



ARTICULO ORIGINAL

Aplicación del Leachate Pollution Index (LPI) para evaluar la contaminación por lixiviados en rellenos sanitarios: revisión sistemática

Application of the Leachate Pollution Index (LPI) for assessing landfill leachate contamination: a systematic review

Betsabe Angela Chuqui Pizarro ^{1*} 

RESUMEN

Se realizó una revisión sistemática para sintetizar la evidencia científica sobre la aplicación del Índice de Contaminación por Lixiviados (Leachate Pollution Index, LPI) en sitios de disposición final. El objetivo fue identificar los contaminantes más reportados, comparar la variabilidad del índice entre países y resumir los principales hallazgos sobre impactos ambientales y tratamiento. La búsqueda bibliográfica se realizó en Scopus, ScienceDirect y PubMed, considerando publicaciones en español e inglés del periodo 2016–2026. Los estudios que reportaron valores numéricos evidenciaron una amplia variación, entre 3 y 88.8, relacionada con diferencias en las condiciones operativas, la composición de los residuos, la antigüedad del sitio y la presencia de tratamiento. En conjunto, el LPI se confirmó como una herramienta útil para integrar y comparar el potencial contaminante de los lixiviados, aunque la heterogeneidad metodológica limita la comparabilidad entre estudios.

Palabras clave: Agua subterránea, contaminación del agua, evaluación del riesgo, gestión de residuos, metales pesados.

ABSTRACT

A systematic review was conducted to synthesize the scientific evidence on the application of the Leachate Pollution Index (LPI) at final disposal sites. The aim was to identify the most frequently reported contaminants, compare the variability of the index across countries, and summarize the main findings related to environmental impacts and treatment. The literature search was carried out in Scopus, ScienceDirect, and PubMed, considering publications in Spanish and English from the period 2016–2026....8, related to differences in operating conditions, waste composition, site age, and the presence of treatment. Overall, the LPI was confirmed as a useful tool for integrating and comparing the pollution potential of leachates, although methodological heterogeneity limits comparability across studies.

Keywords: Groundwater, water pollution, risk assessment, waste management, heavy metals.

¹ Universidad Nacional
Intercultural de la Selva
Central Juan Santos
Atahualpa, Pichanaqui,
Chanchamayo.

*Autor de correspondencia.
E-mail:
73135231@uniscjsa.edu.pe

Recibido: 30 de mayo de 2026
Aprobado: 20 de junio de 2026
Publicado: 30 de julio de 2026

Para citar este artículo:

Chuqui Pizarro, B. A. (2026). Aplicación del Leachate Pollution Index (LPI) para evaluar la contaminación por lixiviados en rellenos sanitarios: revisión sistemática. Yotantsipanko 6(1), 70–87. <https://doi.org/10.54288/yotantsipanko.v6i1.70>



Introducción

La contaminación por lixiviados en rellenos sanitarios representa un desafío ambiental crítico a nivel mundial, ya que estos efluentes generados por la descomposición de residuos sólidos urbanos percolan a través del suelo y contaminan cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Carbonel & Carbonel, 2024). Entre sus componentes más nocivos destacan metales pesados (plomo, cadmio, mercurio), compuestos orgánicos persistentes como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP; PAHs) y los bifenilos policlorados (PCB; PCBs), nutrientes (nitrógeno y fósforo) e iones (cloruros, sulfatos), los cuales alteran la calidad del agua y generan riesgos graves para la salud humana, incluyendo cáncer, daños neurológicos y trastornos reproductivos (García et al., 2022). En particular, el plomo y el cadmio destacan por su toxicidad crónica y bioacumulación en la cadena alimentaria, exacerbando la mortalidad en comunidades cercanas a vertederos mal gestionados (Tejada-Purizaca et al., 2024). Sin embargo, muchos rellenos sanitarios carecen de sistemas de monitoreo continuo, lo que limita la detección temprana de su potencial contaminante.

Con el fin de evaluar el potencial contaminante de los lixiviados de manera integral, Kumar & Alappat (2005) desarrollaron el Índice de Contaminación por Lixiviados (Leachate Pollution Index, LPI), una herramienta que

integra múltiples parámetros fisicoquímicos en un único valor representativo del nivel de riesgo ambiental. Este índice permite comparar el grado de contaminación entre diferentes rellenos sanitarios, regiones geográficas y condiciones operativas, constituyéndose en un instrumento útil para la toma de decisiones en la gestión ambiental (Rodríguez-Cardenas et al., 2025).

En los últimos años, diversos estudios han aplicado el LPI para caracterizar lixiviados en distintos países, reportando variaciones significativas en función de factores como la edad del relleno, la composición de los residuos, el clima y la presencia de sistemas de tratamiento (Naveen et al., 2017; Chen et al., 2025; Rodríguez-Cárdenas et al., 2025).

Además, se han desarrollado síntesis y análisis de alcance global que resaltan la alta variabilidad de los lixiviados y la influencia de factores climáticos y operativos sobre contaminantes típicos como la demanda química de oxígeno (DQO), el nitrógeno amoniacal y metales pesados (Ma et al., 2022). En paralelo, estudios y revisiones recientes han utilizado el propio LPI para comparar potenciales contaminantes a nivel internacional y proponer clasificaciones del índice (Abunama et al., 2021).

En el contexto peruano, se ha aplicado el LPI en rellenos sanitarios de Lima (El Zapallal y Portillo Grande), mostrando su utilidad para describir la carga orgánica, el amonio y la condición de

estabilidad del lixiviado (Carbonel & Carbonel, 2024) así como en zonas altoandinas, donde se reporta evidencia relevante para monitoreo ambiental en condiciones climáticas particulares (Rodríguez-Cárdenas et al., 2025). Asimismo, se han propuesto actualizaciones metodológicas del índice, como el revised Leachate Pollution Index (r-LPI), con el objetivo de mejorar la robustez y la comparabilidad de la evaluación del potencial contaminante (Bisht et al., 2022).

