

Los rellenos sanitarios como fuente de contaminación del agua subterránea por infiltración de lixiviados: efectos en la salud y el medio ambiente

Landfills as a groundwater pollution source by infiltration of leachate: effects on health and environment

**Miriam A. García-Colindres¹, Luis Antonio Castillo-Suárez¹, Carolina Álvarez Bastida¹,
Ivonne Linares-Hernández¹, Verónica Martínez-Miranda¹**

Recibido: 7 de octubre de 2021 – Aceptado: 14 de marzo de 2022

RESUMEN

El impacto ambiental, originado por el crecimiento y concentración de la población, afecta de manera directa la cantidad de desechos sólidos urbanos que se generan, convirtiéndose en uno de los desafíos que enfrenta el mundo. Un relleno sanitario es una obra de infraestructura que involucra métodos de ingeniería para la disposición final de los RSU y de manejo especial, con el

fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicionales, los impactos ambientales. Sin embargo, se ha observado que muchos de ellos funcionan como sitios controlados, causando una grave contaminación al agua subterránea por la fuga de lixiviados, producto de complejos procesos biológicos y fisicoquímicos que ocurren durante su almacenamiento y degradación. Este estudio analizó artículos científicos de diferentes países. En los

¹ Universidad Autónoma del Estado de México
Autores de correspondencia:
mmirandav@uaemex.mx, ilinaresh@uaemex.mx



diversos estudios se han detectado numerosos contaminantes del agua subterránea, así como indicadores de materia orgánica. Generalmente, se ha citado que la contaminación del agua subterránea aparece en la etapa inicial del relleno sanitario después de cinco años y alcanza su punto máximo de contaminación. Las concentraciones de los contaminantes provenientes de rellenos sanitarios disminuyeron exponencialmente a medida que aumentaba la distancia a las fuentes de agua. Por lo tanto, la contaminación del agua subterránea aparece principalmente a distancias cortas de un relleno sanitario. En este documento se describen las concentraciones máximas de los contaminantes que se han reportado, además de su impacto a la salud y ambiente.

PALABRAS CLAVE: lixiviados de rellenos sanitarios; metales; agua subterránea

ABSTRACT

The environmental impact caused by the growth and concentration of the population directly affects the amount of urban solid waste that is generated, becoming one of the challenges on the world. A sanitary landfill is

an infrastructure that involves engineering methods for the final disposal of MSW and special handling, to control, through compaction and additional infrastructure, environmental impacts. However, it has been observed that many of them function as controlled sites, causing serious contamination to groundwater due to leachate, product of complex biological and physicochemical processes that occur during storage and degradation. This study analyzed scientific articles from different countries. Numerous groundwater pollutants, as well as indicators of organic matter, have been detected in the various studies. Generally, it has been cited that groundwater contamination appears in the initial stage of the sanitary landfill after five years and reaches its maximum point of contamination. Groundwater contamination appears mainly at short distances from a sanitary landfill. This document describes the maximum concentrations of pollutants that have been reported, as well as their impact on health and the environment.

KEYWORDS: landfill leachate; metals; underground water

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es la principal fuente de agua dulce para la población en el mundo. Es utilizada para usos domésticos principalmente (Abiriga et al., 2021). Aproximadamente un tercio de la población en el mundo depende del agua subterránea para beber. En la mayoría de los países en desarrollo, los residuos sólidos urbanos (RSU) son almacenados de manera empírica en áreas abiertas, en sitios no controlados revestidos o no revestidos, que se asocian a fugas directas de lixiviados, lo que representan una fuente potencial de efectos adversos en las áreas circundantes que resultan en un riesgo grave para el medio ambiente (Olorunfemi et al., 2021).

