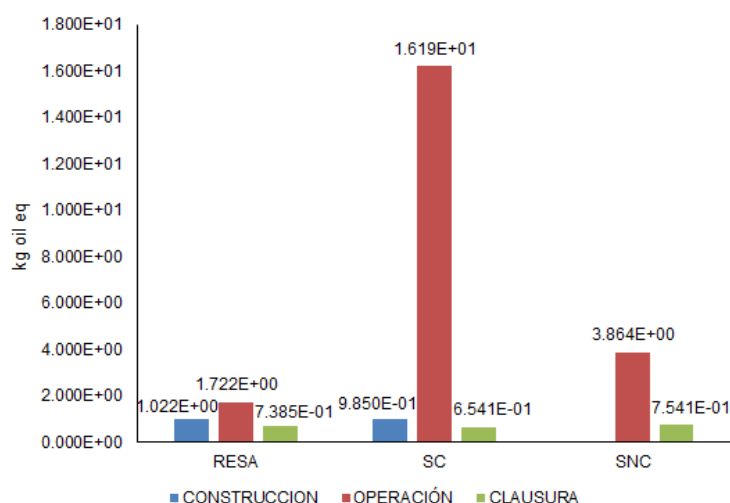


Figura 3.24 Impacto de los SDF en el Agotamiento de Recursos Fósiles.

En la etapa de construcción, el RESA y el SNC tuvieron un impacto significativo a causa del consumo de combustible por parte de la maquinaria y los vehículos encargados del transporte de materiales.



La etapa de operación en los tres sitios generó el mayor impacto en comparación con el resto de las etapas, principalmente por el consumo de combustible asociado al uso de maquinaria y vehículos recolectores dentro de los SDF. En el caso del RESA y del SC, la disposición de un mayor volumen de RSU implicó un incremento en el consumo de diésel por parte de la maquinaria utilizada para su compactación. En contraste, en el SNC se utilizó un cargador frontal para esparcir los RSU y maximizar el uso del espacio disponible en el sitio.

En la etapa de la clausura, para el RESA y el SC, los impactos se atribuyeron al diésel usado por la maquinaria para la colocación de la cobertura final, así como también por la utilización de gasolina para el bombeo de los lixiviados.

Cabe destacar que los impactos de las etapas de operación y clausura del SNC fueron inferiores a los del SC, debido a que el SNC de Xalatlaco, en particular, está teniendo un buen manejo al utilizar maquinaria para esparcir los RSU durante la operación, y contemplar la colocación de material de cobertura para la clausura, lo cual es ideal y apegado al “Manual de rehabilitación, clausura y saneamiento de sitios de disposición final” (Ortiz-Conde & Hernández-Barrios, 2012), sin embargo, en la mayoría de los SNC de México se carece de estas actividades.

Similares resultados se obtuvieron con Behrooznia *et al.* (2018), donde el transporte y el consumo de combustible diésel para la maquinaria fueron los principales contribuyentes en los escenarios de RESA y RESA-compostaje.

En términos del impacto total relacionado con el uso del suelo por UF, el RESA logró una reducción del 80.47% frente al SC, y el SNC mostró una baja del 74.11%.



3.4.11. Impacto generado por los SDF

En la Tabla 3.47 se presenta un análisis comparativo de los impactos generados por cada tipo de SDF.

Tabla 3.47 Impacto generado por los SDF.

CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDAD	RESA	SC	SNC
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	4.393E+02	5.646E+02	6.494E+02
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	4.261E-04	4.677E-04	5.977E-04
Formación de Ozono, Salud Humana	kg NO _x eq	2.396E-01	1.988E-01	2.048E-01
Formación de Partículas Finas	kg PM _{2.5} eq	4.843E-02	5.106E-02	4.023E-02
Formación de Ozono, Ecosistemas Terrestres	kg NO _x eq	2.507E-01	2.102E-01	2.179E-01
Acidificación	kg SO ₂ eq	1.023E-01	1.234E-01	8.491E-02
Eutrofización	kg P eq	1.175E-03	3.408E-02	7.515E-02
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DCB	1.454E+02	1.402E+02	1.136E+02
Ecotoxicidad de Agua Dulce	kg 1,4-DCB	1.975E-02	3.432E-01	4.121E-01
Toxicidad Humana Cancerígena	kg 1,4-DCB	8.727E-02	5.955E-01	6.484E-01
Toxicidad Humana No Cancerígena	kg 1,4-DCB	4.071E+00	1.861E+01	2.134E+01
Uso de Suelo	m ² a crop eq	2.656E+00	3.758E+00	3.263E+00
Agotamiento de Recursos Fósiles	kg oil eq	3.483E+00	1.783E+01	4.618E+00

El análisis de las emisiones totales reveló que el SNC fue el que generó mayores impactos ambientales, atribuibles principalmente a su prolongado tiempo de operación y clausura sin la aplicación de controles ambientales adecuados. En contraste, los impactos asociados al RESA y al SC fueron considerablemente menores, gracias a la implementación de sistemas de captación y quemado de biogás, así como al uso de material de cobertura. Estas medidas permitieron la oxidación y reducción de los compuestos emitidos a la atmósfera, reflejándose en menores contribuciones a las categorías de Calentamiento Global (32.35% para RESA y 13.06% para SC) y Agotamiento del Ozono Estratosférico (28.71% y 21.75%, respectivamente). Estos



resultados destacan la importancia de considerar tecnologías de captación y aprovechamiento de biogás en el diseño e implementación de sistemas de gestión de residuos.

Por otro lado, la instalación de una geomembrana en el RESA contribuyó significativamente a la reducción de impactos en otras categorías ambientales, con disminuciones de hasta 98.44% en Eutrofización, 95.21% en Ecotoxicidad en Agua Dulce, y en Toxicidad Humana, tanto Cancerígena (86.54%) como No Cancerígena (80.92%). Estos resultados evidencian la eficacia de las barreras físicas en la mitigación de impactos asociados a la contaminación de suelos y cuerpos de agua.

Sin embargo, la elevada generación de biogás y la presencia de ciertos compuestos en su composición, junto con las emisiones producidas por la maquinaria utilizada en el RESA, fueron los principales factores que contribuyeron a mayores impactos en la categoría de Formación de Ozono, con consecuencias negativas para la salud humana y los ecosistemas terrestres, así como en la Ecotoxicidad Terrestre. En menor medida, también se observaron contribuciones por parte del SC y el SNC.

No obstante, es importante señalar que, en las categorías de Formación de Partículas Finas y Acidificación, el SNC presentó los menores impactos. Esta aparente contradicción se explica por la ausencia de sistemas de captación y quemado de biogás; aunque estos procesos permiten controlar otras emisiones, también generan precursores de partículas finas y gases acidificantes. Además, la reducida operación de maquinaria en el sitio contribuyó a una menor emisión de contaminantes atmosféricos relacionados con dichas categorías. Esto demuestra que la eficiencia ambiental de un sitio depende del equilibrio entre múltiples procesos y tecnologías de control.