A pesar de su utilidad, la aplicación del LPI sigue mostrando una evidencia dispersa y heterogénea, debido a las diferencias en los parámetros considerados, los métodos analíticos utilizados y las condiciones operativas propias de cada relleno sanitario. Esta situación dificulta la comparación entre estudios y limita una interpretación integrada de los resultados a nivel regional e internacional. Aunque existen revisiones generales sobre la calidad de los lixiviados y sus riesgos ambientales, no se identificó una síntesis sistemática reciente centrada específicamente en la aplicación del LPI y sus variantes metodológicas en rellenos sanitarios. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo analizar de manera sistemática la evidencia científica sobre la aplicación del Leachate Pollution Index (LPI) en lixiviados de rellenos sanitarios, identificando los contaminantes predominantes, los rangos del índice reportados, los principales impactos ambientales asociados y los enfoques de tratamiento descritos en la literatura.

Materiales y métodos

Se realizó una revisión sistemática sobre la aplicación del Leachate Pollution Index (LPI) en lixiviados de rellenos sanitarios. El reporte se elaboró conforme a PRISMA 2020 (Page et al., 2021).

Estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se realizó en Scopus, ScienceDirect y PubMed, considerando publicaciones en español e inglés correspondientes al periodo 2016 al 2026. Para ello, se emplearon términos relacionados con el Leachate Pollution Index (LPI), sus variantes metodológicas y los lixiviados de rellenos sanitarios. Los términos se combinaron mediante operadores booleanos AND y OR, utilizando comillas para frases exactas cuando fue necesario. En Scopus, la búsqueda se aplicó en título, resumen y palabras clave mediante el campo TITLE-ABS-KEY, mientras que en ScienceDirect y PubMed se utilizaron los campos equivalentes disponibles en cada plataforma. Las ecuaciones de búsqueda finales se presentan en la tabla 1 con el fin de garantizar la reproducibilidad del proceso.

Tabla 1.

Ecuaciones de búsqueda finales

Base de datos	Ecuación
Scopus	TITLE-ABS-KEY(("leachate pollution index" OR LPI OR "revised leachate pollution index" OR r-LPI) AND (leachate OR "landfill leachate" OR lixiviado*) AND (landfill OR "sanitary landfill" OR "municipal solid waste" OR "relleno sanitario")
ScienceDirect	"leachate pollution index" AND leachate AND landfill
PubMed	Leachate Pollution Index

Criterios de elegibilidad

En la tabla 2 se presentan los criterios de inclusión y exclusión utilizados

Tabla 2.

Criterios de inclusión y exclusión

Inclusión	Exclusión
Artículos revisados por pares	Tesis, informes técnicos, editoriales, cartas, resúmenes sin texto completo
2016–2026	Antes de 2016
Español o inglés	Otro idioma
Estudios en rellenos sanitarios que evalúan lixiviados	Matrices no comparables o sitios no pertinentes al objetivo
Reportan LPI/r-LPI (o parámetros suficientes para sustentar el índice)	No calculan LPI/r-LPI o no reportan datos relacionados

Extracción de datos

Tabla 3.

Variables extraídas por estudio

Categoría	Variables
Identificación	Autor(es), año, país
Sitio	Tipo de relleno, edad (si reporta), clima (si reporta), tratamiento (sí/no)
Parámetros del lixiviado	pH, DQO/COD, DBO/BOD, NH ₄ ⁺ , metales pesados, cloruros, sulfatos (según reporte)
Índice	Valor LPI/r-LPI, parámetros usados y enfoque de cálculo
Resultados clave	Contaminantes dominantes, interpretación del potencial contaminante
Observaciones	Limitaciones metodológicas y comparabilidad