El creciente aumento de la población ha generado incremento en la producción de RSU, que son depositados en espacios para su disposición, almacenamiento y reducción. Estos pueden ser ingeniería de rellenos sanitarios o tiraderos a cielo abierto, sin embargo estas prácticas pueden permitir que el lixiviado fluya directamente hacia los cuerpos de agua y el suelo más cercanos, lo que presenta riesgos para la salud humana y el medio ambiente (Wijekoon et al., 2022). Diversas investigaciones los señalan como una fuente más importante de contaminación del suelo, agua subterránea y agua superficial a través de sus lixiviados (Abiriga et al., 2020; Adamcová et al., 2017; Jayawardhana et al., 2016), así como causantes de efectos adversos para la salud humana y el medio ambiente (Abiriga et al., 2020; Aromolaran et al., 2019; Jabłońska-Trypuć et al., 2021). El lixiviado ha sido reportado como la fuente más importante de contaminación de rellenos sanitarios; puede migrar vertical y horizontalmente por advección, dispersión y dilución (Chakraborty & Kumar, 2016; Xie et al., 2016). Los lixiviados son un líquido altamente contaminado por ser una mezcla de elevadas cantidades de iones inorgánicos, compuestos orgánicos y otros elementos tóxicos como metales pesados, arsénico y nutrientes (Jayawardhana et al., 2016; Mishra et al., 2019; Przydatek, 2021). La generación de lixiviados puede variar según el tipo de desecho, el clima, el sitio y las condiciones de la superficie, lo que dificulta su tratamiento a un nivel

satisfactorio. En particular, los rellenos sanitarios municipales antiguos son asociados a una mayor toxicidad y baja biodegradabilidad (Castillo-Suárez et al., 2018).

Los factores hidrogeológicos como la lluvia, la meteorización mineral, la topografía del área de vertido y los procesos biológicos juegan un papel importante en la lixiviación de RSU por actividades antropogénicas (Mishra et al., 2019). La dispersión y difusión de los contaminantes de lixiviado en el agua subterránea dependen de las propiedades físicas y químicas de los RSU, el patrón de flujo, el nivel de infiltración de agua subterránea, el grado de hidratación residual, la tecnología utilizada en los rellenos sanitarios y el porcentaje de degradación de los residuos (Jabłońska-Trypuć et al., 2021).

La degradación de los RSU durante la temporada de lluvia, favorece la infiltración de los componentes del lixiviado con la precipitación en el agua subterránea (Aromolaran et al., 2019). Se señala que a un radio de 1000 m de la ubicación del relleno sanitario se ha encontrado una contaminación alta en el agua subterránea. También se ha observado que la concentración más alta es en un radio de 200 m (Aromolaran et al., 2019; Mishra et al., 2019). Como expresa Aromolaran y colaboradores (2019), aun cuando los rellenos sanitarios se encuentren cerrados, continuarán produciendo lixiviados y este proceso puede durar de 30 a 50 años, con un probable impacto ambiental significativo.

Estudios de investigación han demostrado que el lixiviado del rellenos sanitarios consta de compuestos químicos, en los cuales se contempla la materia orgánica disuelta (carbono orgánico total-COT; ácidos grasos volátiles-AGV; fracciones húmicas y fúlvicas; componentes inorgánicos Ca^{2+} , Mg^{2+} , NH_4^+ , Fe, Mn, Cl^- , As; metales pesados Hg, Cd, Cr, Cu, Pb) y los compuestos orgánicos xenobióticos (XOCS-benceno, tolueno, fenoles, alifáticos clorados, ftalatos) (Wijekoon et al., 2022). En los lixiviados se relaciona principalmente los XOC y los metales pesados con efectos perjudiciales en los ecosistemas y las cadenas alimentarias que provocan efectos cancerígenos, toxicidad aguda y genotoxicidad en los seres humanos, los cuales amenazan la salud humana, los servicios ecológicos y el desarrollo económico (Li et al., 2021; Wijekoon et al., 2022).