En la categoría de Agotamiento de Recursos Fósiles, el RESA presentó la menor contribución en comparación con el SC y el SNC. Esta diferencia fue debido



principalmente al tipo de maquinaria utilizada durante la operación. En el SNC, aunque la maquinaria operó menos horas a la semana en comparación con la compactadora utilizada en el RESA, se empleó un equipo inadecuado para el esparcimiento de los residuos. Esta menor eficiencia operativa implicó un mayor consumo de combustible por tonelada de residuo manipulado, lo que resultó en una mayor demanda de recursos fósiles y, por ende, en un impacto ambiental más elevado en esta categoría.

Finalmente, en cuanto al uso de suelo, la reducción de este impacto fue mayor en el RESA (29.32%), seguido del SNC (13.17%), gracias a la transformación del área ocupada por los SDF a un pastizal. Esto sugiere que, además de las tecnologías implementadas durante la operación, las acciones post-clausura también pueden contribuir significativamente a la mejora del desempeño ambiental de los SDF.

3.5. COMPARACIÓN DE INVENTARIOS

En esta sección se presenta la comparación de los resultados obtenidos simulando el ICV de Ecoinvent con los datasets de Municipal solid waste {RoW}| treatment of, Sanitary Landfill / Municipal solid waste {GLO}| treatment of municipal solid waste, Unsanitary Landfill y el desarrollado en esta Tesis para el RESA y el SNC. En esta comparación no se incluye el SC, debido a que Ecoinvent solamente tiene los casos “Sanitary Landfill” y “Unsanitary Landfill” (PRé, 2020; PRé, 2013).

En la Tabla 3.48, se muestra la composición de los RSU obtenidos *in-situ* para el RESA y el SNC, así como la composición que emplea Ecoinvent para las simulaciones, donde en este último, la composición de los RSU es más alta en fracciones como papel y cartón, metales, vidrio y cerámica, productos electrónicos y baterías, lo que incrementa la cantidad de compuestos en el inventario que generan impactos, especialmente en la fracción orgánica que para Ecoinvent suma 62.60%, mientras que para el RESA y el SNC de este trabajo suman 55.98% y 44.09% respectivamente. Cabe mencionar que la composición de los RSU que emplea Ecoinvent, proviene de diversas fuentes



bibliográficas, además de ser utilizada para los escenarios de disposición final en otros países (Ecoinvent, 2023).

Tabla 3.48 Comparación del ICV de composiciones de RSU.

COMPOSICIÓN	TESIS		ECOINVENT SANITARY LANDFILL/ UNSANITARY LANDFILL
	RESA	SNC	
Comida	20.1%	25.2%	22.0%
Papel y Cartón	7.6%	4.0%	31.0%
Poda (jardines)	0.4%	0.1%	9.0%
Madera	0.9%	0.6%	0%
Caucho, Piel, Huesos y Paja	7.2%	0.8%	0%
Textiles	4.2%	3.9%	2.0%
Papel Higiénico	6.4%	10.0%	0%
Otros Orgánicos	11.6%	0.01%	0%
Pañales (20% orgánico / 80% inorgánico)	8.6%	16.7%	3.0%
Metales	1.1%	0.8%	3.7%
Baterías	0%	0%	0.0065%
Construcción y Demolición	1.2%	0%	0%
Vidrio y Cerámica	2.8%	2.4%	11.0%
Plásticos	14.8%	23.8%	15.0%
Otros Inorgánicos	13.0%	11.8%	3.0%
Productos electrónicos	0%	0%	0.34%

3.5.1. Comparación para Relleno Sanitario

En la Tabla 3.49 puede apreciarse que el impacto fue menor con el ICV desarrollado para las categorías de: Calentamiento Global (43%), Eutrofización (98%), Ecotoxicidad de Agua Dulce (97%), Toxicidad Humana Cancerígena (94%) y No Cancerígena (74%) y el Agotamiento de Recursos Fósiles (48%).

Por otra parte, el resto de categorías tuvieron un impacto mayor con el inventario desarrollado respecto a Ecoinvent en: Agotamiento del ozono estratosférico (8.7 veces), Formación de Ozono con afecciones a la Salud Humana (2.6 veces) y Ecosistemas Terrestres (2.7 veces), Formación de Partículas Finas (1.05 veces),



Acidificación (1.06 veces), Ecotoxicidad Terrestre (5.8 veces) y Uso de Suelo (2.8 veces).

Tabla 3.49 Comparación de resultados del RESA con ambos ICV.

CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDAD	ICV ECOINVENT	ICV Desarrollado
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	7.54E+02	4.26E+02
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	4.82E-05	4.20E-04
Formación de Ozono, Salud Humana	kg NO _x eq	8.30E-02	2.18E-01
Formación de Partículas Finas	kg PM _{2.5} eq	4.11E-02	4.33E-02
Formación de Ozono, Ecosistemas Terrestres	kg NO _x eq	8.40E-02	2.29E-01
Acidificación	kg SO ₂ eq	8.54E-02	9.07E-02
Eutrofización	kg P eq	3.56E-02	7.97E-04
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DCB	1.17E+01	6.84E+01
Ecotoxicidad de Agua Dulce	kg 1,4-DCB	2.28E-01	7.93E-03
Toxicidad Humana Cancerígena	kg 1,4-DCB	1.36E+00	7.83E-02
Toxicidad Humana No Cancerígena	kg 1,4-DCB	1.01E+01	2.67E+00
Uso de Suelo	m ² a crop eq	-3.87E-01	3.25E-01
Agotamiento de Recursos Fósiles	kg oil eq	3.29E+00	1.72E+00

La variación de los resultados obtenidos de comparar los inventarios, indica que además de la composición de los RSU, influye el tipo de tecnología utilizada en cada sitio. El dataset de Sanitary Landfill que emplea Ecoinvent, se basa en un vertedero Suizo, que toma en cuenta la construcción del sitio y las emisiones generadas a corto y largo plazo, involucrando procesos de quemado de biogás, tratamiento de lixiviados en una planta de agua residuales y la incineración de lodos. Sin embargo, no se menciona nada acerca del modelo de generación de biogás, las consideraciones sobre el biogás liberado y quemado y, la cantidad de compuestos presentes en éste. En cuanto a los lixiviados, no se especifica la cantidad producida, ni el porcentaje de infiltración.