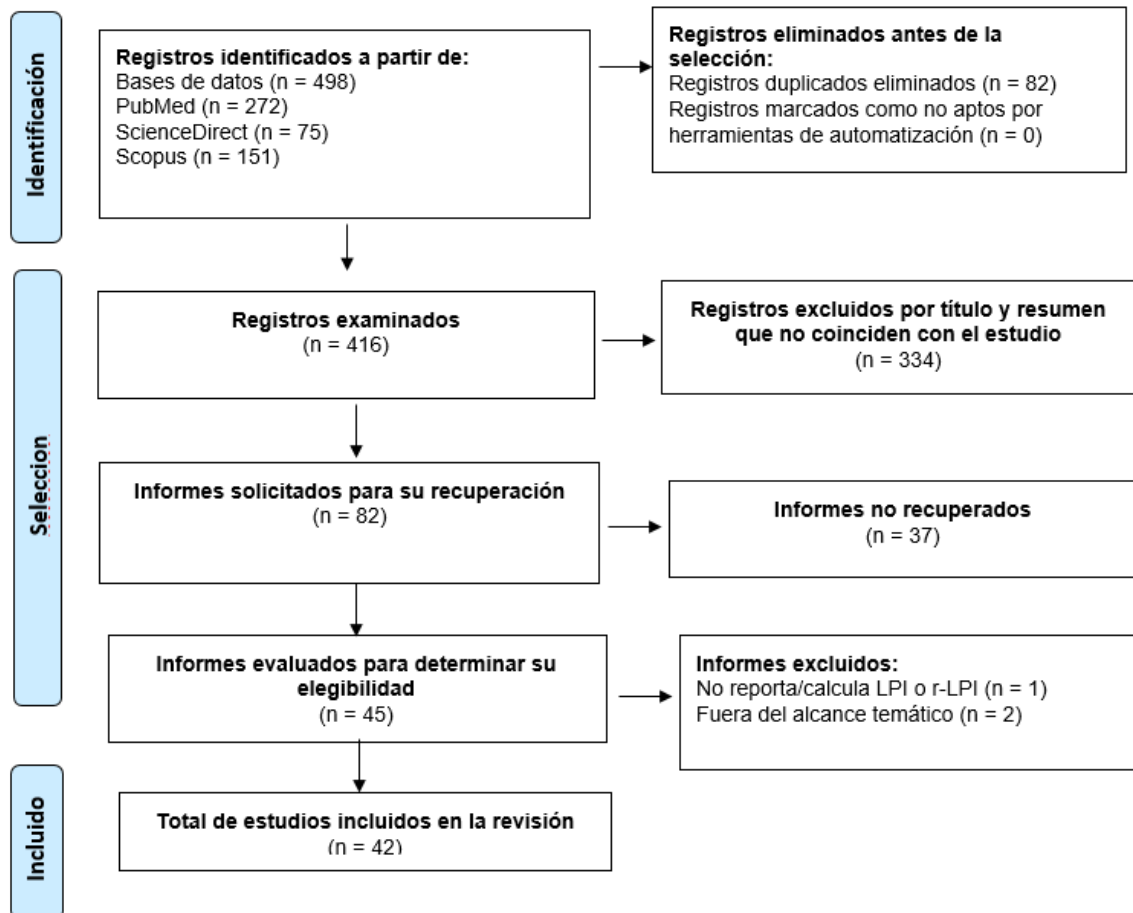
Resultados

Selección de estudios

El proceso de selección de estudios se resumió en la figura 1. Tras la depuración de duplicados y el cribado por título y resumen, se seleccionaron informes para evaluación a texto completo. Finalmente, 42 estudios cumplieron los criterios de elegibilidad y fueron incluidos en la síntesis cualitativa.

Figura 1

Diagrama de flujo PRISMA 2020 del proceso de selección de estudios.



Características generales de los estudios incluidos

Las características generales de los 42 estudios incluidos se presentaron según año, país o región y enfoque (caracterización/monitoreo, impacto o tratamiento). De estos, 30 estudios reportaron valores numéricos directos del índice de contaminación por lixiviados (LPI) y se resumieron en la tabla 4. En dicha tabla se consignaron el año, el país, el LPI y, cuando correspondió, el rango mínimo–máximo.

Tabla 4

Estudios incluidos que reportaron valores numéricos del índice de contaminación por lixiviados (LPI) y su síntesis

Nº	Año	País	LPI (resumen)	Rango	Enfoque
01	2017	Sri Lanka	18	5–18	Caracterización
02	2025	Irán	32.33		Impacto
03	2022	Zambia	30.17		Impacto
04	2020	India	29.2	25.4–29.2	Tratamiento
05	2022	Nigeria	19.66	18.84–19.66	Impacto
06	2026	Marruecos	80	10–80	Tratamiento
07	2018	India	16.81		Impacto
08	2023	India	18.39		Impacto
09	2024	Irán	30		Caracterización
10	2022	Omán	35.4	22.76–35.4	Caracterización
11	2024	Marruecos	88.8		Caracterización
12	2019	India (Coimbatore, Tamil Nadu)	18.03	1–18.03	Caracterización
13	2022	Irán (Tehran province)	36	25–36	Impacto
14	2018	India (Varanasi)	16.81	12.4–16.81	Caracterización
15	2016	India (Delhi)	48.39	42.85–48.39	Caracterización
16	2016	India (Kolkata)	34.02	31.8–34.02	Caracterización
17	2020	Sri Lanka	28.88		Tratamiento (tren híbrido)
18	2019	Greece (Thessaloniki)	49.66	1–49.66	Caracterización
19	2024	Irán (Shiraz)	81	7.22–81	Tratamiento
20	2020	Malaysia (Penang)	10.63	5.71–10.63	Caracterización
21	2016	India (Varanasi)	23.56		Impacto
22	2024	India (Mumbai)	23.52	20.41–23.52	Impacto
23	2024	India (Tamil Nadu)	35		Impacto
24	2024	Nigeria (Lagos)	3	1–3	Impacto
25	2025	Perú (Andahuaylas, Chincheros/Apurímac)	30.88	1–30.88	Caracterización
26	2022	Ethiopia (Arba Minch)	27.35	1–27.35	Impacto
27	2018	India (Tricity: Chandigarh, Mohali, Panchkula)	29.36	21.3–29.36	Impacto
28	2019	China (rural areas: Banqiao, Machen, Jiuduhe)	42	1–42	Caracterización
29	2016	Germany (survey 79 landfills)	20	13.8–20	Survey
30	2022	India (West Bengal, Baidyabati)	19.89	5.28–19.89	Tratamiento biológico + cinética

Nota. “LPI (resumen)” correspondió al valor máximo reportado por estudio; “Rango” indicó mínimo–máximo cuando se reportaron múltiples valores.

Fuente: Elaboración propia

Comparación de valores del LPI

Los valores numéricos directos del índice de contaminación por lixiviados (LPI) se presentaron en la tabla 4. Para comparar la variabilidad entre países, se calcularon los valores mínimo y máximo reportados por país a partir de los estudios con LPI numérico, y se resumieron en la tabla 5. Asimismo, la distribución del LPI (valor resumen) por región se presentó en la figura 2.

Tabla 5

Resumen comparativo de valores del LPI (mínimo–máximo) por país.

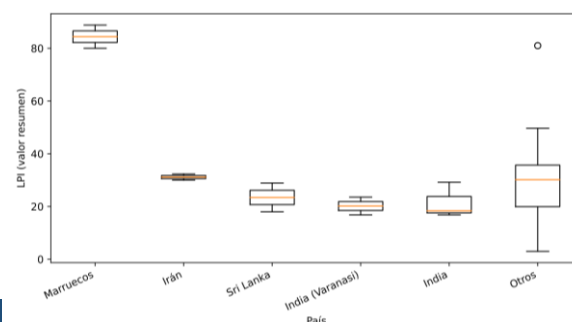
País	n	LPI_min	LPI_max
India	3	16.81	29.2
Marruecos	2	10	88.8
Irán	2	30	32.33
Sri Lanka	2	5	28.88
India (Varanasi)	2	12.4	23.56
Irán (Shiraz)	1	7.22	81
Greece (Thessaloniki)	1	1	49.66
India (Delhi)	1	42.85	48.39
China (rural areas: Banqiao, Machen, Jiuduhe)	1	1	42
Irán (Tehran province)	1	25	36
Omán	1	22.76	35.4
India (Tamil Nadu)	1	35	35
India (Kolkata)	1	31.8	34.02
Perú (Andahuaylas, Chincheros/Apurímac)	1	1	30.88
Zambia	1	30.17	30.17
India (Tricity: Chandigarh, Mohali, Panchkula)	1	21.3	29.36
Ethiopia (Arba Minch)	1	1	27.35
India (Mumbai)	1	20.41	23.52
Germany (survey 79 landfills)	1	13.8	20
India (West Bengal, Baidyabati)	1	5.28	19.89
Nigeria	1	18.84	19.66
India (Coimbatore, Tamil Nadu)	1	1	18.03
Malaysia (Penang)	1	5.71	10.63
Nigeria (Lagos)	1	1	3

Nota. n: número de estudios por país con LPI numérico; LPI_min y LPI_max corresponden a los valores mínimo y máximo reportados.