Este estudio tiene como objetivo el análisis y la revisión de la presencia de contaminantes, así como los cambios en la fisicoquímica de la calidad del agua derivado de la incorporación de contaminantes asociados a la infiltración del lixiviado de los rellenos sanitarios, así como su efecto a la salud y al ambiente.

METODOLOGÍA

La información de esta revisión se obtuvo de la base de datos *Elsevier Science Direct y Springer*. Se seleccionaron artículos de estudio donde se reportó la ubicación de un relleno sanitario o sitio de disposición de RSU a distancias circundantes de una fuente de abastecimiento y se observa alteración del agua subterránea asociada a la infiltración de lixiviados: (1) Se identificaron los principales contaminantes que se reportan en las aguas subterráneas cerca de los rellenos sanitarios. (2) Se seleccionaron los estudios donde las concentraciones de los elementos y iones superaron los límites permisibles de calidad para los estándares internacionales (WHO, 2011) poniendo en riesgo la salud y el medio ambiente. (3) Se discutieron los factores que influyen en la contaminación del agua subterránea derivado de la infiltración de los lixiviados provenientes de los RSU.

RESULTADOS

La principal preocupación ambiental en esta revisión es evidenciar las consecuencias negativas que se asocian con los lixiviados, los cuales modifican la calidad del agua subterránea. El análisis se realizó con base en los resultados reportados (Abiriga et al., 2020; Ahamad et al., 2019; Mishra et al., 2019; Talalaj, 2014; Tenodi et al., 2020) (Tabla 1). Se revela que las concentraciones de metales contaminantes del agua subterránea se encuentran en concentraciones por arriba de los límites máximos permisibles, con lo que se pone en riesgo la salud y los ecosistemas, por su grado de toxicidad, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (WHO por sus siglas en inglés) (WHO, 2011). En esta revisión se analizaron las concentraciones de TOC, iones Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} ; metales como Fe, Cr, Cd, Pb, Zn, Hg y Ni; Nutrientes NO_3^- , SO_4^{2-} ; así como As.

PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Los valores de pH del agua subterránea cercanos a los rellenos sanitarios variaron de 4.9 a 8.8 (Tabla 1). En la misma tabla se observan que los iones mayoritarios Na^+ y Ca^{2+} son los cationes predominantes seguidos de Mg^{2+} y K^+ . En el presente estudio, la concentración de Na^+ estuvo por arriba de los límites superiores. Según las directrices de WHO (2011) el límite máximo aceptable es de 200 mg/L. La concentración de Ca^{2+} oscila entre 6.80 y 920 mg/L, lo que supera el límite aceptable de 150 mg/L prescrito para el agua de uso y consumo humano. Mg^{2+} y la concentración de K^+ varían respectivamente en el rango de 1.2 – 333.20 mg/L y 1.1 – 477.60 mg/L, concentraciones que se encuentran por encima del límite aceptable (WHO, 2011), que constituyen un desequilibrio iónico en la calidad del agua. Con lo que respecta a las concentraciones del ión Cl^- , éste es el ion más dominante entre los aniones.

La concentración de Cl^- varió de 1.6 a 2590 mg/L. Los resultados se asocian a la infiltración de los lixiviados debido a que este ión se utiliza como indicador de contaminación antropogénica, ya que es inerte y no biodegradable (Ahamad et al., 2019). En la mayoría de lo reportado se encuentra superando el límite permitido de 300 mg/L para agua de uso y consumo (Tabla 1).

TABLA 1.
RESULTADOS CONCENTRADOS DEL ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO EN DIFERENTES SITIOS CERCANO A RELLENOS SANITARIOS.

