



Investigación y Ciencia

ISSN: 1665-4412

ISSN: 2521-9758

revistaiyc@edu.uaa.mx

Universidad Autónoma de Aguascalientes

México

Dávila-Sámamo, Alma Regina; Castillo-Suárez, Luis Antonio; Linares-Hernández, Ivonne; García-Colindres, Miriam Aidé; Martínez-Miranda, Verónica

Efectos ambientales en el aire, agua y suelo de los residuos sólidos urbanos de un relleno sanitario del Estado de México

Investigación y Ciencia, vol. 32, núm. 91, 2024

Universidad Autónoma de Aguascalientes

Aguascalientes, México

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67478488003>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc

Red de revistas científicas de Acceso Abierto diamante

Infraestructura abierta no comercial propiedad de la academia

# Efectos ambientales en el aire, agua y suelo de los residuos sólidos urbanos de un relleno sanitario del Estado de México

Environmental effects on air, water and soil of municipal solid waste from a landfill in the State of México

Alma Regina Dávila-Sámamo\*, Luis Antonio Castillo-Suárez\*\*, Ivonne Linares-Hernández\*\*, Miriam Aidé García-Colindres\*, Verónica Martínez-Miranda\*\*✉

Dávila-Sámamo, A. R., Castillo-Suárez, L. A., Linares-Hernández, I., García-Colindres, M. A., & Martínez-Miranda, V. (2024). Efectos ambientales en el aire, agua y suelo de los residuos sólidos urbanos de un relleno sanitario del Estado de México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 32(91), e4520. <https://doi.org/10.33064/iycuaa2024914520>

## RESUMEN

En México, la mayoría de los municipios depositan sus residuos sólidos urbanos (RSU) en sitios no controlados o rellenos sanitarios (RS); por tanto, existe la necesidad de mejorar sus condiciones y conocer el impacto existente en el aire, agua y suelo. Se realizó la caracterización elemental del lixiviado, suelo y agua. Además, se caracterizó fisicoquímica y microbiológicamente una muestra de agua de pozo cercana al RS (1.5 km) y del lixiviado. Se analizó la calidad del aire y las condiciones del clima. Los lixiviados presentan una alta carga orgánica, materia nitrogenada y cloruros, y un bajo índice de biodegradabilidad DBO<sub>5</sub>/DQO de 0.18. La concentración de los contaminantes del aire se encuentra dentro de los límites permisibles debido a que es una zona abierta y la velocidad del viento favorece la dispersión de estos. Los metales provenientes de los lixiviados son retenidos en el suelo, lo que evita su migración al agua subterránea.

**Palabras clave:** efectos ambientales; residuos sólidos urbanos; aire; agua; suelo; relleno sanitario.

## ABSTRACT

In México, municipalities deposit their urban solid waste (USW) in uncontrolled sites or sanitary landfills (SL); therefore, there is a need to improve their conditions and know the existing impact on air, water and soil. The elemental characterization of the leachate, soil and water was carried out, a sample of well water near the SL (1.5 km) and leachate was characterized physicochemically and microbiologically. Air quality and weather conditions were analyzed. The leachate has a high organic load, nitrogenous matter and chlorides, and a low BOD<sub>5</sub>/COD biodegradability index of 0.18. The concentration of air pollutants is within the permissible limits because it is an open area and the wind speed favors their dispersion. In the soil there are concentrations of retained metals that prevent their migration to groundwater.

**Keywords:** environmental effects; urban solid waste; air; water; soil; landfill.

## INTRODUCCIÓN

El RS es el método de ingeniería más común para la disposición de los RSU y su gestión integrada es un proceso para garantizar el equilibrio del ecosistema y la calidad de vida (Rodrigo-Illarri et

Recibido: 28 de junio de 2023, Aceptado: 8 de enero de 2024, Publicado: 31 de enero de 2024

\*Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México Unidad Colón. Paseo Colón esq. Paseo Tollocan, Residencial Colonia Ciprés, C. P. 50120, Toluca de Lerdo, Estado de México, México. Correo electrónico: [ardavilas@uaemex.mx](mailto:ardavilas@uaemex.mx); [mgarciac046@alumno.uaemex.mx](mailto:mgarciac046@alumno.uaemex.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4154-9078>; <https://orcid.org/0000-0003-2873-4586>

\*\*Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México Unidad San Cayetano. Km. 14.5, carretera Toluca-Atlacomulco, C. P. 50200, Toluca, Estado de México, México. Correo electrónico: [lacastillos\\_s@uaemex.mx](mailto:lacastillos_s@uaemex.mx); [ilinaresh@uaemex.mx](mailto:ilinaresh@uaemex.mx); [mmirandav@uaemex.mx](mailto:mmirandav@uaemex.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9755-7117>; <https://orcid.org/0000-0001-7302-8491>; <https://orcid.org/0000-0003-4977-9249>

✉ Autor para correspondencia

al., 2020). La gestión de RSU se compone de varios elementos, como la reducción de residuos, la recogida, el tratamiento y el almacenamiento in situ, el transporte, la recuperación de materiales y la energía (Ayeleru et al., 2021; Rezaeisabzevar et al., 2020); la mala gestión histórica de las prácticas de vertido a cielo abierto ha provocado impacto ambiental negativo (Donevska et al., 2021).

El impacto ambiental de los RS está asociado a la emisión de gases de efecto invernadero  $\text{CO}_2$   $\text{CH}_4$  y la producción de lixiviados, como resultado de la compactación de los RSU y la percolación del agua de lluvia, a través de reacciones bioquímicas que ocurren en las celdas de disposición final (Maldonado et al., 2017). Los lixiviados contienen diferentes sustancias químicas, como materia orgánica disuelta, sales inorgánicas, trazas de impurezas orgánicas y metales pesados, con diferentes concentraciones debido a los procesos físicos, químicos y microbiológicos que influyen en la composición del lixiviado y de acuerdo con el tipo de residuos depositados, el método de explotación del RS y la disponibilidad de oxígeno; así como las condiciones hidrogeológicas y la edad del RS (Przydatek & Kanownik, 2019). Los lixiviados pueden clasificarse de acuerdo con su edad, pH y DQO en: jóvenes (tiempo < 5 años, pH 4.5-7.5 y DQO 6000-60 000 mg/l), de edad media (5-10 años, pH 7.55-7.85, DQO 4000-10 000) y antiguo o estabilizado (> 10 años, pH 7.5-9, DQO 500-4500 mg/l) (Wijekoon et al., 2022).

Por otro lado, la contaminación del aire es el resultado de una compleja mezcla de contaminantes generados en actividades antropogénicas y en fuentes naturales (Raheison Semjen, 2020). Los RSU depositados en los vertederos liberan gases tóxicos como hidrocarburos ligeros (HCB), metano ( $\text{CH}_4$ ), sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ), compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), dioxinas, furanos, óxidos metálicos, cenizas y metales pesados, que pueden migrar al suelo y al agua subterránea por percolación y lixiviación (Iván, Melitón, José, & Agustina, 2015; Rueda, Gómez, García, & López, 2020).

El objetivo de esta investigación fue evaluar los impactos ambientales en el aire, el agua y el suelo en un RS ubicado en San Antonio la Isla, debido a la infiltración de lixiviados proveniente del RS; así como identificar los elementos que causan impactos en la salud, utilizando la matriz causa-efecto. Los parámetros fisicoquímicos del suelo, del agua subterránea y de los lixiviados se determinaron por análisis elemental por plasma de acoplamiento inductivo, los contaminantes en el aire se analizaron mediante monitoreo atmosférico para determinar el nivel de afectación. Además, se proponen estrategias para mitigar el impacto sobre el medio ambiente y la salud humana en la zona de estudio.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

La hipótesis del trabajo de investigación es: los residuos sólidos urbanos impactan en la calidad del aire, agua y suelo del relleno sanitario en estudio debido a la percolación de los lixiviados generados en el proceso de biodegradación y a los gases de efecto invernadero.

### **Área de estudio**

El RS en estudio se encuentra al suroeste del Estado de México (figura 1), tiene una superficie de 105,146 m<sup>2</sup>. El RS y su gestión integrada es un proceso para garantizar el equilibrio del ecosistema y la calidad de vida (Maldonado et al., 2017).