Por otro lado, a diferencia de Ecoinvent, en el desarrollo del ICV para el RESA, se contemplaron sus etapas (construcción, operación y clausura), la composición de los RSU obtenida *in-situ*, el modelo para estimación de la generación de biogás, el porcentaje de captura y quemado y, la cantidad compuestos oxidados y liberados. Mientras que para los lixiviados, se determinó la producción de estos, el uso de combustible utilizado para la recirculación posterior a la clausura, el porcentaje de infiltración y la concentración respecto a su edad. Lo anterior descrito, fueron factores que hicieron variar el contenido de compuestos dentro del ICV, impactando en las categorías evaluadas. Por lo tanto, estas consideraciones reflejan las condiciones en las que deben operar los RESA en México, de acuerdo con la norma NOM-083-SEMARNAT-2003 (DOF, 2004).

3.5.2. Comparación para Sitio No Controlado

Los resultados de simular el ICV del SNC de Ecoinvent y de esta Tesis (Tabla 3.50), mostraron que el impacto fue menor con el inventario desarrollado para las categorías de: Calentamiento Global (53.7%), Ecotoxicidad de Agua Dulce (40.1%), Toxicidad Humana Cancerígena (74.5%) y No Cancerígena (17.9%).

Por otra parte, el resto de categorías tuvieron un impacto mayor con el inventario desarrollado respecto a Ecoinvent: Agotamiento del ozono estratosférico (237.5 veces), Eutrofización (1.2 veces), Formación de Ozono con afecciones a la Salud Humana (3.4 veces) y Ecosistemas Terrestres (3.6 veces), Formación de Partículas Finas (1.8 veces), Acidificación (1.4 veces), Ecotoxicidad Terrestre (5.5 veces), Uso de Suelo (1.7 veces) y Agotamiento de Recursos Fósiles (2.8%).



Tabla 3.50 Comparación de resultados del SNC de Ecoinvent y Tesis.

CATEGORÍA DE IMPACTO	UNIDAD	ECOINVENT	TESIS
Calentamiento Global	kg CO ₂ eq	1.39E+03	6.45E+02
Agotamiento del ozono estratosférico	kg CFC11 eq	2.51E-06	5.96E-04
Formación de Ozono, Salud Humana	kg NO _x eq	5.41E-02	1.85E-01
Formación de Partículas Finas	kg PM _{2.5} eq	1.99E-02	3.61E-02
Formación de Ozono, Ecosistemas Terrestres	kg NO _x eq	5.49E-02	1.98E-01
Acidificación	kg SO ₂ eq	5.14E-02	7.59E-02
Eutrofización	kg P eq	6.29E-02	7.49E-02
Ecotoxicidad Terrestre	kg 1,4-DCB	7.28E+00	4.03E+01
Ecotoxicidad de Agua Dulce	kg 1,4-DCB	6.69E-01	4.00E-01
Toxicidad Humana Cancerígena	kg 1,4-DCB	2.53E+00	6.43E-01
Toxicidad Humana No Cancerígena	kg 1,4-DCB	2.44E+01	2.00E+01
Uso de Suelo	m ² a crop eq	1.70E+00	2.91E+00
Agotamiento de Recursos Fósiles	kg oil eq	1.34E+00	3.86E+00

Los resultados obtenidos en la Tabla 3.50, indican que además de la composición de los RSU, influye el tipo de tecnología utilizada en cada sitio. El dataset de Unsanitary Landfill que emplea Ecoinvent, se basa en un vertedero insalubre y subcontrolado, donde la altura media final es de 15 metros. La duración de la fase de operación es de 25 años, con emisiones directas del 100% a la atmósfera. Los lixiviados del vertedero no son tratados. Sin embargo, no se menciona nada acerca del modelo de generación de biogás utilizado y la cantidad de lixiviados producidos.

En contraposición a Ecoinvent, el ICV desarrollado del SNC en Xalatlaco, incorporó un buen manejo al utilizar maquinaria para esparcir los RSU durante la operación; mientras que para la clausura, se consideró la colocación de material de cobertura, conforme a lo establecido en el “Manual de rehabilitación, clausura y saneamiento de sitios de disposición final” (Ortiz-Conde & Hernández-Barrios, 2012). Asimismo, se integraron datos obtenidos *in-situ* sobre la composición de los RSU, el modelo para



estimación de la generación de biogás y los compuestos al aire liberados durante la operación y posterior a la clausura. En cuanto a los lixiviados, se determinó la producción de estos, la infiltración y la concentración respecto a su edad, impactando en las categorías evaluadas. Por lo tanto, estas consideraciones tomadas en cuenta reflejan las condiciones en las que operan los SNC en México.



CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluaron los impactos ambientales generados en las etapas de construcción, operación y clausura de tres SDF distintos mediante ACV. En la primera fase del ACV se determinó el objetivo y alcance, la UF, los límites del sistema. En la segunda fase, se desarrolló el inventario para las diferentes etapas de los SDF. En la tercera fase se evaluaron los impactos con ReCiPe. En la cuarta fase se interpretaron los resultados y como quinta fase se realizó un análisis comparativo de los resultados simulados con el inventario de Ecoinvent y con el ICV desarrollado para el RESA y SNC.

Gracias a la información recabada en campo, fue posible elaborar un inventario más robusto en cuanto a materiales y compuestos para el biogás y lixiviados generados por el RESA, SC y SNC, que permitió realizar con mayor detalle el ACV en cada una de las etapas (construcción, operación y clausura), mientras que con el inventario de Ecoinvent no fue posible simular el SC, ni identificar de forma específica la etapa de clausura para los demás SDF .

El ACV del RESA y del SC reveló que la etapa de construcción tuvo una contribución menor en la mayoría de las categorías de impacto evaluadas. En contraste, la etapa de operación del SNC fue la más impactante, seguida por el RESA y el SC. Finalmente, la clausura de los SDF resultó en una reducción significativa del impacto generado durante la operación en la mayoría de las categorías.

La comparación entre los escenarios desarrollados en esta tesis (RESA y SNC) y los datasets de Ecoinvent (Sanitary Landfill y Unsanitary Landfill) reveló diferencias notables en la composición de los RSU en los inventarios de Ecoinvent. Estas diferencias afectaron directamente los resultados del ACV, reflejando mayores impactos ambientales en los escenarios globales de Ecoinvent. Este contraste pone



de manifiesto la relevancia de utilizar datos locales y específicos del sitio para obtener evaluaciones más precisas y representativas.

El ICV desarrollado para el RESA mostró menores impactos en categorías clave como Calentamiento Global, Eutrofización, Ecotoxicidad de Agua Dulce y Toxicidad Humana, en comparación con Ecoinvent, debido a las diferencias en la fracción orgánica de los residuos. De manera similar, el SNC presentó menores impactos en estas mismas categorías en comparación con Ecoinvent, lo que se atribuye a las características específicas del sitio rehabilitado de Xalatlaco, especialmente en la fracción orgánica.

El ACV permitió tener una visión holística de los impactos al ambiente y a la salud ocasionados por los escenarios de disposición de RSU, ofreciendo una referencia útil para que las autoridades municipales impulsen la transición hacia RESA.