País	Contaminantes (Min-Max) en agua subterránea															
	pH	COT	Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	As	Fe	Cr	Cd	Pb	Zn	Hg	Ni
		mg/L							µg/L							
Noruega (Abiriga et al., 2020)	4.9-8.8	0.13-47	0.09-116	1.1-86	1.2-37	6.8-83	1.6-137	0-0.16	ND	0-99,000	0.0-583	0.0-11	0-69	0-5739	0-0.145	ND
Polonia (Talachaj, 2014)	5.7-7.5	10.92-616.60	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0-152	0-70	1-150	0-8893	0-12.0	ND
Serbia (Tenodi et al., 2020)	7.3-8.1	2.24-34.2	ND	ND	ND	ND	35.4-365.8	0.53-4.37	2.3-4.8	54-7910	3.37-11.0	ND	23.6-58.5	0.09-0.82	ND	5.6-55.9
India (Ahamad et al., 2019)	6.6-8.4	ND	30.8-344.98	4.9-477.6	7.57-333.20	36-920	52-2590	1.23-178.0	ND	23.3-4467.5	0-10.5	10.5-42.3	2.60-119.3	0.16-10364.5	ND	ND
Irán (Mishra et al., 2019)	6.4-7.3	ND	55.0-230	3.0-142	17.0-96.3	6.0-88.0	30.0-232	9.20-142.6	ND	0-5.11	ND	ND	ND	ND	ND	ND
WHO (2011)	6.5-8.5	ND	250	200	12	150	300	50	10	4000	50	3	10	4000	6	70
Afectaciones																
Metales	Las exposiciones a altas concentraciones de metales se asocian a graves intoxicaciones. El Cd destruye la estructura de la proteína y la función celular, daña el ADN y provoca teratogenicidad; el Pb en humanos tiene efectos subletales, el Zn la pérdida de agudeza visual y degeneración macular, el Hg inhibe el desarrollo mental y motor, causa alergias en la piel, presenta un riesgo de cáncer de pulmón, dermatitis, insuficiencia renal y gastrointestinal, además de exasperación del tracto respiratorio y los ojos (Abiriga et al., 2020; Alvarez et al., 2021).															
Nutrientes	NO ₃ ⁻ presenta riesgo de cáncer colorrectal, cáncer de vejiga y cáncer de mama, resultados reproductivos adversos, diabetes y afecciones de la tiroides en estudios epidemiológicos, el nitrato ingerido se reduce a nitrito en el tracto gastrointestinal y reduce el transporte de oxígeno a los tejidos, lo que lleva a la hipoxia (Fan, 2019; Vaiphei & Kurakalva, 2021)															
Metaloides	El As está clasificado como carcinógeno, prevalece en el ambiente natural, altamente tóxico y móvil. La exposición a As desarrolla hiperpigmentación, especialmente en el tronco y la queratosis en las palmas de las manos y las plantas de los pies (Li et al., 2021).															

CONCENTRACIÓN DE NITRATO

En general, el NO_3^- constituye una fuente de contaminación puntual antigua en el agua subterránea. En la presente revisión, la concentración de NO_3^- osciló entre 0 y 178 mg/L. El límite estándar de salud pública en el agua potable establecido es de 50 mg/L (WHO, 2011). Los resultados reportados por Ahamad y colaboradores (2019), superan el límite establecido para este anión. Típicamente, la mayor concentración de NO_3^- emana de fuentes antropogénicas, como las prácticas agrícolas intensivas (sobre aplicación de fertilizantes), la eliminación inadecuada de desechos de alcantarillado doméstico, desechos de animales y fugas de fosas sépticas (Li et al., 2020).