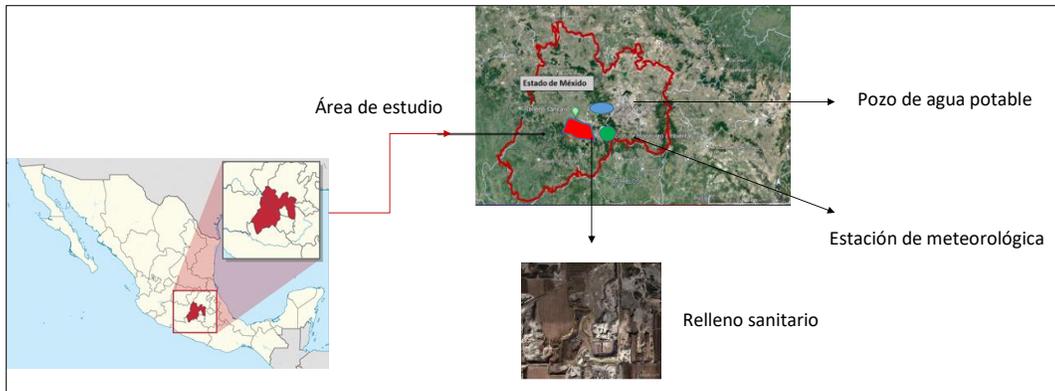


Figura 1. Relleno Sanitario, ubicación del pozo de agua y central de monitoreo atmosférico. Elaboración propia.

El municipio de San Antonio la Isla tiene una extensión de 18.50 km<sup>2</sup>, la cabecera municipal alcanza 2,595 m sobre el nivel del mar. La temperatura media anual de 12 – 16 °C; la máxima incidencia de lluvias es en el mes de julio, con valores que oscilan entre 150 y 160 ml; el mes más cálido es mayo con una temperatura entre 14 y 15 °C (Ayuntamiento de San Antonio la Isla, 25 de mayo de 2022; INEGI, 2020b).

### Caracterización fisicoquímica del agua de pozo

Se tomó una muestra de agua de pozo cercano al RS (1.4 km) (NOM-014-SSA1-1993) y se caracterizó mediante análisis elemental Plasma de Acoplamiento Inductivo-Masas (ICP-MS) mediante un espectrómetro modelo iCAP Qc marca Thermo Scientific y los parámetros fisicoquímicos pH (NMX-AA-008-SCFI-2016), conductividad eléctrica (NMX-AA-093-SCFI-2018), sólidos disueltos (NMX-AA-034-SCFI-2015), cloruros (NMX-AA-073-SCFI-2001), sulfatos (NMX-AA-074-SCFI-2001), alcalinidad y acidez (NMX-AA-036-SCFI-2001), fosfatos (NMX-AA-029-SCFI-2001), DQO, NMX-AA-030/2-SCFI-2012), COT (método Hach 10173), DBO (NMX-AA-028-SCFI-2001) y parámetros microbiológicos (NOM-113-SSA1-1994).

### Perfiles de elevación

Se determinaron tres perfiles de elevación entre la ubicación del RS y se caracterizó el agua para establecer las diferencias de altitud entre ambos puntos y evaluar su posible influencia sobre la escorrentía de contaminantes. Éstos se obtuvieron con el programa Google Earth, la base de datos existente contiene imágenes Landsat disponibles (30 m o 15 m con enfoque panorámico), ortofotos (0.5-2 m) e imágenes de satélite comerciales de alta resolución a marzo de 2017 (Hsu, Tsai, & Chen, 2018; Instituto Nacional Estadística y Geografía (INEGI), 2020; Rabby & Li, 2019).

### Cuantificación y determinación de la generación de RSU

Se determinó la cantidad mensual de RSU para una población de 1,601,338 habitantes del municipio de Toluca (INEGI, 2020a), el RS recibe 185,280 t de RSU/año, según la ecuación 1: N es el número total de habitantes de la población, X es el % de RSU recibidos del total de la población de los municipios, Y es el valor per cápita de los RSU ( $\frac{kg}{hab.día}$ ) y Z los RSU ( $\frac{kg}{día}$ ).

$$(N) \frac{(X)}{(100)} \left( Y \frac{kg}{hab.día} \right) = Z \frac{kg}{día} \quad (1)$$

### Caracterización del lixiviado del RS

Se tomaron 100 ml de lixiviados en una botella de vidrio con 2 ml de HNO<sub>3</sub> para el análisis de metales (digestión preliminar) por ICP-MS mediante un espectrómetro modelo iCAP Qc de la marca Thermo Scientific y 2 l para los análisis fisicoquímicos.

### Muestreo y caracterización del aire

Los contaminantes atmosféricos NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub> y material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>) se cuantificaron a través de la red automática de monitoreo atmosférico de la zona metropolitana del Valle de Toluca. También se dio seguimiento a la velocidad del viento (VV en m/s) y a la humedad relativa (HR en %) cada hora durante el mes de noviembre de 2021 (720 datos); la estación se ubica a una distancia de 2413 m +/- 349 del relleno sanitario. Un análisis de regresión simple fue realizado para explicar la relación entre los contaminantes y las condiciones ambientales de VV y HR a través del programa Statgraphics Centurion XVI; el coeficiente de correlación y un análisis de varianza (ANOVA) fueron determinados para establecer una relación estadísticamente significativa (Masseran & Safari, 2020).

### Muestreo y caracterización del suelo

Se tomó una muestra de suelo contaminado (150 g) del RS y de suelo limpio, la cual se digirió mediante microondas, se analizó con un espectrómetro modelo iCAP Qc marca Thermo Scientific. Las muestras, secadas y molidas, se caracterizaron por microscopía electrónica de barrido (MEB) con un microscopio Low Vacuum Scanning Electron Microscope (JSM-IT100LV), JEOL, México. El análisis elemental del suelo se realizó por espectroscopia dispersiva de rayos X (EDS).

### Matriz causa-efecto

La información del lixiviado, agua de pozo, suelo y aire se integró para calcular los sistemas de gestión integral (SGI) y se establecieron los factores ambientales que mostraron los impactos sobre el agua, la atmósfera y el suelo (Araiza Aguilar et al., 2018). En la tabla 1 se muestran las interacciones causa-efecto y los componentes de la matriz.

Tabla 1  
*Interacciones causa-efecto*

Características físicas y químicas	Acción	Clasificación de las acciones
A. Suelo	A. Recursos minerales B. Materiales de construcción C. Suelos D. Geomorfología E. Factores físicos singulares	1. Modificación del entorno 2. Transformación del suelo 3. Extracción de recursos 4. Sistema de gestión integral
B. Agua	A. Subterránea B. Calidad C. Recarga	5. Recursos renovables 6. Tratamiento y vertido de residuos
C. Atmósfera	A. Calidad (gases, partículas) B. Clima (micro y macro)	7. Tratamiento químico
D. Métodos de gestión	A. Servicio Municipal Directo B. Concesión C. Alianzas Público-privadas D. Economía Mixta E. Privado	

Componentes de la Matriz causa-efecto	
Código	Factores
FQ1	Recursos minerales
FQ2	Materiales de construcción
FQ3	Suelos
FQ4	Geomorfología
FQ5	Factores físicos singulares
FQ6	Caminos
FQ7	Calidad
FQ8	Recarga
FQ9	Calidad (gases, partículas)
FQ10	Clima (micro y macro)
MG1	Servicio municipal directo
MG2	Concesión
MG3	Privado

Nota: Elaboración propia.