Para avanzar hacia una mayor sostenibilidad y reducción de emisiones, se recomienda implementar tecnologías orientadas al aprovechamiento y valorización de los RSU, así como la recuperación de energía a partir del biogás generado.

Se recomienda que para futuros estudios de ACV, la evaluación de los escenarios se realice considerando la misma composición y cantidad de los RSU que ingresan en todos los tipos de SDF, así como la escasa atención que reciben los SNC en cuanto a su operación y clausura, lo cual es la práctica común en México y Latinoamérica.



FUENTES CONSULTADAS

- Aldana-Espitia, N., Botello-Álvarez, J., Rivas-García, P., Cerino-Córdova, F., Bravo-Sánchez, M., Abel-Seabra, J., & Estrada-Baltazar, A. (2017). Environmental Impact Mitigation During the Solidwaste Management in an Industrialized City in Mexico: An Approach of Life Cycle Assessment. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(2), 563-580.
- Almansour, M., & Akrami, M. (2024). An Environmental Assessment of Municipal Solid Waste Management Strategies in Riyadh, Saudi Arabia: A Comparative Life Cycle Analysis. *Sustainability*, 16(20), 1-18. doi:<https://doi.org/10.3390/su16209111>
- Avarand, N., Tavakoli, B., & Mahdiany-Bora, K. (2023). Life cycle assessment of urban waste management in Rasht, Iran. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 1385–1393. doi:<https://doi.org/10.1002/ieam.4751>
- Bajracharya, S., Adhikari, A., Shrestha, P., & Ghimire, A. (2022). Life-cycle assessment of solid waste management in Dhulikhel Municipality, Nepal. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 17(3), 147-154. doi:<https://doi.org/10.1680/jenes.21.00045>
- Balat, M., & Balat, H. (2009). Biogas as a Renewable Energy Source-A Review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(14), 1280-1293. doi:10.1080/15567030802089565
- Behrooznia, L., Sharifi, M., Alimardani, R., & Mousavi-Avval, S. (2018). Sustainability analysis of landfilling and composting-landfilling for municipal solid waste management in the north of Iran. *Journal of Cleaner Production*, 203, 1028-1038. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.307>
- Beylot, A., Villeneuve, J., & Bellenfant, G. (2013). Life Cycle Assessment of landfill biogas management: Sensitivity to diffuse and combustion air emissions. *Waste Management*, 401-411. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.08.017>
- Caicedo-Concha, D., Sandoval-Cobo, J., Stringfellow, A., & Colmenares-Quintero, R. (2021). An evaluation of final disposal alternatives for municipal solid waste
-



- through life cycle assessment: A case of study in Colombia. *Cogent Engineering*, 8, 1-17. doi:<https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1956860>
- Cheela, V., John, M., Biswas, W., & Dubey, B. (2021). Environmental impact evaluation of current municipal solid waste treatments in India using life cycle assessment. *Energies*, 14(11), 1-23. doi:<https://doi.org/10.3390/en1411313356>
- Cortinas, D. M. (2016). Antecedentes del Reciclaje y de la Gestión de Residuos Sólidos y Peligrosos en México. Recuperado el 17 de Julio de 2021, de Dra. Cristina Cortinas de Nava: <https://cristinacortinas.org/sustentabilidad/download/antecedentes-del-reciclaje-y-de-la-gestion-de-residuos-solidos-y-peligrosos-en-mexico/>
- Cossu, R., & Stegmann, R. (2019). *Solid Waste Landfilling: Concepts, Processes, Technologies* (1a. ed.). Oxford, UK: Elsevier Inc.
- Danthurebandara, M., Passel, S. V., Nelen, D., Tielemans, Y., & Acker, K. V. (2012). Environmental and Socio-Economic Impacts of Landfills. *Linnaeus ECO-TECH*, 28-26. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/278738702_Environmental_and_socio-economic_impacts_of_landfills
- Dastjerdi, B., Strezov, V., Kumar, R., He, J., & Behnia, M. (2021). Comparative life cycle assessment of system solution scenarios for residual municipal solid waste management in NSW, Australia. *Science of The Total Environment*, 767, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144355>
- De Feo, G., Ferrara, C., Iuliano, C., & Grosso, A. (2016). LCA of the collection, transportation, treatment, and disposal of source separated municipal waste: A Southern Italy case study. *Sustainability*, 8(11), 1-13. doi:<https://doi.org/10.3390/su8111084>
- DOF. (15 de 08 de 2003). Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002, Protección ambiental- Lodos y biosólidos.- Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Recuperado el 08 de 12 de 2021, de Diario Oficial de la Federación (DOF): https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=691939&fecha=15/08/2003
-



- DOF. (2004). NOM-083-SEMARNAT-2003. Recuperado el 20 de Julio de 2021, de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT): http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004#:~:text=NORMA%20Oficial%20Mexicana%20NOM%2D083,urbanos%20y%20de%20manejo%20especial.
- DOF. (2006). NOM-052-SEMARNAT-2005. Recuperado el 20 de Noviembre de 2023, de Diario Oficial de la Federación (DOF): <https://faolex.fao.org/docs/pdf/mex67089.pdf>
- DOF. (05 de 11 de 2014). Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011. Recuperado el 08 de 12 de 2021, de Diario Oficial de la Federación (DOF): https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5367196&fecha=05/11/2014
- DOF. (2016). Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. Recuperado el 17 de Julio de 2021, de Diario Oficial de la Federación (DOF): http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148_180121.pdf
- DOF. (2021). Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Recuperado el 15 de Julio de 21, de Diario Oficial de la Federación (DOF): <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
- Doka, G. (2009). Life Cycle Inventories of Waste Treatment Services. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Recuperado el 18 de 06 de 24, de www.ecoinvent.ch
- Ecoinvent. (2023). Ecoinvent. Recuperado el 03 de 07 de 2025, de Ecoinvent database: <https://ecoinvent.org/ecoinvent-v3-11/>
- EPA. (2010). Median Life, Annual Activity, and Load Factor Values for Nonroad Engine Emissions Modeling. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P10081RV.PDF?Dockkey=P10081RV.PDF>
- EPA. (2014). Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Compression-Ignition Engines in MOVES2014b. Obtenido de United States Environmental Protection Agency:



- <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100UXEN.PDF?Dockkey=P100UXEN.PDF>
- EPA. (2020). Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/advancing-sustainable-materials-management>
- Escamilla-Alvarado, C., Poggi-Varaldo, H., & Ponce-Noyola, M. (2016). Bioenergy and Bioproducts From Municipal Organic Waste as Alternative to Landfilling: A Comparative Life Cycle Assessment with Prospective Application to Mexico. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 25602-25617. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-016-6939-z>
- Eurofins Envira Ingenieros Asesores. (01 de Junio de 2021). ISO 14040: Análisis del Ciclo de Vida. Principios y Marco de Referencia. Recuperado el 15 de Julio de 2021, de Eurofins Envira Ingenieros Asesores: <https://envira.es/es/iso-14040-principios-relacionados-gestion-ambiental/>
- Fernández-Nava, Y., del Río, J., Rodríguez-Iglesias, J., Castrillón, L., & Marañón, E. (2014). Life Cycle Assessment of Different Municipal Solid Waste Management Options: A Case Study of Asturias (Spain). *Cleaner Production*, 81, 178-189. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.008>.
- Güereca, L. P., Torres, N., & Juárez-López, C. R. (2015). The Co-processing of Municipal Waste in a Cement Kiln in Mexico. A Life-Cycle Assessment Approach. *Cleaner Production*, 741-748. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.085>
- Hadzic, A., Voca, N., & Golubic, S. (2018). Lifecycle assessment of solid-waste management in city of Zagreb, Croatia. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20, 1286-1298. doi:<https://doi.org/10.1007/s10163-017-0693-2>
- Hauschild, M., Goedkoop, M., Guinee, J., Heijungs, R., Huijbregts, M., Jolliet, O., . . . Wolf, M. (2010). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Specific Guide for Life Cycle Inventory Data Sets (1a. ed.).



- Luxembourg, Luxembourg: Publications Office of the European Union.
doi:10.2788/39726
- INECC. (2021). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGyCEI). Retrieved 09 15, 2024, from <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei>
- INEGI. (2021). Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2019. Recuperado el 24 de 11 de 2024, de <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2019/#microdatos>
- INEGI. (2021). Censo Poblacional y Vivienda 2020. Recuperado el 06 de 09 de 2024, de <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Instituto de Ingeniería UNAM. (2009). Estudio de Evaluación de Tecnologías Alternativas o Complementarias para el tratamiento o Disposición Final de los Residuos Sólidos Urbanos. Recuperado el 22 de Julio de 2021, de Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD000931.pdf>
- IPCC. (2006). COMBUSTIÓN MÓVIL. En J. Harnisch, O. Lucon, R. Mckibbon, S. Saile, F. Wagner, & M. Walsh, Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero (págs. 1-78). IPCC. Obtenido de <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/vol2.html>
- ISO. (2006a). ISO 14040:2006 Environmental Management-Life Cycle Assessment–Principles and Framework. Obtenido de International Organization for Standardization: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:es>
- ISO. (2006b). ISO 14044:2006 Environmental Management–Life Cycle Assessment–Requirements and Guidelines. Obtenido de International Organization for Standardization: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:es>
- Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Woerden, F. W. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 (1a. ed.). Washington,



- Washington DC, USA: International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1329-0
- Khandelwal, H., Thalla, A., Kumar, S., & Kumar, R. (2019). Life cycle assessment of municipal solid waste management options for India. *Bioresource Technology*, 288, 1-7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121515>
- Klöpffer, W., & Grahl, B. (2014). *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice* (1a. ed.). Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. doi:10.1002/9783527655625
- Kumar, S. (2020). *Municipal Solid Waste Management in Developing Countries* (1a. ed.). Boca Raton, Florida, USA: CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/9781315369457>
- Letcher, T. M., & Vallero, D. A. (2019). *Waste: A Handbook for Management*. London, UK: Academic Press.
- López-Gasca, S. (2021). *Propuesta de Ubicación y Prediseño de un Relleno Sanitario Sustentable Intermunicipal, Entre Morelos y el Estado de México*. Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México. Recuperado el 13 de 07 de 2025, de <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/2651?mode=full>
- Ludwig, C., Hellweg, S., & Stucki, S. (2003). *Municipal Solid Waste Management* (1a. ed.). New York, USA: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-642-55636-4>
- Ludwig, V.; Stege, G.A.; Davila, J.L. (2009). *Manual del Usuario Modelo Mexicano de Biogás Versión 2.0*. Obtenido de SCS Engineers: https://www.globalmethane.org/documents/models/pdfs/manual_del_usuario_modelo_mexicano_de_biogas_v2_2009.pdf
- Machorro-Román, A., Rosano-Ortega, G., Tavera-Cortés, M. E., Flores-Trujillo, J. G., Maimone-Celorio, M. R., Martínez-Tavera, E., . . . Rodríguez-Espinosa, P. F. (2020). Sustainability and Evaluation of the Impact Caused by the Landfill of the Municipality of Carmen, Campeche, México. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*, 32(2). doi:<https://doi.org/10.17163/lgr.n32.2020.06>



- Makarenko, N., & Budak, O. (2017). Waste Management in Ukraine: Municipal Solid Waste Landfills and Their Impact on Rural Areas. *Annals of Agrarian Science*, 15(1), 80-87. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aasci.2017.02.009>
- Manfredi, S., & Christensen, T. H. (2009). Environmental Assessment of Solid Waste Landfilling Technologies by Means of LCA-Modeling. *Waste Management*, 29, 32-43. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.021>
- Manfredi, S., Niskanen, A., & Christensen, T. (2019). Environmental assessment of gas management options at the Old Ämmässuo landfill (Finland) by means of LCA-modeling (EASEWASTE). *Waste Management*, 29(5), 1588-1594. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.10.005>
- Martínez-Morales, I. (2021). Analisis de Ciclo de Vida para el Manejo Sustentable de Residuos Sólidos Urbanos en el Municipio de Xalatlaco. Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México. Recuperado el 13 de 07 de 2025, de <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/3754>
- Matthews, H. S., Hendrickson, C. T., & Matthews, D. H. (2015). Life Cycle Assessment: Quantitative Approaches for Decisions That Matter. United States. Obtenido de <https://www.lcatextbook.com/>
- McDougall, F. R., White, P. R., Franke, M., & Hindle, P. (2001). Integrated Solid Waste Management: A Life Cycle Inventory (2a. ed.). Oxford, UK: Wiley-Blackwell Science Ltd. doi:10.1002/9780470999677
- Medus, S., Escudero, D., & Cifuentes, O. (2018). Environmental Impact of a Garbage Dump in an Estuary. *Proceedings of the 25th Pan-American Conference of Naval Engineering-COPINAVAL*, 277-287. doi:10.1007/978-3-319-89812-4_25
- Ménard, J., Lesage, P., Deschênes, L., & Samson, R. (2004). Comparative Life Cycle Assessment of Two Landfill Technologies for the Treatment of Municipal Solid Waste. *Life Cycle Assessment*, 9, 371–378. doi:<https://doi.org/10.1007/BF02979080>
- Minghua, Z., Xiumin, F., Rovetta, A., Qichang, H., Vicentini, F., Bingkai, L., . . . Yi, L. (2009). Municipal Solid Waste Management in Pudong New Area, China. *Waste*