DISCUSIÓN

Con base en esta revisión, se observa la influencia negativa de los rellenos sanitarios de RSU, por ser una fuente antropogénica de contaminación del agua subterránea a través de la incorporación de los lixiviados, lo que pone en riesgo potencial a la salud humana. Los factores que contribuyen a la contaminación del agua subterránea cerca de un relleno sanitario son: la lluvia estacional, la edad de los rellenos sanitarios, la topografía, el modo de transporte de los lixiviados, el sistema de flujo del agua subterránea y la dispersión hidrodinámica por advección. El tipo de contaminante que altera la fisicoquímica del agua subterránea está relacionado con las características de los RSU que se disponen en el rellenos sanitarios o tiradero a cielo abierto para su disposición, almacenamiento y reducción, así como la tecnología con la que opera el sistema de tratamiento. Desde el punto de vista de Mishra y colaboradores (2018), la calidad del agua subterránea se deteriora gradualmente alrededor de los rellenos sanitarios, aun cuando han sido cerrados y el riesgo es todavía mayor a distancias cortas. La disminución de la concentración de iones inorgánicos se debe por un lado a la dilución y por otro a la precipitación de elementos solubles, mientras que la disminución de los orgánicos se debe principalmente a su biodegradación (Abiriga et al., 2020; Munagala et al., 2020; Talalaj, 2014).

CONCLUSIONES

La calidad del agua subterránea es alterada en su fisicoquímica, debido a la infiltración del lixiviado de los RSU. Esto plantea graves riesgos para la salud, lo que ha llevado a la prohibición de explotar el agua subterránea para uso humano. La presencia de las altas concentraciones de metales pesados, como el Cr, Cd, Pb, Zn, Hg en los lixiviados confirman su migración al agua subterránea, revelando la infiltración continua de la pluma de contaminación hacia los estratos del suelo. Se recomienda el uso de tecnología para la recolección y tratamiento de los lixiviados, con el fin de proteger el agua subterránea. De acuerdo con la revisión, en la mayoría de los documentos se recomienda el cierre definitivo del relleno sanitario para que se inicie el proceso de recuperación del suelo, a fin de mitigar una mayor percolación del lixiviado en agua subterránea. El monitoreo de la calidad del agua subterránea cercana a un relleno sanitario debe realizarse continuamente para evitar impactos a la salud y al ambiente, sobre todo si entra en la categoría de un sitio controlado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo otorgado por la SIEA/UAEMex, con No. de proyecto 6445/2022 CIB.

REFERENCIAS

- Abiriga, D., Jenkins, A., Alfsnes, K., Vestgarden, L. S. & Klempe, H. (2021). Characterisation of the bacterial microbiota of a landfill-contaminated confined aquifer undergoing intrinsic remediation. *Science of the Total Environment*, 785(3800), 0–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147349>
- Abiriga, D., Vestgarden, L. S. & Klempe, H. (2020). Groundwater contamination from a municipal land fill: Effect of age , land fill closure, and season on groundwater chemistry. *Science of the*

- Total Environment*, 737(10), 140307. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140307>
- Adamcová, D., Radziemska, M., Ridošková, A., Bartoň, S., Pelcová, P., Elbl, J., Kynický, J., Brtnický, M. & Vaverková, M. D. (2017). Environmental assessment of the effects of a municipal landfill on the content and distribution of heavy metals in *Tanacetum vulgare* L. *Chemosphere*, 185, 1011–1018. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.060>
- Ahamad, A., Raju, N. J., Madhav, S., Gossel, W. & Wycisk, P. (2019). Impact of non-engineered Bhalswa landfill on groundwater from Quaternary alluvium in Yamuna flood plain and potential human health risk, New Delhi, India. *Quaternary International*, 507, 352–369. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.06.011>
- Alvarez, C. C., Bravo Gómez, M. E. & Hernández Zavala, A. (2021). Hexavalent chromium: Regulation and health effects. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 65, 126729. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2021.126729>
- Aromolaran, O., Fagade, O. E., Aromolaran, O. K., Faleye, E. T. & Faerber, H. (2019). Assessment of groundwater pollution near Aba-Eku municipal solid waste dumpsite. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(12), 718. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7886-1>
- Castillo-Suárez, L. A., Bruno-Severo, F., Lugo-Lugo, V., Esparza-Soto, M., Martínez-Miranda, V. & Linares-Hernández, I. (2018). Peroxicoagulation and Solar Peroxicoagulation for Landfill Leachate Treatment Using a Cu–Fe System. *Water, Air, & Soil Pollution*, 229, 385. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-4031-7>
- Chakraborty, S. & Kumar, R. N. (2016). Assessment of groundwater quality at a MSW landfill site using standard and AHP based water quality index: a case study from Ranchi, Jharkhand, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5336-x>
- Fan, A. M. (2019). Health, Exposure and Regulatory Implications of Nitrate and Nitrite in Drinking Water. In J. Nriagu (Ed.), *Michigan: Encyclopedia of Environmental Health* (2nd ed., pp. 417–435). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11837-8>
- Jabłońska-Trypuć, A., Wydro, U., Wołejko, E., Pietryczuk, A., Cudowski, A., Leszczyński, J., Rodziejewicz, J., Janczukowicz, W. & Butarewicz, A. (2021). Potential toxicity of leachate from the municipal landfill in view of the possibility of their migration to the environment through infiltration into groundwater. *Environmental Geochemistry and Health*, 43, 3683–3698. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00867-5>
- Jayawardhana, Y., Kumarathilaka, P., Herath, I. & Vithanage, M. (2016). Municipal Solid Waste Biochar for Prevention of Pollution From Landfill Leachate. In M. N. V. Prasad and K. Shih (Eds). *Environmental Materials and Waste* (pp. 117–148). Elsevier.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803837-6.00006-8>