Tabla 2  
Caracterización fisicoquímica de lixiviados

Parámetros	Concentración	Unidades
Alcalinidad	15,006	mg/l CaCO <sub>3</sub>
Acidez	N.D.	mg/l CaCO <sub>3</sub>
Cloruros	4,646.79	mg/l Cl <sup>-</sup>
Conductividad Eléctrica	34,355	μS/cm
Color	4,325	Pt/Co
DBO	1,634.25	mg/l O <sub>2</sub>
DQO	8,912.50	mg/l O <sub>2</sub>
Índice de biodegradabilidad	0.18	
Dureza Total	1,105.50	mg/l CaCO <sub>3</sub>
Fluoruros	0.61	mg/l F <sup>-</sup>
Nitratos	33.75	mg/l N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Nitrógeno amoniacal	2,892.50	mg/l N-NH <sub>3</sub>
Nitrógeno Total	3,625	mg/l N-Tot
pH	8.45	
Sólidos Disueltos Totales	19,081	mg/l SDT
Sólidos Suspendidos	54	mg/l SST
Totales		
Sólidos Totales	19,135	mg/l STT
Turbidez	33.63	UTN
Cd	0.0023	mg/l
Cr	0.3205	mg/l
Mn	0.0279	mg/l
Ni	0.1137	mg/l
V	0.0269	mg/l
Li	0.0077	mg/l
Na	525.19	mg/l
Mg	8.898	mg/l
K	380.614	mg/l
Ca	10.25	mg/l
Al	0.3958	mg/l
B	1.1313	mg/l
Ba	0.2145	mg/l
Co	0.0248	mg/l
Cu	0.1130	mg/l
Fe	1.8822	mg/l
P	9.6935	mg/l

Si	7.1329	mg/l
Sn	0.0561	mg/l
Sr	0.1537	mg/l
Zn	0.2129	mg/l
S	12.4265	mg/l

Nota: Elaboración propia.

## RESULTADOS

Tabla 3  
Caracterización de agua de pozo aladoño al RS

Parámetro	Parque industrial	Unidades	NOM-127-SSA1-2021
Alcalinidad	54.90	mg/l CaCO <sub>3</sub>	N.A.
Acidez	3.68	mg/l CaCO <sub>3</sub>	N.A.
Cloruros	19.33	mg/l Cl <sup>-</sup>	N.A.
Conductividad Eléctrica	285.7	µS/cm	N.A.
Color verdadero	1	UC	15
DBO	4.45	mg/l O <sub>2</sub>	N.A.
DQO	9.25	mg/l O <sub>2</sub>	N.A.
Dureza Total	89.45	mg/l CaCO <sub>3</sub>	500
Fluoruros	0.17	mg/l F <sup>-</sup>	1.50
Nitrógeno de nitratos	6.36	mg/l N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	11.0
pH	7.0		6.5 – 8.5
Turbiedad	0.26	UNT	4
Coliformes totales	20	UFC/100 ml	N.A.
Li	0.0069	mg/l	N.A.
Na	13.0424	mg/l	N.A.
Mg	12.2209	mg/l	N.A.
K	3.8149	mg/l	N.A.
Ca	16.5343	mg/l	N.A.
Ba	0.0260	mg/l	N.A.
P	0.1102	mg/l	N.A.
S	10.4377	mg/l	N.A.
Si	32.8238	mg/l	N.A.
Sr	0.1500	mg/l	N.A.
V	0.0082	mg/l	N.A.

Nota: \*No aplica (N. A.).  
Elaboración propia.

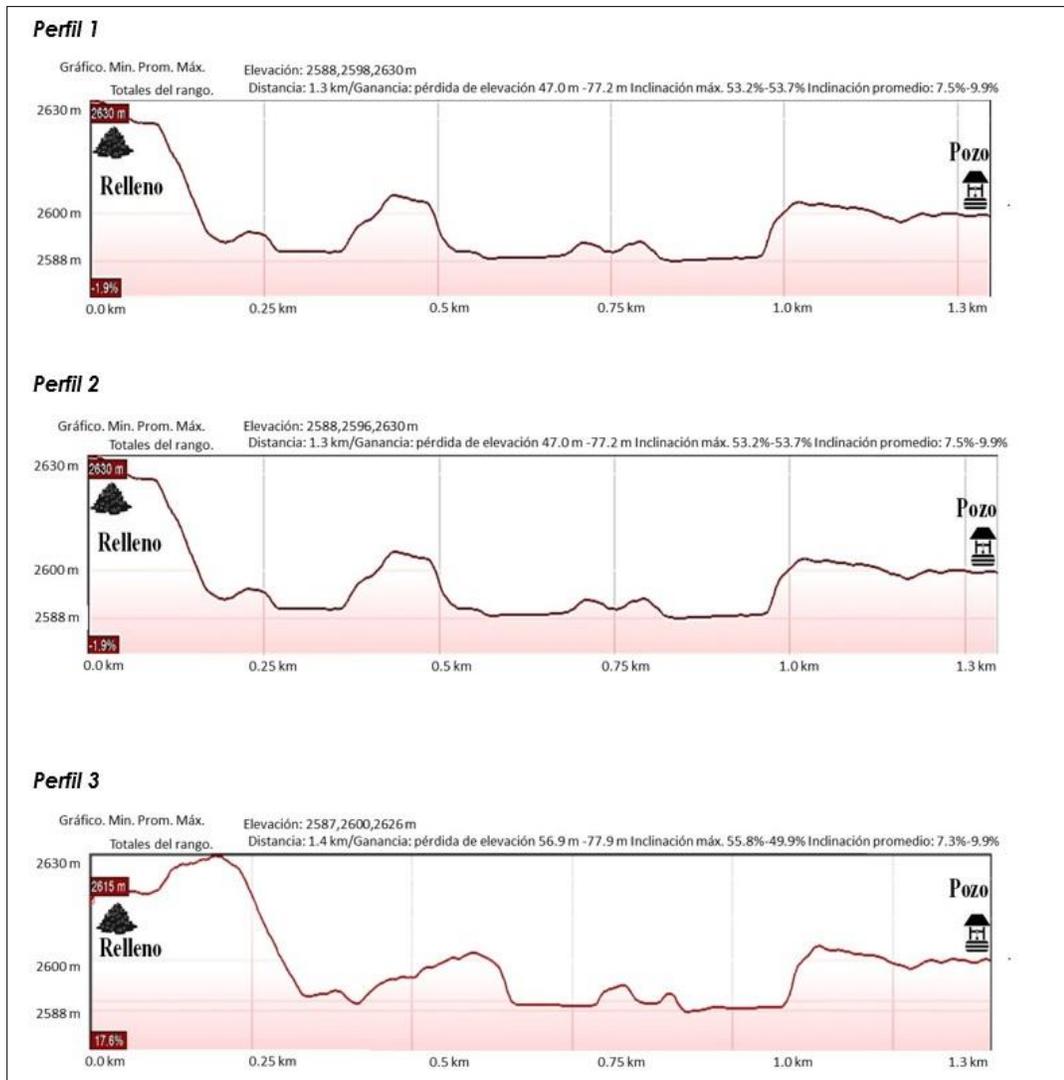


Figura 2. Perfiles de elevación entre la ubicación del relleno sanitario y el pozo de agua potable evaluado. Elaboración propia.