- Management, 29(3), 1227–1233.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.07.016>
- Montaner-Salas, M., & Sánchez-Almohalla, S. (1988). APROXIMACION, POR EL METODO DE THORNTHWAITE, AL CALCULO DE INFILTRACION DE LLUVIA UTIL. Papeles de Geografía, 14, 223-235. Obtenido de <https://revistas.um.es/geografia/article/view/42801>
- Morero, B., Montagna, A., Campanella, E., & Cafaro, D. (2020). Optimal process design for integrated municipal waste management with energy recovery in Argentina. Renewable Energy, 146, 2626-2636.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.085>
- Nanda, S., & Berruti, F. (2021). Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. Environmental Chemistry Letters, 19, 1433–1456.
doi:<https://doi.org/10.1007/s10311-020-01100-y>
- Niskanen, A., Manfredi, S., Christensen, T., & Anderson, R. (2009). Environmental assessment of Ämmässuo Landfill (Finland) by means of LCA-modelling (EASEWASTE). Waste Management & Research, 27(5), 542-550.
doi:<https://doi.org/10.1177/0734242X08096976>
- Ojeda-Benítez, S., & Beraud-Lozano, J. L. (2003). The Municipal Solid Waste Cycle in Mexico: Final Disposal. Resources, Conservation and Recycling, 39, 239-250.
doi:10.1016/S0921-3449(03)00030-2
- Olesen, A., & Damgaard, A. (2014). Landfilling in EASETECH: Data collection and modelling of the landfill modules in EASETECH. Technical University of Denmark, 1, 1-49. Obtenido de Landfilling in EASETECH: Data collection and modelling of the landfill: <https://orbit.dtu.dk/en/publications/landfilling-in-easetech-data-collection-and-modelling-of-the-land>
- Ortiz-Conde, R., & Hernández-Barrios, C. (2012). Manual de rehabilitación, clausura y saneamiento de sitios de disposición final. Recuperado el 22 de 07 de 2025, de <https://ciudadesytransporte.mx/manual-de-rehabilitacion-clausura-y-saneamiento-de-sitios-de-disposicion-final/>



- Ouedraogo, A., Frazier, R., & Kumar, A. (2021). Comparative Life Cycle Assessment of Gasification and Landfilling for Disposal of Municipal Solid Wastes. *Energies*, 14(21), 1-18. doi:<https://doi.org/10.3390/en14217032>
- Ouedraogo, A., Kumar, A., Frazier, R., & Sallam, K. (2024). Comparative Screening Life Cycle Assessments of Okara Valorisation Scenarios. *Environments*, 111(11), 1-18. doi:<https://doi.org/10.3390/environments11110248>
- Parkes, O. L. (2015). Life cycle assessment of integrated waste management systems for alternative legacy scenarios of the London Olympic Park. *Waste Management*, 40, 157-166. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.017>
- Pires, A., Martinho, G., Rodrigues, S., & Gomes, M. I. (2019). *Sustainable Solid Waste Collection and Management* (1a. ed.). Cham, Switzerland: Springer. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-93200-2>
- PRé. (2013). Introduction to LCA with SimaPro. Obtenido de PRé Sustainability: www.pre-sustainability.com
- PRé. (2020). SimaPro database manual: Methods library. Obtenido de PRé Sustainability: <https://simapro.com/wp-content/uploads/2020/10/DatabaseManualMethods.pdf>
- Rajaeifar, M., Tabatabaei, M., Ghanavati, H., Khoshnevisan, B., & Rafiee, S. (2015). Comparative life cycle assessment of different municipal solid waste management scenarios in Iran. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 886-898. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.037>
- Rajcoomar, A., & Ramjeawon, T. (2017). Life cycle assessment of municipal solid waste management scenarios on the small island of Mauritius. *Waste Management and Research*, 35(3), 313-324. doi:<https://doi.org/10.1177/0734242X16679883>
- Richard, E., Hilonga, A., Machunda, R., & Njau, K. (2021). Life cycle analysis of potential municipal solid wastes management scenarios in Tanzania: the case of Arusha City. *Sustainable Environment Research*, 31(1), 1-13. doi:<https://doi.org/10.1186/s42834-020-00075-3>



- Rohrer, K., Whitfield, F., Aussanasuwannakul, A., Ningrum, A., Hugli, C., & Breitenmoser, L. (2025). Comparative Screening Life Cycle Assessments of Okara Valorisation Scenarios. *Environments*, 12(3), 1-18. doi:<https://doi.org/10.3390/environments12030093>
- Rojas-Valencia, M. N., & Sahagún, A. C. (2012). Tiraderos a Cielo Abierto en México. *Ciencia y Desarrollo*, 38(259), 23-25. Obtenido de <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/archivo/259/articulos/tiraderos-a-cielo-abierto.html>
- Rotthong, M., Takaoka, M., Oshita, K., Rachdawong, P., Gheewala, S., & Prapasongsa, T. (2023). Life Cycle Assessment of Integrated Municipal Organic Waste Management Systems in Thailand. *Sustainability*, 15(1), 1-18. doi:<https://doi.org/10.3390/su15010090>
- Samadder, S., Prabhakar, R., Khan, D., Kishan, D., & Chauhan, M. (2016). Analysis of the Contaminants Released From Municipal Solid Waste Landfill Site: A Case Study. *Science of the Total Environment*, 580, 593-601. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.003>
- Sánchez-Arias, M., Riojas-Rodríguez, H., Catalán-Vázquez, M., Terrazas-Meraz, M., Rosas, I., Espinosa-García, A., . . . Siebe, C. (2019). Socio-Environmental Assessment of a Landfill Using a Mixed Study Design: A Case Study from México. *Waste Management*, 85, 42-59. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.012>
- Sauve, G., & Van Acker, K. (2020). The environmental impacts of municipal solid waste landfills in Europe: A life cycle assessment of proper reference cases to support decision making. *Journal of Environmental Management*, 261, 1-12. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110216>
- SEMARNAT. (1976a). NMX-AA-031-1976 Determinación de azufre en desechos sólidos. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>



- SEMARNAT. (1976b). NMX-AA-032-1976 Determinación de fosforo total en desechos sólidos (método del fosfavanadomolibdato). Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos:
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1984a). NMX-AA-016-1984 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de humedad. Recuperado el 25 de 11 de 2021, de Normatividad aplicable al tema de residuos:
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1984b). NMX-AA-018-1984 Protección al ambiente - Contaminación de suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de cenizas. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos:
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1984c). NMX-AA-024-1984 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de nitrógeno total. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos:
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1984d). NMX-AA-025-1984 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos - Determinación del PH - Método potenciométrico. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos:
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1984e). NMX-AA-092-1984 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de azufre. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos:
<https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
-



- SEMARNAT. (1985a). NMX-AA-015-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Muestreo - Método de cuarteo. Recuperado el 25 de 11 de 2021, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1985b). NMX-AA-019-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Peso volumétrico “in situ”. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1985c). NMX-AA-021-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de materia orgánica. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1985d). NMX-AA-022-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Selección y cuantificación de subproductos. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1985e). NMX-AA-033-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de poder calorífico superior. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1985f). NMX-AA-052-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Preparación de muestras en el laboratorio para su análisis. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
-