- Li, L., Li, Z., Liu, D. & Song, K. (2020). Evaluation of partial nitrification efficiency as a response to cadmium concentration and microplastic polyvinylchloride abundance during landfill leachate treatment. *Chemosphere*, 247, 125903. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.125903>
- Li, P., Karunanidhi, D., Subramani, T. & Srinivasamoorthy, K. (2021). Sources and Consequences of Groundwater Contamination. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 80, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s00244-020-00805-z>
- Mishra, S., Tiwary, D., Ohri, A. & Agnihotri, A. K. (2019). Impact of municipal solid waste landfill leachate on groundwater quality in Varanasi, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100230>
- Munagala, S., Chaitanya, D., Jagarapu, K. & Ratnamala Reddy B. S. S. (2020). Determination of water quality index for ground water near municipal dump site in Guntur. *Materials Today: Proceedings*, 33(1), 724-727. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.030>
- Olorunfemi, A. O., Alao-Daniel, A. B., Adesiyun, T. A. & Onah, C. E. (2021). Geochemical assessment of heavy metal impact on soil around Ewu-Elepe Dumpsite, Lagos State, Nigeria. *Ife Journal of Science*, 22(3), 119–138. <https://doi.org/10.4314/ij.s.v22i3.10>
- Przydatek, G. (2021). Using advanced statistical tools to assess the impact of a small landfill site on the aquatic environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(2), 71. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08850-4>
- Talalaj, I. A. (2014). Assessment of groundwater quality near the landfill site using the modified water quality index. *Environmental Monitoring and Assessment*, 186, 3673 -3683. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3649-1>
- Tenodi, S., Kr, D., Agbaba, J., Zrni, K., Radenovi, M., & Ubavin, D. (2020). Assessment of the environmental impact of sanitary and unsanitary parts of a municipal solid waste landfill. *Journal of Environmental Management*, 258, 110019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110019>
- Vaiphei, S. P. & Kurakalva, R. M. (2021). Hydrochemical characteristics and nitrate health risk assessment of groundwater through seasonal variations from an intensive agricultural region of upper Krishna River basin, Telangana, India. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 213, 112073. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112073>
- WHO. (2011). *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda*. World Health Organization.

- 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, 126627. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126627>
- Xie, H., Chen, Y., Thomas, H. R., Sedighi, M., Masum, S. A. & Ran, Q. (2016). Contaminant transport in the sub-surface soil of an uncontrolled landfill site in China: site investigation and two-dimensional numerical analysis. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(3), 2566–2575. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5504-5>