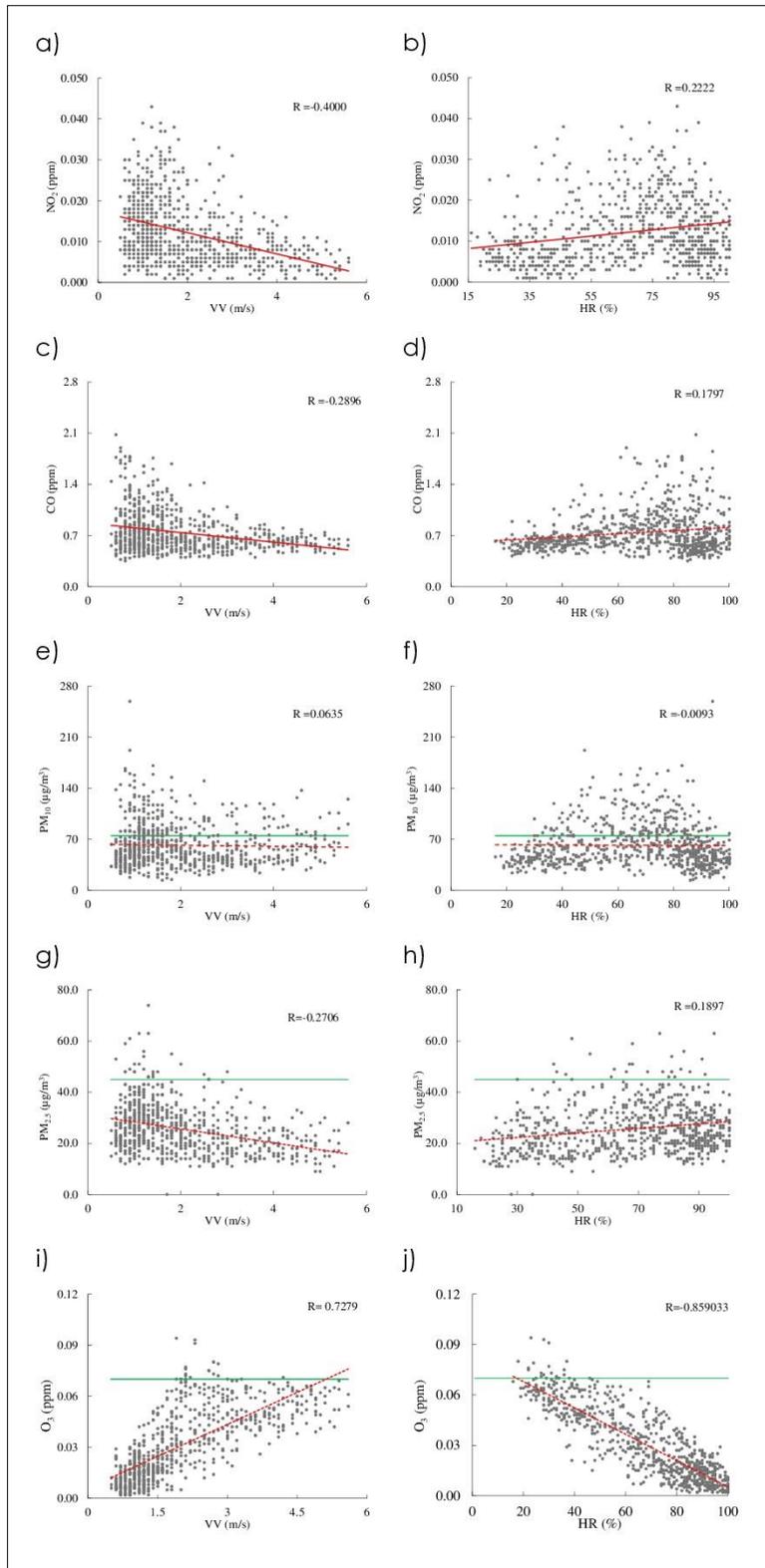
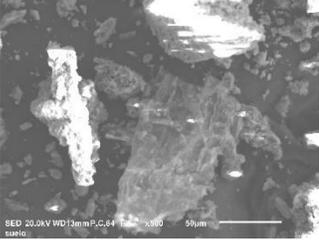
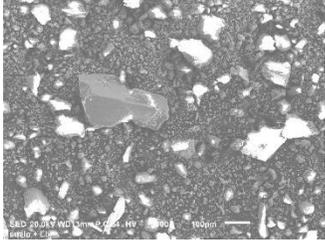


Figura 3. Correlación entre contaminantes en el aire y el efecto de las condiciones ambientales velocidad del viento (VV) y la humedad relativa (HR), -regresión lineal, - límite máximo Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021 (Secretaría de Salud, 2 de mayo de 2022).  
Elaboración propia.

Tabla 4  
*Análisis elemental del suelo limpio y suelo del relleno sanitario*

Elemento	Suelo limpio		Suelo contaminado	
	MEB y EDS (%)	ICP (mg/l)	MEB y EDS (%)	ICP (mg/l)
				
C	32.23	ND	0	ND
O	47.96	ND	52	ND
S	ND	1.8835	ND	11.044
Mg	ND	19.12	0.445	31.0678
Al	6.57	114.5733	9.855	292.0047
Si	14.49	95.2163	25.945	98.6392
Ca	3.00	41.78	2.74	121.24
Fe	2.26	91.4412	3.315	180.8314
Na	ND	32.96	3.495	9.1581
Sn	ND	ND	<0.001	ND
K	ND	26.91	<0.001	29.8961
Cd	ND	0.0043	1.86	0.0106
Au	ND	ND	0.17	ND
Pb	ND	ND	<0.001	0.2940
As	ND	ND	<0.001	ND
Mo	ND	ND	<0.001	ND
Ag	ND	ND	<0.001	ND
Cr	ND	0.2727	<0.001	0.4789
Cu	ND	0.1496	0.03	0.3923
Zn	ND	0.8714	0.14	2.5953
Pd	ND	ND	0.06	ND
Co	ND	0.0389	0.11	0.1363
Sb	ND	ND	0.18	ND
Mn	ND	1.9804	ND	7.6738
Ni	ND	0.1131	ND	0.2657
V	ND	0.2855	ND	0.4618
Li	ND	0.1093	ND	0.2054
Be	ND	0.0122	ND	0.0233
B	ND	0.1688	ND	0.3225
Ba	ND	0.6355	ND	1.5568
P	ND	9.5659	ND	45.8971
Sr	ND	0.3073	ND	0.4213

Nota: Elaboración propia.

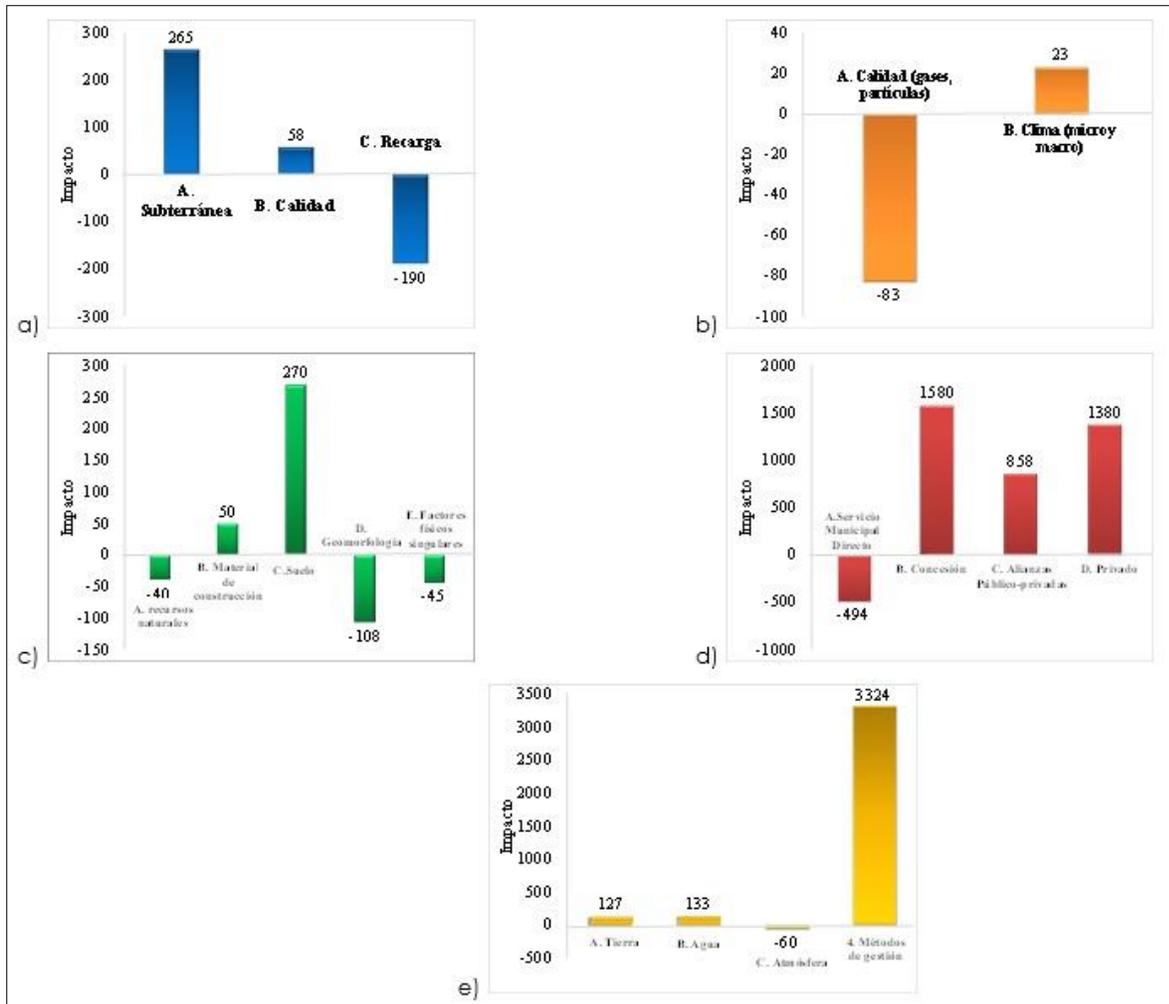


Figura 4. Impactos en la calidad del a) agua, b) aire, c) suelo, d) método de gestión y e) comparativo de los RSU a través de la matriz causa-efecto. Elaboración propia.