Fuente: Elaboración propia.

Figura 2

Distribución del LPI por país.



Parámetros reportados con mayor frecuencia en relación con el LPI

En los estudios incluidos se reportaron parámetros fisicoquímicos y contaminantes utilizados para caracterizar lixiviados y/o sustentar el cálculo del índice de contaminación por lixiviados (LPI). Los parámetros reportados con mayor frecuencia correspondieron a carga orgánica (DQO/COD y DBO/BOD), nitrógeno amoniacal ($\text{NH}_4^+/\text{NH}_3\text{-N}$), y, según el estudio, sólidos disueltos totales (TDS), cloruros, pH y metales pesados. Adicionalmente, en algunos estudios se consignó la medición de sulfatos, conductividad eléctrica (EC) y otros indicadores específicos. La frecuencia de reporte de estos parámetros clave se presentó en la tabla 6.

Tabla 6

Frecuencia de reporte de parámetros

Parámetro	n	%
DQO/COD	16	38.1
Metales pesados	8	19.0
DBO/BOD	6	14.3
TDS	6	14.3
pH	5	11.9
NH ₄ ⁺ /NH ₃ -N	4	9.5
Conductividad (EC)	2	4.8
AOX	1	2.4
Cl ⁻	1	2.4
Coliformes	1	2.4
Fenoles	1	2.4
SO ₄ ²⁻	1	2.4

Nota. Los conteos se basaron en el reporte explícito de parámetros en el texto y/o secciones de resultados de cada estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Estudios con evaluación de impacto ambiental (agua subterránea y/o superficial)

Un subconjunto de los estudios incluidos evaluó matrices ambientales asociadas al lixiviado, considerando agua subterránea y/o agua superficial. En estos estudios se reportaron índices y herramientas complementarias (por ejemplo, WQI, HPI/HMI, GIS y análisis multivariante como PCA/HCA). Los estudios con evaluación de impacto ambiental y las herramientas reportadas se resumieron en la tabla 7. La distribución de la matriz evaluada (subterránea, superficial o ambas) se presentó en la figura 4.

Tabla 7

Estudios con evaluación de impacto ambiental asociado al lixiviado en agua subterránea y/o superficial e indicadores complementarios reportados.

Nº	País	Matriz	Índices /Herramientas	Foco reportado
01	Zambia	Superficial	—	Metales
02	Ghana	Subterránea	—	Metales
03	India	Subterránea	WQI, GIS	Metales
04	India	Subterránea	Riesgo en salud	Metales
05	India (Coimbatore, Tamil Nadu)	Subterránea	—	General
06	Irán (Tehran province)	Subterránea	GIS	Metales
07	India (Varanasi)	Subterránea	WQI, PCA, HCA	Metales
08	India (Mumbai)	Subterránea y superficial	PCA	Metales + orgánica/N
9	Serbia	Subterránea	—	Metales
10	India (Tamil Nadu)	Subterránea	HPI	General
11	Nigeria (Lagos)	Subterránea	GIS, Riesgo en salud	Metales
12	Etiopía (Arba Minch)	Superficial	—	Metales + orgánica/N
13	India (Tricity: Chandigarh, Mohali, Panchkula)	Subterránea	WQI, PCA, HCA	Metales + orgánica/N

Nota. La matriz y las herramientas se identificaron a partir de lo reportado en cada estudio

Fuente: Elaboración propia.

Efecto de tratamientos sobre el LPI

Los estudios orientados a tratamiento reportaron valores del índice de contaminación por lixiviados (LPI) antes y después del proceso aplicado. Los valores “antes–después” y la reducción porcentual del índice se presentaron en la tabla 8. La comparación gráfica de LPI antes y después del tratamiento (para los estudios con mayor reducción porcentual) se mostró en la figura 4

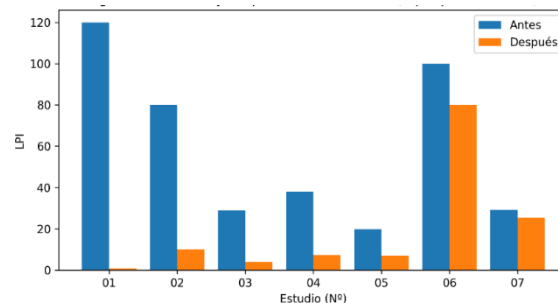
Tabla 8

Estudios con tratamiento: valores de LPI antes y después del proceso y reducción porcentual.

Nº	País	Tecnología	LPI antes	LPI después	Reducción (%)
01	Germ any (surve y 79 landfills	Ósmosis inversa/RO, Deammonificación	120	0.8	99.3
02	Marruecos	Ósmosis inversa/RO, Biológico	80	10	87.5
03	Sri Lanka	Ósmosis inversa/RO, Biológico	28.88	4	86.1
04	Irán (Shiraz)	Electrocoagulación, Ósmosis inversa/RO	38.06	7.22	81.0
05	India (West Bengal, Baidyabati)	Ósmosis inversa/RO, Biológico, Aeración	19.89	7.07	64.5
06	Algeria (Saïda)	Ósmosis inversa/RO, Biológico, Ozonización	100	80	20.0
07	India	Biológico	29.2	25.4	13.0

Figura 4

LPI antes y después del tratamiento



Fuente: Elaboración propia.

Variantes metodológicas del índice

Además del LPI clásico, se identificaron y reportaron variantes metodológicas orientadas a la comparabilidad o clasificación (r-LPI, m-LPI, FLPI y enfoques relacionados). Estas variantes se consignaron en la tabla 9, junto con el tipo de salida reportada (p. ej., valor de índice, clasificación o desempeño del modelo)

Tabla 9

Estudios que reportaron variantes del LPI y tipo de salida reportada.