- SEMARNAT. (1985g). NMX-AA-061-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de la generación. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1985h). NMX-AA-067-1985 Protección al ambiente - contaminación del suelo -Residuos sólidos municipales - Determinación de la relación carbono/nitrógeno. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1985i). NMX-AA-094-1985 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de fosforo total. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1986a). NMX-AA-068-1986 Protección al ambiente - Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación de hidrogeno a partir de materia orgánica. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1986b). NMX-AA-080-1986 Contaminación del suelo - Residuos sólidos municipales - Determinación del porcentaje de oxígeno en materia orgánica. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (1987). NMX-AA-091-1987 Calidad del suelo – Terminología. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
-



- SEMARNAT. (2004). NOM-098-SEMARNAT-2002, Protección ambiental-Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes. Recuperado el 25 de 11 de 21, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/normatividad-aplicable-al-tema-de-residuos>
- SEMARNAT. (2009). Manual de Especificaciones Técnicas para la Construcción de Rellenos Sanitarios para Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y Residuos de Manejo Especial (RME). Recuperado el 05 de Julio de 2021, de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT): <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2011/CD000935.pdf>
- SEMARNAT. (2012). Residuos Sólidos Urbanos. Obtenido de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_1.html
- SEMARNAT. (2018). NMX-AA-180-SCFI-2018. Que establece los métodos y procedimientos para el tratamiento aerobio de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como la información comercial y de sus parámetros de calidad de los productos. Recuperado el 21 de 07 de 2025, de Normatividad aplicable al tema de residuos: <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/PPD1/NMX-AA-180-SCFI-2018.pdf>
- SEMARNAT. (2019). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Recuperado el 25 de 11 de 2021, de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/index.html>
- SEMARNAT. (2020). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos. Recuperado el 20 de Junio de 2021, de Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT): <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/554385/DBGIR-15-mayo-2020.pdf>
-



- Sharma, K., & Jain, S. (2020). Municipal Solid Waste Generation, Composition, and Management: The Global Scenario. *Social Responsibility*, 16(6). doi:10.1108/SRJ-06-2019-0210
- Shrestha, P., Ghimire, A., Dangi, M., & Urynowicz, M. (2023). Development of a Municipal Solid Waste Management Life Cycle Assessment Tool for Banepa Municipality, Nepal. *Sustainability*, 15(13), 1-18. doi:https://doi.org/10.3390/su15139954
- Silva, C., Caro, D., & Thomsen, M. (2019). Environmental Assessment of Alternatives for Biowaste Treatment in Mexico City. *Energy Systems and Policy*, 7(30), 1-30. doi:10.3389/fenrg.2019.00030
- Slorach, P., Jeswani, H., Cuéllar-Franca, R., & Azapagic, A. (2019). Environmental and economic implications of recovering resources from food waste in a circular economy. *Science of The Total Environment*, 693, 1-18. doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.322
- Tchobanoglous, G., & Kreith, F. (2012). *Handbook of Solid Waste Management* (2a. ed.). USA: McGraw-Hill. doi:10.1036/0071356231
- Townsend, T., Powell, J., Jain, P., Xu, Q., Tolaymat, T., & Reinhart, D. (2015). *Sustainable Practices for Landfill Design and Operation* (1a. ed.). New York, USA: Springer. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2662-6
- Tsydenova, N. (2017). Applying Waste Treatment Scenarios in Toluca Region (Mexico). *Waste Technology*, 5(1), 1-8. doi:http://dx.doi.org/10.12777/wastech.5.1.1-8
- Tsydenova, N., Vázquez Morillas, A., & Cruz Salas, A. (2018). Sustainability Assessment of Waste Management System for Mexico City (Mexico)-Based on Analytic Hierarchy Process. *Recycling*, 3(45), 1-18. doi:https://doi.org/10.3390/recycling3030045
- Vaverková, M. D. (2019). Landfill Impacts on the Environment-Review. *Geosciences*, 9(431). doi:10.3390/geosciences9100431



- Wang, Y., Levis, J., & Barlaz, M. (2021). Life-Cycle Assessment of a Regulatory Compliant U.S. Municipal Solid Waste Landfill. *Environmental Science & Technology*, 55(20), 13583–13592. doi:<https://doi.org/10.1021/acs.est.1c02526>
- Weligama-Thuppahige, R., & Babel, S. (2022). Environmental impact assessment of organic fraction of municipal solid waste treatment by anaerobic digestion in Sri Lanka. *Waste Management & Research*, 40, 236-243. doi:<https://doi.org/10.1177/0734242X211013405>
- Williams, P. T. (2013). *Waste Treatment and Disposal* (2a. ed.). Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd. doi:10.1002/0470012668
- Worrell, W. A., & Vesilind, P. A. (2012). *Solid Waste Engineering* (2a. ed.). Stamford, USA: Cengage Learning.
- Yadav, P., & Samadder, S. (2018). Environmental impact assessment of municipal solid waste management options using life cycle assessment: a case study. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 838–854. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-017-0439-7>
- Yay, A. S. (2015). Application of Life Cycle Assessment (LCA) for Municipal Solid Waste Management: A Case Study of Sakarya. *Cleaner Production*, 94, 284-293. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.089>
- Zarea, M., Moazed, H., Ahmadmoazzam, M., Malekghasemi, S., & Jaafarzadeh, N. (2019). Life cycle assessment for municipal solid waste management: a case study from Ahvaz, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(131), 1-13. doi:<https://doi.org/10.1007/s10661-019-7273-y>
- Ziegler-Rodriguez, K., Margallo, M., Aldaco, R., Vázquez-Rowe, I., & Kahhat, R. (2019). Transitioning from open dumpsters to landfilling in Peru: Environmental benefits and challenges from a life-cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 229, 989–1003. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.015>



ANEXOS

EN PROCESO DE PUBLICACIÓN

Artículo Indexado



Vol. 23, No. 2(2024) IA24215

*Revista Mexicana de Ingeniería Química***Review of appropriate and best-evaluated options with life cycle assessment for municipal solid waste management****Revisión de las opciones apropiadas y mejor evaluadas con análisis de ciclo de vida para la gestión de residuos sólidos urbanos**

E. Mondragón-Zarza¹, M.C. Hernández-Berriel¹, S.J. Turpin-Marion^{2*}, E.R. Rosa-Domínguez³, M.C. Mañón-Salas⁴, M.C. Carreño-de-León¹

¹División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico s/n. Colonia Agrícola Bellavista Metepec, Edo. de México, México C.P. 52149.

²Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Azcapotzalco, Av. San Pablo 420, Col. Nueva el Rosario, Alcaldía Azcapotzalco, C.P. 02128, CDMX.