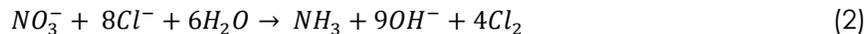
## DISCUSIÓN

### Lixiviados y su impacto ambiental

Los resultados de la caracterización de los lixiviados (tabla 2) indican altos valores de DBO 1,634.25 mg/l O<sub>2</sub>; DQO 8912.50 mg/l O<sub>2</sub>, relación DBO/DQO de 0.18 y pH 8.3, una alta carga de compuestos orgánicos, característicos de los lixiviados maduros de vertederos antiguos (Tejera et al., 2021; Wijekoon et al., 2022; Yu et al., 2017). Se observó una concentración significativa de 2,892.50 mg/l N-NH<sub>3</sub> 33.75 mg/l N-NO<sub>3</sub>; 3,625 mg/l N-Tot, estas concentraciones a lixiviados de 3-8 años, ya que la biodegradación se produce rápidamente (Przydatek & Kanownik, 2019). La concentración de 4,646.79 mg/l Cl<sup>-</sup>, representa alta salinidad y riesgo potencial de infiltración hacia el agua subterránea debido a su movilidad (Ali & Ahmad, 2020). Concentraciones moderadas de Cd, Cr, Mn, Ni, Al, B, Sr, Zn, Fe y en concentraciones más elevadas Na, K, S, Ca, P, Mg y Si. La contaminación con metales pesados es uno de los problemas más importantes que afectan al ambiente, por su toxicidad y los daños que provocan en la salud humana. Debido a su naturaleza química, éstos permanecen en el ambiente, acumulándose como iones o como metalo-compuestos en los organismos por largos periodos (Rodríguez & Al, 2020).

### Contaminación e impacto en el agua de uso y consumo

La muestra de agua del pozo más cercano al RS (Parque Industrial) (tabla 3) presentó una acidez de 3.68 mg/l CaCO<sub>3</sub>, un pH de 7.0, y alcalinidad de 54.90 mg/l CaCO<sub>3</sub>, que corresponde a iones HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, una baja concentración de iones Cl<sup>-</sup> (19.33 mg/l), que puede deberse al efecto de la materia nitrogenada (6.36 mg/l NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y pH neutro (7.0), que favorecen la formación de Cl<sub>2</sub> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, lo que explica que en el agua de pozos se ha detectado Cl<sub>2</sub> residual antes del proceso de cloración en la época de recarga (noviembre y diciembre), lo que indica la afectación del agua por la presencia nitrogenada (ecuación 2) procedente de los lixiviados del RS.



La DBO (4.45 mg/l O<sub>2</sub>) y la DQO (9.25 mg/l O<sub>2</sub>) demuestran la infiltración de los lixiviados procedentes del RS, con un índice de biodegradabilidad de 0.48. La presencia de turbidez (0.26 UTN) y color (1 U Pt-Co), aunque es bajo, es atípico del agua. La presencia de coliformes es de 20 UFC/100 ml, sobrepasa la NOM-127-SSA1-2021 (Secretaría de Salud, 22 de noviembre de 2000), lo que corrobora la infiltración de los lixiviados. Los resultados demostraron una permeabilidad de los lixiviados en agua y suelo con respecto a la materia orgánica y nitrogenada. La figura 2 muestra los perfiles de altitud entre el pozo evaluado y el RS, con una distancia promedio de 1.38 km y una diferencia de altitud entre 28 y 10 m, ubicando la disposición de los RSU a una mayor altura con respecto al pozo; lo que confirma su contaminación, debido a la cercanía y la diferencia de alturas que favorecen el flujo de los lixiviados en dirección al pozo (Parvin & Tareq, 2021).

### Contaminación del aire

La figura 3 presenta los resultados del análisis de regresión simple de los contaminantes con respecto a las condiciones ambientales de VV y HR, estas condiciones influyen en su disipación, se ha determinado que a mayores condiciones de turbulencia y menor humedad los contaminantes se dispersan con mayor rapidez (Ren et al., 2019). En las figuras 3 inciso a e inciso b se presentan las concentraciones de NO<sub>2</sub> con respecto a la VV y HR, que disminuyen cuando aumenta la VV y es mayor al incrementar la HR, los valores de los coeficientes fueron R= -0.4000 y R= 0.2222, respectivamente; el ANOVA indica una relación estadísticamente significativa entre la concentración del NO<sub>2</sub> y los parámetros ambientales (p= 0.000).

La figura 3 incisos c y d muestra las concentraciones de CO, su disipación aumenta al incrementar la VV, por lo que esta condición meteorológica favorece su dispersión. Por otra parte, la HR favorece la concentración de este contaminante (figura 3 inciso d) (Ren et al., 2019; Tavella et al., 2022). Las partículas PM<sub>10</sub> se muestran en las figuras 3 incisos e, b, c d, e y f; el coeficiente de correlación indica una baja relación entre la VV vs. PM<sub>10</sub> y HR vs. PM<sub>10</sub> (R= -0.0635 y R= -0.0093, respectivamente), el ANOVA indica que no existe una relación estadísticamente significativa (p= 0.4034) entre las condiciones climáticas y las PM<sub>10</sub> que son partículas aerodinámicas con un diámetro de máximo 10 µm, formadas por sustancias orgánicas e inorgánicas que pueden tener un impacto en la salud en el sistema inmunológico; lo que puede generar asma, enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Biancofiore et al., 2017; Masseran & Safari, 2020), de acuerdo con el límite máximo permisible de la NOM-025-SSA1-2014 (75 µg/m<sup>3</sup>) (Secretaría de Salud, 20 de agosto de 2014) y al de la directiva del Parlamento Europeo (50 µg/m<sup>3</sup>) (Unión Europea, 2008); en diversos momentos estos valores fueron superados.

El RS se ubica cercano a una zona industrial, agrícola y de extracción de materiales pétreos para la construcción, lo que podría explicar las concentraciones de las PM<sub>10</sub>. Punsompong y Chantara (2018) indicaron que las zonas agrícolas pueden contribuir a las

concentraciones de las PM<sub>10</sub>, sobre todo en las temporadas de estiaje y quema de pastizales (Punsompong & Chantara, 2018). Las elevadas concentraciones de PM<sub>10</sub> pueden también ser el resultado de una meteorología desfavorable (Biancofiore et al., 2017). La remoción podría ser favorecida a flujos turbulentos de aire (Ren et al., 2019); durante el periodo de análisis no se presentaron precipitaciones, por lo que podrían permanecer hasta la temporada de lluvias.