Nº	País	Variante	Salida reportada	Año
01	India (22 landfill sites)	FLPI	Clasificación	2022
02	India (20 landfill sites)	m-LPI	Valor de índice	2023
03	India (IIT Delhi)	r-LPI	Modelo	2022
04	India (metodología)	r-LPI	Modelo	2022
05	Polonia	r-LPI	Valor de índice	2024

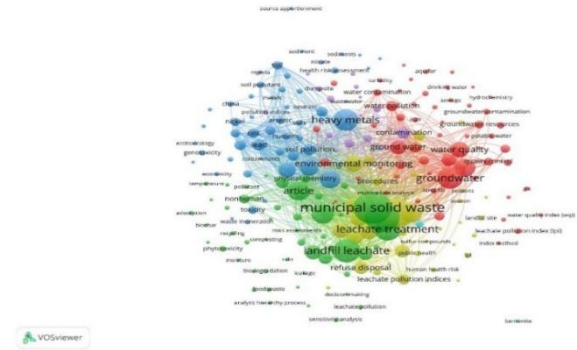
Nota. r-LPI: revised LPI; m-LPI: modified LPI; FLPI: fuzzy leachate pollution index.

Fuente: Elaboración propia.

Mapa de co-ocurrencia de palabras clave (VOSviewer).

A partir de 416 registros provenientes de Scopus, ScienceDirect y PubMed (conjunto deduplicado), se construyó un mapa de co-ocurrencia de palabras clave. La visualización mostró términos centrales vinculados a la temática de lixiviados, con alta presencia de municipal solid waste, landfill leachate y groundwater, junto con términos asociados a leachate treatment, water quality, environmental monitoring y heavy metals. Los agrupamientos por colores representaron clústeres temáticos de co-ocurrencia, evidenciando la organización del campo en torno a caracterización del lixiviado, evaluación de calidad de agua (subterránea/superficial) y tecnologías de

tratamiento. El mapa fue elaborado con VOSviewer (van Eck & Waltman, 2010)



Nota. El tamaño del nodo representa la frecuencia del término y los enlaces indican coocurrencia; los colores corresponden a clústeres temáticos. Elaborado con VOSviewer (van Eck & Waltman, 2010).

Discusión

Los resultados de esta revisión sistemática confirman que el Índice de Contaminación por Lixiviados (Leachate Pollution Index, LPI) constituye una herramienta útil para integrar en un valor único la información fisicoquímica del lixiviado y facilitar la comparación entre sitios de disposición final con distintas condiciones operativas, climáticas y de manejo. Esta utilidad coincide con la propuesta original del índice, orientada a sintetizar múltiples parámetros de contaminación en una medida resumida del potencial contaminante del lixiviado (Kumar & Alappat, 2005a; Kumar & Alappat, 2005b). En ese sentido, los hallazgos del presente estudio respaldan el uso del LPI como instrumento de apoyo para el monitoreo ambiental y la

priorización de rellenos sanitarios con mayor riesgo potencial.

Uno de los principales hallazgos fue la amplia variabilidad de los valores del LPI reportados en la literatura, con un rango entre 3 y 88.8, lo que evidencia que la contaminación por lixiviados no sigue un patrón uniforme. Esta variación puede explicarse por diferencias en la antigüedad del relleno sanitario, la composición de los residuos, las condiciones climáticas, la presencia o ausencia de tratamiento y el grado de control ambiental del sitio. Estudios recientes también han documentado esta heterogeneidad en distintos contextos geográficos, señalando que el comportamiento del índice depende en gran medida de factores operativos y ambientales locales (Wdowczyk et al., 2024; Saghi et al., 2024; Siddiqi et al., 2022; Rodríguez-Cárdenas et al., 2025). Asimismo, revisiones de alcance global han reportado una marcada variabilidad en la calidad del lixiviado y en su potencial contaminante, lo que refuerza la necesidad de interpretar el LPI siempre dentro de su contexto de generación (Abunama et al., 2021; Ma et al., 2022).

En relación con el objetivo de identificar los contaminantes predominantes, la evidencia sintetizada mostró que los parámetros más frecuentemente reportados fueron aquellos asociados con carga orgánica, contaminación nitrogenada, sales disueltas y metales pesados, destacando DQO/COD, DBO/BOD, $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3\text{-N}$,

TDS y determinados metales. Este patrón coincide con la literatura sobre caracterización de lixiviados, donde la materia orgánica, el nitrógeno amoniacal y los metales representan componentes recurrentes del riesgo ambiental asociado a los rellenos sanitarios (Mohammad-Pajoo et al., 2017; Siddiqi et al., 2022; Gani et al., 2024; Wdowczyk et al., 2024). Desde una perspectiva aplicada, estos hallazgos sugieren que dichos parámetros deben considerarse como un núcleo mínimo de monitoreo en evaluaciones ambientales orientadas a estimar el potencial contaminante del lixiviado.

Respecto al impacto ambiental, los estudios incluidos se concentraron principalmente en la evaluación de agua subterránea, y en menor medida en agua superficial o en ambas matrices. Este resultado es coherente con la dinámica de migración del lixiviado, ya que la infiltración a través del suelo convierte al subsuelo y a los acuíferos en receptores directos del proceso de contaminación, especialmente cuando los sistemas de impermeabilización y control son insuficientes. Además, varios estudios complementaron el LPI con herramientas como WQI, HPI/HMI, GIS, PCA y HCA, con el fin de caracterizar mejor la distribución espacial y la complejidad química del impacto ambiental (Gyabaah et al., 2024; Jolaosho, 2024; Venkatesh et al., 2024; Shahamat et al., 2025). Esto indica que el LPI, aunque útil como indicador integrador, no agota por sí solo la evaluación del riesgo, sino que funciona mejor cuando se

articula con otros índices y enfoques analíticos. En algunos estudios, esta integración incluso permitió incorporar análisis de riesgo para la salud humana en escenarios con exposición potencial a metales pesados (Jolaosho, 2024; Shahamat et al., 2025).