³Facultad de Química y Farmacia (FQF), Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km. 5 y 1/2, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

⁴Departamento de Ingeniería Industrial, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico s/n. Colonia Agrícola Bellavista Metepec, Edo. de México, México C.P. 52149.

Received: November 25, 2023; Accepted: February 27, 2024

Abstract

Life cycle assessment (LCA) is one of the best tools to determine the environmental impact of municipal solid waste (MSW) management. This work analyzed the best-evaluated MSW management options in the world with LCA, to identify future trends. 132 LCA publications (2015-2023), their geographical distribution, and the results obtained according to the ISO 14040 standard were considered; The options evaluated were also compared with those reported by the World Bank. The results showed that the majority of publications come from the Europe and Central Asia region, followed by Latin America and the Caribbean. After comparing the alternatives, it was observed that open dumps and controlled sites will tend to be replaced by landfills with energy recovery in all regions of the world; the technologies for recovering materials and using the organic fraction will continue to be applied; and alternative processes will become more common. This work aims to support decision-making for the selection of treatments and improve the management of MSW according to geographical conditions, as well as the development of strategies to respond to the 2030 agenda.

Keywords: environmental impacts, landfill, recycling, waste-to-energy, waste treatment.

Resumen

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una de las mejores herramientas para determinar el impacto ambiental de la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU). Este trabajo analizó las opciones de gestión de RSU mejor evaluadas en el mundo con ACV, para identificar tendencias futuras. Se consideraron 132 publicaciones de ACV (2015-2023), su distribución geográfica y los resultados obtenidos según la norma ISO 14040; también se compararon las opciones evaluadas con las reportadas por el Banco Mundial. Los resultados mostraron que la mayoría de las publicaciones provienen de la región de Europa y Asia Central, seguido por América Latina y el Caribe. Después de comparar las alternativas se observó que los tiraderos a cielo abierto y los sitios controlados tenderán a ser reemplazados por rellenos sanitarios con recuperación de energía en todas las regiones del mundo; las tecnologías de recuperación de materiales y de aprovechamiento de la fracción orgánica se seguirán aplicando; y los procesos alternativos serán más comunes. Este trabajo pretende apoyar la toma de decisiones para la selección de tratamientos y mejorar la gestión de los RSU según las condiciones geográficas, así como el desarrollo de estrategias para responder a la agenda 2030.

Palabras clave: conversión de residuos en energía, impactos ambientales, reciclaje, relleno sanitario, tratamiento de residuos.

*Corresponding author. E-mail: stm@azc.uam.mx;

<https://doi.org/10.24275/rmiq/IA24118b>

ISSN:1665-2738, issn-e: 2395-8472



Curso internacional

DIRECCIÓN GENERAL DE VINCULACIÓN CON EL MEDIO
DIRECCIÓN DE FORMACIÓN CONTINUA Y EMPLEABILIDAD



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO

CERTIFICADO DE APROBACIÓN ACTIVIDAD DE FORMACIÓN CONTINUA

ELOY MONDRAGÓN ZARZA

aprobó el Curso

**“VI CURSO INTERNACIONAL GESTIÓN SOSTENIBLE DE
RESIDUOS SÓLIDOS AMÉRICA LATINA Y EL CARIBE.
EL IMPACTO DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA
GESTIÓN DE RESIDUOS Y SU DISPOSICIÓN FINAL”.**

La referida Actividad de Formación Continua del INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, fue impartida por un Staff de 12 relatores en Valparaíso, entre el 16 de agosto y el 6 de octubre de 2023, con un total de 60 horas pedagógicas.

ELOY MONDRAGÓN obtuvo una calificación final de 86 y un 100% de asistencia.

Firmado por Angélica María
Casaletti Loyola
Rut 12669607-8
El 25-10-2023 a las 14:30
Con Certificado Serial
5572643b863db3d8
Emitido por E-Sign Class 3
Firma Electronica
Avanzada CA
Rut 99551740-K
Válido desde 11-08-2023
Válido hasta 11-08-2026

Artículo REDISA



EMISIONES DE VEHÍCULOS RECOLECTORES DE RESIDUOS EN UN RELLENO SANITARIO

Mondragón-Zarza, Eloy¹; Hernández-Berriel, María del Consuelo^{1*}; Rosa-Domínguez, Elena Regla²;
Turpin-Marion, Sylvie³

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Toluca, Av. Tecnológico s/n. Colonia Agrícola Bellavista Metepec, Edo. de México, México C.P. 52149. Tel. (52) 722 087 00 ext. 3630

² Facultad de Química y Farmacia (FQF), Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Carretera a Camajuaní Km. 5 y 1/2. Santa Clara. Villa Clara. Cuba.

³ Departamento de Energía, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col Reynosa Tamaulipas, 02200 México, CDMX, México.

*mhernandezb@toluca.tecnm.mx

Resumen

En México el aumento en la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) durante las últimas décadas, ha provocado mayor demanda de servicios de vehículos de recolección, traslado y disposición en rellenos sanitarios (RESA); sin embargo, se tiene escaso conocimiento de los impactos en cuanto a gases de efecto invernadero (GEI) durante la entrega y disposición de los RSU. El objetivo de este manuscrito fue determinar las emisiones directas como Huella de Carbono, generadas por los vehículos de recolección y transporte, desde su ingreso, registro y salida del RESA. Para el desarrollo se recabó información de tiempos y movimientos en el RESA de Tenango del Valle durante dos semanas; se utilizó la metodología del IPCC para estimar las emisiones de GEI, empleando los datos de los vehículos que depositaron sus RSU, factores de emisión y parámetros específicos para México. Para la disposición promedio de 2 025,43 tRSU/semana, las emisiones totales promedio de diésel fueron 3,72E-01 tCO₂eq/semana (3,66E-01 tCO₂eq/semana de CO₂, 5,11E-03 tCO₂eq/semana de N₂O y 5,40E-04 tCO₂eq/semana de CH₄). Las mayores emisiones se obtuvieron durante el proceso de descarga de los RSU. Si todos los vehículos recolectores utilizaran gas natural (GN) o biogás (BioG), las emisiones de GEI podrían disminuirse hasta 99,89% o 99,95%, respectivamente; y el costo hasta un 45,21%. Es recomendable no exceder las capacidades de compactación indicadas por el fabricante para que el tiempo de descarga disminuya.

Palabras clave: Emisiones; Gases de efecto invernadero; Relleno sanitario; Residuos sólidos urbanos.

1. Introducción

Actualmente en el mundo se generan 2,01 billones de toneladas de residuos sólidos urbanos (RSU) al año, y se proyecta que esta cantidad aumente un 70% en los próximos 30 años provocando una mayor demanda de servicios de vehículos de recolección, traslado y disposición en sitios de disposición final (SDF), incrementando la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) debido a los