Las figuras 3 incisos g y h presentan las concentraciones de las partículas PM<sub>2.5</sub> y sus correlaciones con las condiciones meteorológicas es baja (-0.2706 y 0.1897), lo que indica una correlación relativamente débil; el ANOVA indica una relación estadísticamente significativa ( $p=0.0000$ ); al incrementar la VV la concentración de partículas disminuye y es mayor con el incremento de la HR. Las PM<sub>2.5</sub> son partículas primarias y secundarias como sulfato, nitrato, amonio, carbono orgánico, carbono elemental (Ma et al., 2019), debido a que estas disminuyen al aumentar la VV, es posible que las PM<sub>2.5</sub> estén relacionadas con el NO<sub>2</sub>, por lo que el coeficiente de correlación fue evaluado indicando una relación relativamente débil entre las PM<sub>2.5</sub> y la concentración de NO<sub>2</sub>; el ANOVA indicó una relación estadísticamente significativa ( $p=0.000$ ). Los valores superiores límite máximo establecidos por la NOM-025-SSA1-2014 de 45 µg/m<sup>3</sup> (Secretaría de Salud, 20 de agosto de 2014) y la directiva del Parlamento Europeo 2008/50/CE indica un valor máximo de 25 µg/m<sup>3</sup>.

Los coeficientes de correlación entre las concentraciones de O<sub>3</sub> y las condiciones climáticas (VV y HR) tienen una correlación moderadamente fuerte (figura 3 incisos i a j); al aumentar la VV el O<sub>3</sub> incrementa y al aumentar la HR la concentración disminuye. El O<sub>3</sub> en la atmósfera está estrechamente relacionado con las condiciones climáticas que pueden contribuir a disipar o incrementar sus valores. El límite de acuerdo con la NOM-020-SSA1-2014 (Secretaría de Salud, 19 de agosto de 2014) es 0.07 ppm y 0.06 ppm conforme a la directiva del Parlamento Europeo 2008/50/CE (Unión Europea, 2008).

### **Contaminación del suelo**

La tabla 4 muestra la composición del suelo limpio donde se observa alto porcentaje de C (32.23%) y O (47.96%), de la materia orgánica y minerales como Al, Si, Ca, y Fe. El suelo contaminado carece de C, lo que indica un suelo mineralizado con mayor concentración de O (52%), Si (25.95%), Al (9.86%) y Fe (3.32%). Los metales en menor concentración son Na, Cd, Au, Zn, Co, Cu y se identifican por ICP trazas de elementos como Al (292.0047 mg/l), Fe (180.8314 mg/l), Ca (121.24 mg/l), P (45.8971 mg/l), K (29.8961 mg/l), Mg (31.0678 mg/l), S (11.044 mg/l), Na (9.1581 mg/l), Zn (2.5953 mg/l), Ba (1.5568) y metales pesados Cr (0.4789 mg/l), V (0.4618), Cu (0.3923 mg/l), Pb (0.2940 mg/l), Ni (0.2657 mg/l) y Co (0.1363 mg/l), lo que demuestra que estos elementos se quedan retenidos en el suelo y/o probablemente se intercambien por Na (32.96 mg/l), cuya concentración inicial en el suelo limpio es mayor que en el suelo contaminado, lo que impide que las especies tóxicas migren. La morfología y el análisis MEB del suelo limpio indica presencia de partículas sólidas definidas y de mayor tamaño; mientras que el suelo contaminado contiene mayor mineralización, de estructura más particulada y fina que permite la retención de metales pesados provenientes de los lixiviados.

### **Matriz causa-efecto**

Con la matriz de Leopold se evaluó cualitativa y cuantitativamente las características físicas y químicas del agua, suelo y aire; así como la aplicación del método de gestión integral utilizado (ver anexo). En la figura 4 inciso a se muestra el principal efecto negativo en la recarga del agua subterránea debido al proceso de extracción (10.6 l/s) en el pozo y abastecimiento de la zona (-190). Aunque en la caracterización fisicoquímica del agua presenta cambios significativos debido a la incorporación de materia orgánica (DQO y DBO) y nutrientes (P y N), estos no se reflejan en la matriz causa-efecto debido a que estos parámetros generalmente no se determinan en agua de consumo; además de que la NOM-127-SSA1-2021 Agua Para Uso y Consumo Humano. Límites Permisibles De La Calidad Del Agua (Secretaría de Salud, 6 de diciembre de 2019; 22 de

noviembre de 2000; 2 de mayo de 2022) no considera los parámetros orgánicos. Ma et al. (2022) encontraron concentraciones de DQO, N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, metales pesados, (Mn, Cd, Ni) y el metaloide As en agua del pozo cercano al RS. En la figura 4 inciso b se muestra el principal efecto en el aire a causa de gases y partículas (-86) asociados al relleno sanitario, la descomposición de la materia orgánica y la extracción de materiales de construcción en la zona. Además, en el RS se carece de la captación y aprovechamiento energético del biogás y existe poca vegetación y reforestación en el área. En la figura 4 inciso c se muestra el mayor impacto asociado a la geomorfología (-108), a los factores físicos singulares (-45), materiales de construcción y recursos minerales (-40) debido a la alteración de la cubierta terrestre, excavación en el sitio, extracción de materiales pétreos para construcción; así como el uso del suelo para disposición final RSU; adicionalmente es una zona agrícola con impacto por el uso de plaguicidas y fertilizantes químicos, con alto crecimiento y desarrollo habitacional. La muestra de suelo más cercano al RS está contaminada en comparación con las muestras de suelo más alejadas debido al alto contenido de materia orgánica y metales pesados (Ingle, 2022). El lixiviado contiene la mayor concentración de metales pesados, DBO y DQO; si se permite que el lixiviado drene hacia las aguas superficiales o se infiltre en las aguas subterráneas puede provocar efectos adversos en la salud humana y el ambiente. En la figura 4 inciso d se muestran los impactos del método de gestión, siendo el de mayor efecto negativo el servicio municipal directo (-969) debido a que se carece de una gestión adecuada de los RSU desde la recolección, almacenamiento y manejo; así como a una limitada capacidad de inversión municipal y falta de seguimiento de políticas públicas para el manejo de RSU. La concesión es el sistema de gestión de mayor impacto positivo (1580) debido a que la ejecución de este sistema presenta mejor organización, manejo de los RSU y calidad del servicio. En la figura 4 inciso e se muestra los efectos sobre las distintas esferas ambientales: atmósfera (-60), suelo (62), agua (128) y métodos de gestión (2844). La atmósfera es la que mayor impacto recibe debido a gases y partículas emitidas por la descomposición de materia orgánica en el RS; además fuentes externas al RS como extracción de materiales pétreos para la construcción, la zona agrícola donde se usan plaguicidas y los desarrollos habitacionales incrementan el impacto sobre la atmósfera.

### **Estrategias de mitigación**

Los resultados indican que deben proponerse estrategias de mitigación como la separación en origen y el tratamiento centralizado para mejorar la gestión integral de los residuos; de modo que los responsables y generadores puedan identificar las medidas más adecuadas para el tratamiento de los RSU (Sun et al., 2018). Diversos estudios se basan en la metodología de evaluación del ciclo de vida (ECV), que permite una evaluación holística de los posibles impactos ambientales. Los estudios de ECV presentan grandes diferencias como la composición de los residuos, el desarrollo tecnológico, el sistema energético local, las condiciones climáticas, las elecciones metodológicas, las políticas públicas; por lo que es recomendable evaluar el impacto del manejo de los RSU (Istrate et al., 2020).

Deus, Mele, Bezerra y Battistelle (2020) informaron que en los próximos 30 años el aumento de la población, la rápida urbanización y el crecimiento económico pueden aumentar los RSU mundiales en 70%, llegando a 3,4 mil millones de toneladas anualmente. Además, la heterogeneidad en su composición y los complejos procesos de gestión y recuperación han limitado el rendimiento del tratamiento tradicional. Es urgente innovar la gestión de los residuos hacia modos más eficientes (Lin et al., 2022). La gestión de los RSU requiere de la cooperación de partes interesadas y un amplio plan de acción en términos de objetivos y políticas de sostenibilidad (Batista et al., 2021). Otra medida de mitigación es identificar las ubicaciones más adecuadas para los RS y considerar los factores ambientales cuando el RS pueda tener un efecto adverso en el agua, suelo y aire de la zona circundante (Chabuk et al., 2017). Proporcionar acceso a servicios de RSU adecuados, seguros y asequibles, evitar los sitios a cielo abierto, y la quema incontrolada de RSU son objetivos estratégicos internacionales del desarrollo sostenible (ODS) que en 2015 establecieron las Naciones Unidas (Reyna-Bensusan et al., 2018). Otra

estrategia es tomar en consideración las características fisicoquímicas del lixiviado para comprender los mecanismos de contaminación del agua subterránea; así como los factores intrínsecos de los acuíferos, incluidas características geológicas e hidráulicas y los tipos de uso del suelo y generación de residuos capaces de provocar cambios químicos en el agua (Peixoto, 2020). Es también pertinente la consulta de la Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996 (SEMARNAT, 6 de enero de 1997).