En cuanto a los estudios orientados a tratamiento, la evidencia mostró que el LPI también se ha utilizado como una métrica global de desempeño, al comparar valores antes y después de la aplicación de tecnologías físico-químicas, biológicas o sistemas combinados. Las reducciones observadas en el índice sugieren que este puede ser una herramienta útil para resumir el efecto integral del tratamiento sobre la calidad del lixiviado, más allá del comportamiento individual de un solo parámetro (Rani et al., 2020; How et al., 2020; Ameli et al., 2024; Dira et al., 2026). Sin embargo, las diferencias entre tecnologías, condiciones operativas y composición inicial del lixiviado dificultan comparaciones estrictas entre estudios. Por ello, el LPI parece especialmente valioso para evaluar cambios dentro de un mismo sistema de tratamiento, aunque su uso comparativo entre procesos distintos requiere reportes más estandarizados.

La revisión también identificó la presencia de variantes metodológicas del índice, como r-LPI, m-LPI y FLPI, lo que evidencia una evolución del enfoque original hacia modelos de mayor robustez, flexibilidad o capacidad de

clasificación. Estas variantes han sido propuestas para responder a limitaciones del LPI clásico, especialmente cuando no se dispone de todos los parámetros requeridos o cuando se busca mejorar la agregación de la información (Bisht et al., 2022; Lothe & Sinha, 2017; Teja et al., 2023a; Teja et al., 2023b). No obstante, la coexistencia de estas versiones también introduce una fuente adicional de heterogeneidad en la literatura, ya que los resultados no siempre son directamente comparables entre estudios. En consecuencia, aunque estas variantes representan una oportunidad de mejora metodológica, también refuerzan la necesidad de criterios más uniformes para el cálculo y la interpretación del índice.

En conjunto, los hallazgos del presente estudio permiten afirmar que el LPI es una herramienta valiosa para describir el potencial contaminante del lixiviado, comparar contextos de disposición final y apoyar decisiones de monitoreo y tratamiento. Sin embargo, la revisión también evidenció una limitación central: la heterogeneidad metodológica entre investigaciones. Las diferencias en los parámetros incluidos, los métodos analíticos, las condiciones operativas, las estrategias de muestreo y la forma de reportar el índice dificultan la comparación entre estudios y limitan la construcción de interpretaciones uniformes. Por ello, futuras investigaciones deberían avanzar hacia una mayor estandarización del cálculo y del reporte del LPI,

definiendo parámetros mínimos, criterios de presentación y lineamientos comunes de interpretación. Esto fortalecería su utilidad tanto en investigación como en la gestión ambiental de rellenos sanitarios.

Conclusión

El presente artículo de revisión sistemática analizó la evidencia científica disponible sobre la aplicación del Índice de Contaminación por Lixiviados (LPI) en rellenos sanitarios y confirmó que este indicador se emplea como una herramienta integradora para describir el potencial contaminante del lixiviado y facilitar comparaciones entre estudios. En los trabajos incluidos, los contaminantes y parámetros más recurrentes en la caracterización del lixiviado se asociaron con metales pesados y con variables representativas de carga orgánica y nitrógeno amoniacal (DQO/COD, DBO/BOD y $\text{NH}_4^+/\text{NH}_3\text{-N}$), lo que respalda su importancia como conjunto mínimo de monitoreo en evaluaciones ambientales. La comparación de valores reportados evidenció una variabilidad amplia del LPI entre países y regiones, mostrando que el índice refleja diferencias entre sitios de

disposición final y contextos operativos. Asimismo, los estudios que evaluaron matrices ambientales reportaron impactos asociados principalmente en agua subterránea y, en menor proporción, en agua superficial, frecuentemente apoyándose en índices y herramientas complementarias (WQI, HPI/HMI, GIS y análisis multivariante) para describir el comportamiento ambiental del sistema. Finalmente, se identificaron limitaciones metodológicas que afectan la comparabilidad entre investigaciones, principalmente por diferencias en los parámetros incluidos, metodologías analíticas, condiciones operativas y forma de reportar el índice (valores únicos, rangos y/o variantes), lo que subraya la necesidad de fortalecer la estandarización del cálculo y el reporte del LPI para mejorar su utilidad en la gestión ambiental y en la evaluación del desempeño de tratamientos.

Agradecimiento

La autora expresa su profundo agradecimiento a las personas que apoyaron la realización de este trabajo

Contribución de los autores

CPBA: recolección de datos, diseño, estructuración del artículo, redacción, aprobación de la versión final del artículo.

Conflictos de interés

No presenta conflicto de intereses.

Referencias

- Abunama, T., Moodley, T., Bualqumboz, M., Kumari, S., & Bux, F. (2021). Variability of leachate quality and polluting potentials in light of leachate pollution index (LPI): A global perspective. *Chemosphere*, 282, 131119. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131119>
- Afolabi, Omobolaji O., Wali, Elekwachi, Ihunda, Eze C., Orji, Maureen C., Emelu, Victoria O., Bosco-Abiahu, Lilian C., Ogbuehi, Nnamdi C., Asomaku, Sunny O., Wali, Odinaka A. (2022). Potential environmental pollution and human health risk assessment due to leachate contamination of groundwater from anthropogenic impacted site. *Environmental Challenges*. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100627>
- Ameli, Fateme, Hashemi, Hassan, Samaei, Mohammad Reza, Asgari, Esrafil, Mohammadian Fazli, Mehran (2024). Enhanced reducing leachate pollution index through electrocoagulation using response surface methodology. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38134>
- Aragaw, A.T., Vinti, G., Vaccari, M. (2022). Pollution potential of dumping sites on surface water quality in Ethiopia using leachate and comprehensive pollution indices. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10217-2>
- Bisht, T. S., Kumar, D., & Alappat, B. J. (2022). Revised leachate pollution index (r-LPI): A tool to quantify the contamination potential of landfill leachate. *Process Safety and Environmental Protection*, 168, 1142–1154. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.10.052>
- Bisht, T.S., Kumar, D., Alappat, B.J. (2022). Selection of optimal aggregation function for the revised leachate pollution index (r-LPI). *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09861-5>
- Carbonel, D. (2024). Caracterización de lixiviados y análisis del índice de potencial de contaminación en dos rellenos sanitarios peruanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 40, 677–697. <https://doi.org/10.20937/RICA.55105>
- Chaudhary, R., Nain, P., Kumar, A. (2021). Temporal variation of leachate pollution index of Indian landfill sites and associated human health risk. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12383-1>
- De, S., Maiti, S.K., Hazra, T., Debsarkar, A., Dutta, A. (2016). Leachate characterization and identification