### **Perspectivas a futuro**

Hoy en día existen desafíos y oportunidades en el tratamiento de lixiviados. Se produce una mayor cantidad de lixiviados a partir de vertederos no diseñados, lo que requiere un costo inicial más alto y procesos técnicos para manejarlos de manera ambientalmente segura y técnicamente sólida. La necesidad de espacios es otra limitación para establecer los vertederos avanzados que pueden ayudar a controlar la generación de lixiviados. La concentración de lixiviados puede ser variada, por lo que debe caracterizarse en consecuencia, de modo que se puedan aplicar métodos adecuados para tratar y recuperar la energía y los recursos. Existe la necesidad de un sistema integrado de procesos porque un método particular no puede tratar los lixiviados debido a la variabilidad de las características. Como tratamientos biológicos se pueden utilizar para biotransformar la materia orgánica en energía y otros productos químicos. Sin embargo, una mayor fracción de metales pesados no se recupera con estos métodos. Además, otras técnicas físicas y químicas no son apropiadas para lixiviados más jóvenes que tienen mayor contenido de materia orgánica.

Otros métodos, como la extracción de metales, la generación de energía a partir de la digestión anaeróbica y las pilas de combustible microbianas han despertado mucho interés entre los investigadores porque pueden tratar eficazmente los lixiviados de alta persistencia. Sin embargo, estos métodos requieren mucho trabajo de investigación para optimizar los parámetros del proceso para lograr resultados óptimos. Las perspectivas a futuro de la gestión de los lixiviados pueden aumentar debido a que la acumulación de RSU aumenta día a día debido al crecimiento exponencial de la población. Además, es necesario establecer los objetivos estratégicos que deben ser fijados por el gobierno y otros financiadores. Hay una falta de investigación para evaluar los materiales tóxicos presentes en los lixiviados; también de estudios de análisis de ciclo de vida y análisis tecno-económico de procesos integrados que deben explorarse antes de su implementación a nivel industrial y del establecimiento de políticas públicas (Upadhyay et al., 2023).

### **CONCLUSIONES**

Los lixiviados presentan valores de DBO 1,634.25 mg/l O<sub>2</sub>; DQO 8912.50 mg/l O<sub>2</sub>, con una relación DBO/DQO de 0.18, que señalan alta carga de compuestos orgánicos de elevado peso molecular, característicos de los lixiviados maduros y por ICP se detectan metales pesados. Se presentó una concentración significativa de nitrógeno amoniacal 2,892.50 mg/l N-NH<sub>3</sub>; nitratos 33.75 mg/l N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y nitrógeno total 3,625 mg/l N-Tot. La concentración de 4,646.79 mg/l Cl<sup>-</sup> puede representar fuerte contaminación y ser indicativo de una infiltración reciente de lixiviados en las aguas subterráneas, debido a que se encontró DQO, DBO, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> principalmente en la época de recarga.

En el suelo se encuentran concentraciones de metales (Cd, Au, Zn, Cu, Pd, Co) y se identificaron trazas de Sn, K, Pb, Mo, Ag, Cr y As que posiblemente estén retenidos, lo que evitaría su migración hacia el agua subterránea. La calidad del aire de la zona de acuerdo con la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> y las condiciones del clima se encuentran dentro de los límites permisibles, ya que el RS se localiza en una zona abierta y la velocidad del viento favorece su dispersión.

De acuerdo con la matriz causa-efecto el método de gestión, la concesión y el privado son los de mayor impacto positivo en la gestión de RSU debido a que en la ejecución y resultados de este sistema intervienen empresas especializadas con personal capacitado, equipo, maquinaria adecuada y calidad en el servicio que permitan mitigar los impactos ambientales. Deben atenderse diversas recomendaciones desde el origen de los RSU, la separación, el tratamiento y disposición final e identificar las medidas más adecuadas para prevenir impactos en la salud por la contaminación en suelo, aire y agua.

### Agradecimientos

Este proyecto fue financiado por el Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (Comecyt) con No. de proyecto 185, clave interna (UAEMex) 6424/2021E. Los autores desean agradecer al Conacyt por la beca otorgada CVU No. 1081590 y CVU No. 266124, así como al Centro de Geociencias, laboratorio de Geoquímica Ambiental (UNAM) por el apoyo en el análisis por ICP de las muestras de lixiviado, agua y suelo.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses al respecto.

### REFERENCIAS

- Ali, S. A., & Ahmad, A. (2020). Suitability analysis for municipal landfill site selection using fuzzy analytic hierarchy process and geospatial technique. *Environmental Earth Sciences*, 79(10), 227. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08970-z>
- Araiza Aguilar, J. A., Nájera Aguilar, H. A., Gutiérrez Hernandez, R. F., & Rojas Valencia, M. N. (2018). Emplacement of solid waste management infrastructure for the Frailesca Region, Chiapas, México, using GIS tools. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(3), 391–399. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2018.01.004>
- Ayeleru, O. O., Okonta, F. N., & Ntuli, F. (2021). Cost benefit analysis of a municipal solid waste recycling facility in Soweto, South Africa. *Waste Management*, 134(May 2020), 263–269. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.001>
- Ayuntamiento de San Antonio la Isla. (25 de mayo de 2022). Cédulas de Información Municipal. Municipio: San Antonio la Isla. <https://sanantoniolaisla.gob.mx/wp-content/uploads/2022/09/Cedula-Informativa-de-Zonificacion.pdf>
- Batista, M., Goyannes Gusmão Caiado, R., Gonçalves Quelhas, O. L., Brito Alves Lima, G., Leal Filho, W., & Rocha Yparraguirre, I. T. (2021). A framework for sustainable and integrated municipal solid waste management: Barriers and critical factors to developing countries. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127516. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127516>
- Biancofiore, F., Busilacchio, M., Verdecchia, M., Tomassetti, B., Aruffo, E., Bianco, S., ... Di Carlo, P. (2017). Recursive neural network model for analysis and forecast of PM10 and PM2.5. *Atmospheric Pollution Research*, 8(4), 652–659. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.12.014>
- Chabuk, A. J., Al-Ansari, N., Hussain, H. M., Knutsson, S., & Pusch, R. (2017). GIS-based assessment of combined AHP and SAW methods for selecting suitable sites for landfill in Al-Musayiab Qadhaa, Babylon, Iraq. *Environmental Earth Sciences*, 76(5), 209. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6524-x>
- Deus, R. M., Mele, F. D., Bezerra, B. S., & Battistelle, R. A. G. (2020). A municipal solid waste indicator for environmental impact: Assessment and identification of best management practices. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118433. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118433>
- Donevska, K., Jovanovski, J., & Gligorova, L. (2021). Comprehensive Review of the Landfill Site Selection Methodologies and Criteria. *Journal of the Indian Institute of Science*, 101(4), 509–521. <https://doi.org/10.1007/s41745-021-00228-2>

- Hsu, H.-P., Tsai, B.-W., & Chen, C.-M. (2018). Teaching Topographic Map Skills and Geomorphology Concepts with Google Earth in a One-Computer Classroom. *Journal of Geography*, 117(1), 29–39. <https://doi.org/10.1080/00221341.2017.1346138>
- Ingle, G. S. (2022). Study of soil properties affected by leachate – A case study at Urali-Devachi, Pune, India. *Materials Today: Proceedings*, 60, 588–594. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.118>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020a). Buscador [Base de datos]. <https://inegi.org.mx/app/buscador/default.html?q=Habitantes+en+Estado+de+México>
- \_\_\_\_\_ (2020b). Geografía y Medio Ambiente [Base de datos, consultada el 15 noviembre de 2023]. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- Istrate, I.-R., Iribarren, D., Gálvez-Martos, J.-L., & Dufour, J. (2020). Review of life-cycle environmental consequences of waste-to-energy solutions on the municipal solid waste management system. *Resources, Conservation and Recycling*, 157, 104778. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104778>
- Iván, V.-R., Melitón, E.-J., José, M.-R., & Agustina, O.-S. (2015). Potencial de generación de biogás y energía eléctrica. Parte II: residuos sólidos urbanos. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 16(3), 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.012>
- Lin, K., Zhao, Y., Kuo, J.-H., Deng, H., Cui, F., Zhang, Z., ... Wang, T. (2022). Toward smarter management and recovery of municipal solid waste: A critical review on deep learning approaches. *Journal of Cleaner Production*, 346, 130943. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130943>
- Ma, S., Zhou, C., Pan, J., Yang, G., Sun, C., Liu, Y., ... Zhao, Z. (2022). Leachate from municipal solid waste landfills in a global perspective: Characteristics, influential factors and environmental risks. *Journal of Cleaner Production*, 333, 130234. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130234>
- Ma, Z., Liu, R., Liu, Y., & Bi, J. (2019). Effects of air pollution control policies on PM2.5 pollution improvement in China from 2005 to 2017: a satellite-based perspective. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(10), 6861–6877. <https://doi.org/10.5194/acp-19-6861-2019>
- Maldonado M., J. I., Rodríguez-Chona, J. A., & Cajiao, A. M. (2017). Treatment landfill leachate in filters anaerobic upflow of two phases (DI – FAFS). *Revista Ingeniería UC*, 24(1), 91–104. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=70750544011>
- Masseran, N., & Safari, M. A. M. (2020). Modeling the transition behaviors of PM10 pollution index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192, 441(2020). <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08376-1>
- Parvin, F., & Tareq, S. M. (2021). Impact of landfill leachate contamination on surface and groundwater of Bangladesh: a systematic review and possible public health risks assessment. *Applied Water Science*, 11(6), 100. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01431-3>
- Peixoto, F. da S. (2020). Groundwater contamination risk in urban watershed. *Mercator*, 19(6), 1–17. <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19013>
- Przydatek, G., & Kanownik, W. (2019). Impact of small municipal solid waste landfill on groundwater quality. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(3), 169. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7279-5>
- Punsompong, P., & Chantara, S. (2018). Identification of potential sources of PM10 pollution from biomass burning in northern Thailand using statistical analysis of trajectories. *Atmospheric Pollution Research*, 9(6), 1038–1051. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.04.003>
- Rabby, Y. W., & Li, Y. (2019). An integrated approach to map landslides in Chittagong Hilly Areas, Bangladesh, using Google Earth and field mapping. *Landslides*, 16(3), 633–645. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1107-9>
- Raheison Semjen, C. (2020). Contaminación atmosférica y medioambiental y patología respiratoria. *EMC - Tratado de Medicina*, 24(3), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S1636-5410\(20\)44024-3](https://doi.org/10.1016/S1636-5410(20)44024-3)

- Ren, Y., Zhang, H., Wei, W., Cai, X., Song, Y., & Kang, L. (2019). A study on atmospheric turbulence structure and intermittency during heavy haze pollution in the Beijing area. *Science China Earth Sciences*, 62(12), 2058–2068. <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9451-0>
- Reyna-Bensusan, N., Wilson, D. C., & Smith, S. R. (2018). Uncontrolled burning of solid waste by households in Mexico is a significant contributor to climate change in the country. *Environmental Research*, 163, 280–288. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2018.01.042>
- Rezaeisabzevar, Y., Bazargan, A., & Zohourian, B. (2020). Landfill site selection using multi criteria decision making: Influential factors for comparing locations. *Journal of Environmental Sciences*, 93, 170–184. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.02.030>
- Rodrigo-Illari, J., Rodrigo-Clavero, M.-E., & Cassiraga, E. (2020). BIOLEACH: A New Decision Support Model for the Real-Time Management of Municipal Solid Waste Bioreactor Landfills. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(5), 1675. <https://doi.org/10.3390/ijerph17051675>
- Rodríguez, O., & Al, E. (2020). Remoción de cobre de aguas contaminadas empleando ramnolípodos. *Revista Cubana Química*, 32(3), 511–526. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443565548010>
- Rueda, I. R., Gómez, A., García, J. A., & López, G. (2020). Efectos de contaminantes en suelo por un vertedero a cielo abierto en Tabasco. *Journal of Energy, Engineering Optimization and Sustainability*, 4(1), 1–18. <https://doi.org/https://doi.org/10.19136/jeeos.a4n1.3473>
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca. (6 de enero de 1997). Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996, Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales. *Diario Oficial de la Federación*. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=4863829&fecha=06/01/1997#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4863829&fecha=06/01/1997#gsc.tab=0)
- Secretaría de Salud. (19 de agosto de 2014). Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O<sub>3</sub>) en el aire ambiente y criterios para su evaluación. *Diario Oficial de la Federación*. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5356801&fecha=19/08/2014#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5356801&fecha=19/08/2014#gsc.tab=0)
- \_\_\_\_\_ (20 de agosto de 2014). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente y criterios para su evaluación. *Diario Oficial de la Federación*. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014#gsc.tab=0)
- \_\_\_\_\_ (6 de diciembre de 2019). Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-127-SSA1-2017, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. *Diario Oficial de la Federación*. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5581179&fecha=06/12/2019#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5581179&fecha=06/12/2019#gsc.tab=0)
- \_\_\_\_\_ (22 de noviembre de 2000). Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación*. [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=2063863&fecha=22/11/2000#gsc.tab=0](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2063863&fecha=22/11/2000#gsc.tab=0)
- \_\_\_\_\_ (2 de mayo de 2022). Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021, Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua. *Diario Oficial de la Federación*. [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5650705&fecha=02/05/2022#gsc.tab=0)
- Sun, L., Fujii, M., Tasaki, T., Dong, H., & Ohnishi, S. (2018). Improving waste to energy rate by promoting an integrated municipal solid-waste management system. *Resources, Conservation and Recycling*, 136, 289–296. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.005>
- Tavella, R. A., Fernandes, C. L. F., Penteado, J. O., De Lima Brum, R., Florencio Ramires, P., Coutelle Honscha, L., ... Da Silva Júnior, F. M. R. (2022). Unexpected reduction in ozone levels in a mid-size city during COVID-19 lockdown. *International Journal of Environmental Health Research*, 32(8), 1801–1814. <https://doi.org/10.1080/09603123.2021.1917526>
- Tejera, J., Hermosilla, D., Gascó, A., Miranda, R., Alonso, V., Negro, C., & Blanco, Á. (2021). Treatment of mature landfill leachate by electrocoagulation followed by Fenton or UVA-LED

photo-Fenton processes. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 119, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.02.018>

- Unión Europea (2008). Directiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 21 de mayo de 2008 relativa a la calidad del aire ambiente y a una atmósfera más limpia en Europa. *Diario Oficial de la Unión Europea*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32008L0050>
- Upadhyay, A., Singh, R., Talwar, P., Verma, N., Ahire, P. D., Khatri, H., ... Vivekanand, V. (2023). Insights into sustainable resource and energy recovery from leachate towards emission mitigation for environmental management: A critical approach. *Journal of Environmental Management*, 343, 118219. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118219>
- Wijekoon, P., Koliyabandara, P. A., Cooray, A. T., Lam, S. S., Athapattu, B. C. L., & Vithanage, M. (2022). Progress and prospects in mitigation of landfill leachate pollution: Risk, pollution potential, treatment and challenges. *Journal of Hazardous Materials*, 421 (February 2021), 126627. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126627>
- Yu, L., Zhou, H., Sun, J., Qin, F., Yu, F., Bao, J., ... Ren, Z. (2017). Cu nanowires shelled with NiFe layered double hydroxide nanosheets as bifunctional electrocatalysts for overall water splitting. *Energy & Environmental Science*, 10(8), 1820–1827. <https://doi.org/10.1039/C7EE01571B>