- of dominant pollutants using leachate pollution index for an uncontrolled landfill site. *Global Journal of Environmental Science and Management*. <https://doi.org/10.7508/gjesm.2016.02.008>
- Dira, Imane, El Hammoudani, Yahya, El Abdouni, Aouatif, El Allaoui, Hasnae, El Ahmadi, Kawthar, Haboubi, Khadija (2026). Treatment of leachates from the Al Hoceima Landfill using bio-pretreatment and reverse osmosis: Performance, compliance and pollution index (LPI). *Cleaner Waste Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.clwas.2026.100484>
- Farzaneh, G., Khorasani, N., Ghodousi, J., Panahi, M. (2022). Application of geostatistical models to identify spatial distribution of groundwater quality parameters. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18639-8>
- Gani, A., Hussain, A., Pathak, S., Omar, P.J. (2024). Analysing Heavy Metal Contamination in Groundwater in the Vicinity of Mumbai's Landfill Sites: An In-depth Study. *Topics in Catalysis*. <https://doi.org/10.1007/s11244-024-01955-3>
- García-Colindres, M., Castillo-Suárez, L., Álvarez Bastida, C., Linares-Hernández, I., & Martínez-Miranda, V. (2022). Los rellenos sanitarios como fuente de contaminación del agua subterránea por infiltración de lixiviados: efectos en la salud y el medio ambiente. *Ideas en Ciencias de la Ingeniería*, 1(2), 1–15. <https://doi.org/10.36677/ici.v1i15.17324>.
- Gupta, A., Rajamani, P. (2016). Evaluation of the leachate composition and contamination potential of municipal solid waste landfill sites in Delhi. *International Journal of Environment and Waste Management*. <https://doi.org/10.1504/IJEWm.2016.081832>
- Gyabaah, Daniel, Awuah, Esi, Kuffour, Richard Amankwah, Antwi-Agyei, Prince, Wiafe, Samuel, Asiedu, Samuel Boamah (2024). Assessment of dumpsites leachate, geotechnical properties of the soil, and their impacts on surface and groundwater quality of Sunyani, Ghana. *Environmental Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100548>
- How, F.N.F., Mohd Noh, N.S., Nordin, N.A., Abang Sapani, D.F.N. (2020). Analyses and pollution potential of heavy metals at the jerangau-jabor landfill in kuantan, malaysia. *Pollution*. <https://doi.org/10.22059/poll.2020.301198.783>
- Jain R, Majumdar D, Devi S (2023). Microbial Treatment of Raw and Primary Treated Sanitary Landfill Leachate by Indigenous Strain *Brevibacillus agri*. *Applied biochemistry and biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-04056-7>
- Jolaosho, Toheeb Lekan (2024). Characterization of potentially toxic elements in leachates from active and closed landfills in Nigeria and their effects on groundwater systems using spatial, indexical, chemometric and health risk techniques. *Chemosphere*. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143678>
- Joseph, S.M.R., Wijekoon, P., Dilsharan, B., Punchihewa, N.D., Athapattu, B.C.L., Vithanage, M. (2020). Anammox, biochar column and subsurface constructed wetland as an integrated system for treating municipal solid waste derived landfill leachate from an open dumpsite. *Environmental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109880>
- Koumalas, A., Barampouti, E.M., Dounavis, A., Mai, S. (2019). Leachates from landfill sites in Thessaloniki, Greece: Effect of aging. *Environmental Research, Engineering and Management*. <https://doi.org/10.5755/j01.ere.75.4.23073>
- Kumar, D., & Alappat, B. J. (2005). Analysis of leachate pollution index and formulation of sub-leachate pollution indices. *Waste Management & Research*, 23(3), 230–239.
- Kumar, D., & Alappat, B. J. (2005). Evaluating leachate contamination potential of landfill sites using leachate pollution index. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 7, 190–197.

<https://doi.org/10.1007/s10098-004-0269-4>

- Kumarasinghe, U., Inoue, Y., Saito, T., Nagamori, M., Sakamoto, Y., Mowjood, M.I.M., Kawamoto, K. (2017). Temporal variations in perched water and groundwater qualities at an open solid waste dumpsite in Sri Lanka. *International Journal of GEOMATE*. <https://doi.org/10.21660/2017.38.2761>
- Lothe, Anjali G., Sinha, Alok (2017). Development of model for prediction of Leachate Pollution Index (LPI) in absence of leachate parameters. *Special Thematic Issue: Sanitary Landfilling*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.07.026>
- Ma, S., Zhou, C., Pan, J., Yang, G., Sun, C., Liu, Y., Chen, X., & 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>
- Manjula, G., Vijayaraghavan, V., Nayahi, N.T. (2019). Environmental assessment of solid waste dump site. *Journal of Environmental Biology*. [https://doi.org/10.22438/jeb/40/4\(SI\)/JEB_12](https://doi.org/10.22438/jeb/40/4(SI)/JEB_12)
- Mishra, H., Rathod, M., Karmakar, S., Kumar, R. (2016). A framework for assessment and characterisation of municipal solid waste landfill leachate: an application to the Turbhe landfill, Navi Mumbai, India. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5356-6>
- Mishra, S., Tiwary, D., Ohri, A. (2018). Leachate characterisation and evaluation of leachate pollution potential of urban municipal landfill sites. *International Journal of Environment and Waste Management*. <https://doi.org/10.1504/IJEW.2018.093431>
- Mishra, S., Tiwary, D., Ohri, A., Agnihotri, A.K. (2018). Assessment of groundwater quality using WQI and GIS near the Karsara municipal landfill site, Varanasi, India. *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3604-5>
- Mohammad-pajooh, Ehsan, Weichgrebe, Dirk, Cuff, Graham (2017). Municipal landfill leachate characteristics and feasibility of retrofitting existing treatment systems with deammonification – A full scale survey. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.061>
- Naveen BP, Mahapatra DM, Sitharam TG, Sivapullaiah PV, Ramachandra TV (2017). Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate. *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987). <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.002>
- Nyirenda, J., Mwansa, P.M. (2022). Impact of leachate on quality of ground water around Chunga Landfill, Lusaka, Zambia and possible health risks. *Heliyon*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12321>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Rana R, Ganguly R, Gupta AK (2017). Indexing method for assessment of pollution potential of leachate from non-engineered landfill sites and its effect on ground water quality. *Environmental monitoring and assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6417-1>
- Rani, A., Negi, S., Hussain, A., Kumar, S. (2020). Treatment of urban municipal landfill leachate utilizing garbage enzyme. *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122437>
- Rodriguez-Cardenas L, Choque-Quispe Y, Solano-Reynoso AM, Peralta-Guevara DE, Carhuarupay-Molleda YF, Agreda-Cerna HW, Correa-Cuba O, Palomino-Malpartida YG, Flores-Ccorisapra Y,

- Reynoso-Canicani DD, Elias-Silupu JW, Tolentino-Geldres LH, Choque-Quispe D (2025). Leachate Pollution Index (LPI) in Sanitary Landfills in the High Andean Zones of Peru. *Molecules* (Basel, Switzerland). <https://doi.org/10.3390/molecules30163325>
- Rodríguez-Cárdenas, L., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A. M., Peralta-Guevara, D. E., Carhuarupay-Molleda, Y. F., Agreda-Cerna, H. W., Correa-Cuba, O., Palomino-Malpartida, Y. G., Flores-Ccorisapra, Y., & Reynoso-Canicani, D. D. (2025). Leachate Pollution Index (LPI) in Sanitary Landfills in the High Andean Zones of Peru. *Molecules*, 30(16), 3325. <https://doi.org/10.3390/molecules30163325>
- Saghi, M.H., Nadimi, H., Eslami, A., Alavi Bakhtiarvand, S.N., Oghazyan, A., Setoudeh, S., Sargolzaei, M.S. (2024). Characteristics and pollution indices of leachates from municipal solid waste landfills in Iranian metropolises and their implications for MSW management. *Scientific Reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-78630-w>
- Saha, P., Kumar Saikia, K., Kumar, M., Handique, S. (2023). Assessment of health risk and pollution load for heavy and toxic metal contamination from leachate in soil and groundwater in the vicinity of dumping site in Mid-Brahmaputra Valley, India. *Total Environment Research Themes*. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100076>
- Shadi, A.M.H., Kamaruddin, M.A., Niza, N.M., Emmanuel, M.I., Shaah, M.A., Yusoff, M.S., Allafi, F.A. (2020). Characterization of stabilized leachate and evaluation of LPI from sanitary landfill in Penang, Malaysia. *Desalination and Water Treatment*. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25468>
- Shahamat, Yousef Dadban, Rokni, Hassan Reza, Bakhshi, Khadije, Faraji, Hossein (2025). Assessment of heavy metal contamination of water, soil and cultivated vegetables in the Juybar landfill area (North- Eastern Iran). *Food Chemistry Advances*. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2025.100892>
- Siddiqi, S.A., Al-Mamun, A., Sana, A., Baawain, M.S., Choudhury, M.R. (2022). Characterization and pollution potential of leachate from urban landfills during dry and wet periods in arid regions. *Water Supply*. <https://doi.org/10.2166/WS.2021.392>
- Singh, S., Janardhana Raju, N.J., Gossel, W., Wycisk, P. (2016). Assessment of pollution potential of leachate from the municipal solid waste disposal site and its impact on groundwater quality, Varanasi environs, India. *Arabian Journal of Geosciences*. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2131-x>
- Teja, D.R., Gupta, S., Yadav, B., Gupta, S.K. (2023). Development of fuzzy leachate pollution index for treatability-based classification of solid waste landfills. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-22556-1>
- Teja, D.R., Kumar, P.S.S., Jariwala, N. (2023). Application of multi-criteria decision-making techniques to develop modify-leachate pollution index. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25178-3>
- Tejada-Purizaca, T. R., Garcia-Chevesich, P. A., Ticona-Quea, J., Martínez, G., Martínez, K., Morales-Paredes, L., Romero-Mariscal, G., Arenazas-Rodríguez, A., Vanzin, G., Sharp, J. O., & McCray, J. E. (2024). Estudio concluyó que alimentos peruanos contienen altas concentraciones de metales normados y no normados. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 1–5. <https://doi.org/10.20937/RICA.55334>
- Tenodi, S., Krčmar, D., Agbaba, J., Zrnić Tenodi, K.Z., Radenović, M., Ubavin, D., Dalmacija, B. (2020). Assessment of the environmental impact of sanitary and unsanitary parts of a municipal solid waste landfill. *Journal of Environmental Management*. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110019>

- Touzani, A., El Hammoudani, Y., Dimane, F., Tahiri, M., Haboubi, K. (2024). Characterization of Leachate and Assessment of the Leachate Pollution Index – A Study of the Controlled Landfill in Fez. *Ecological Engineering and Environmental Technology*.
<https://doi.org/10.12912/27197050/183132>
- Van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523–538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Venkatesh, A.T., Rajkumar, S., Masilamani, U.S. (2024). Analysing the factors influencing groundwater quality with different pollution indices and PLS-SEM approach in the vicinity of an open dumping yard in Saduperi, Vellore, Tamil Nadu, India. *Environmental Science and Pollution Research*.
<https://doi.org/10.1007/s11356-024-32939-1>
- Wdowczyk, Aleksandra, Szymańska–Pulikowska, Agata, Gupta, Anshu (2024). Application of selected indicators to assess contamination of municipal landfill leachate and its impact on groundwater. *Water Resources and Industry*. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2024.100265>
- Yang H, Yue B, Liu Y, Wu X, Gao H, Zhang Z, Yan Z (2019). Rural solid waste-characteristics and leachate pollution assessment for different precipitation levels, China. *Environmental science and pollution research international*. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04427-4>