# Formación y migración de ácidos en el vertedero de Chilla-Juliaca

# Ingeniería ambiental

# Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Peruana Unión

# 15 abril de 2025

## Resumen

Este tema tiene como propósito dar a conocer como la gestión inadecuada de RSU en Perú, especialmente ciudades en desarrollo como Juliaca, ha generado preocupaciones ambientales y de salud pública a causa de la formación de lixiviados y gases de efecto invernadero. Estos líquidos, formados por la descomposición anaeróbica de residuos orgánicos y la infiltración por aguas de lluvia, contienen compuestos tóxicos como ácidos orgánicos volátiles y metales pesados que contaminan suelos y aguas subterráneas. Estudios informan que la falta de infraestructura adecuada en vertederos, como el de Chilla en Juliaca, empeora estos problemas, afectando la calidad de vida de las personas que viven al entorno del vertedero y a sus animales.

Según investigaciones analizaron diversas estrategias para reducir el impacto de los lixiviados, incluyendo el uso de barreras de contención de baja permeabilidad, tratamientos biológicos y físicos-químicos, y tecnologías de membranas, sin embargo, para la implementación de estas soluciones es difícil aplicar por falta de dinero y tecnologías. Además, la descomposición de RSU produce gases como el metano, contribuyendo a un cambio climático.

La educación ambiental surge como una opción clave para incentivar practicas sostenibles en la gestión de residuos sólidos. Ideas que ayuden a que la gente tome conciencia, el reciclaje y la economía circular pueden agregar las soluciones técnicas. En esta situación, es urgente desarrollar políticas integrales que aborden tanto la infraestructura como la educación, diseñadas según las necesidades locales, para garantizar una agestión sostenible de los RSU y proteger el medio ambiente y la salud pública.

## Introducción

La formación y migración en vertederos de residuos sólidos en el Perú representa una amenaza al medio ambiente y a la salud humana. Estos residuos orgánicos, al descomponerse, generan ácidos volátiles que pueden filtrarse fácilmente al suelo y a las aguas cercanas (Ziegler-Rodriguez et al., 2019). En muchas regiones del país, los vertederos carecen de la infraestructura adecuada para contener y tratar los lixiviados y gases generados por la descomposición de residuos orgánicos. Además, esta situación se agrava por la falta de planificación y control en los sitios de disposición final (Margallo et al., 2019).

En el caso específico de la ciudad de Juliaca-Puno, el mal manejo de los residuos sólidos en el vertedero de Chilla representa un desafío ambiental considerable debido a la acumulación de lixiviados (Miao et al., 2019). Estos se originan por la descomposición anaeróbica de residuos expuestos al cielo abierto y a lluvias, lo cual facilita el contacto entre el agua y los residuos, generando un líquido que arrastra sustancias tóxicas, entre ellas diversos ácidos orgánicos volátiles (AOVs), que pueden migrar hacia el suelo y aguas subterráneas, comprometiendo la calidad ambiental y la salud pública (Golovko et al., 2022). Estos compuestos incluyen principalmente ácidos acético, propiónico y butírico, los cuales disminuyen el pH del entorno y aumentan la movilidad de metales pesados y otros contaminantes (Van Midden et al., 2023).

La formación y migración de ácidos en vertederos de residuos sólidos urbanos (RSU) representa una fuente relevante de contaminación ambiental. En el Perú, en el año 2023, se generaron aproximadamente 8,455,615 toneladas de RSU, lo que equivale a una producción diaria de 23,166 toneladas (Gestión & G, 2023). Según Arteaga et al. (2023), Chiclayo fue la ciudad más contaminada debido al mal manejo de estos residuos. Asimismo, en Juliaca, capital de la provincia de San Román en la región Puno, se genera un volumen aproximado de entre 180 y 210 toneladas de residuos sólidos al mes (Huamaní Montesinos et al., 2020).

La deficiente gestión de residuos sólidos en el botadero de Chilla ha propiciado la generación de lixiviados ácidos que, al migrar, contaminan tanto el suelo como las aguas subterráneas. Este fenómeno representa un riesgo significativo para la salud pública y el medio ambiente, afectando negativamente la calidad de vida de las comunidades. A pesar de la evidencia de contaminación, se requiere con urgencia la realización de estudios detallados que analicen los procesos de formación y migración de estos ácidos, con el fin de desarrollar estrategias efectivas y sostenibles para su mitigación (Haghnazar et al., 2021).

Islam y Singhal (2004) realizaron estudios utilizando estrategias para investigar el potencial de crear barreras de contención de desechos de baja permeabilidad. También llevaron a cabo experimentos con columnas que contenían arena y lixiviados de un vertedero, a través de los cuales observaron que los poros del suelo se obstruyeron. Esto redujo significativamente la capacidad del suelo para permitir el paso del agua, afectando toda la columna.

Por otro lado, VanGulck y Rowe (2004) realizaron experimentos en columnas bien controladas para examinar la relación entre los cambios en las concentraciones de ácidos grasos volátiles (AGV) y CO₂ en lixiviados sintéticos, en conjunto con la formación de una biopelícula activa y la acumulación de sólidos que obstruyen el espacio poroso de un material compuesto por microesferas de vidrio, del tamaño de la gravedad. Estos estudios brindan conocimientos más completos sobre la transformación de la materia orgánica disuelta (MOD) en plumas de aguas subterráneas, y pueden servir como referencia para el monitoreo y la remediación de la contaminación en aguas subterráneas.

Jiang et al. (2019) realizaron estudios sobre las causas por las cuales los lixiviados contaminan las aguas subterráneas. Para ello, utilizaron diversas técnicas, combinando análisis UV-vis, 3D-EMM PARAFAC y análisis hidroquímicos. Su principal objetivo fue comprender el papel que desempeñan los microorganismos en el movimiento y los cambios de la MOD.

Respecto al tratamiento de lixiviados, Abdel-Shafy et al. (2024) proponen cuatro grupos de tecnologías: (1) circulación y procesamiento conjunto con aguas residuales urbanas, (2) metodologías biológicas aeróbicas y anaeróbicas, (3) procesos físico-químicos (aireación, adsorción, oxidación, precipitación, coagulación/floculación y sedimentación/flotación), y (4) sistemas de membranas. Estas alternativas lograron un resultado un 5 % superior al anterior, todo ello con el fin de minimizar el impacto ambiental.

Por lo tanto, el manejo sostenible y la evaluación ecológica del tratamiento, la recolección y la eliminación de lixiviados son fundamentales para su reducción. Asimismo, El-Saadony et al. (2023) sugieren métodos y técnicas de tratamiento que permitan optimizar costos, como el pretratamiento de residuos y Tratamientos fisicoquímicos que ayudan a remover compuestos difíciles de degradar, ya que esto contribuiría a minimizar y mejorar la gestión de los RSU.

## Figura 1

*La imagen muestra claramente sobre el lixiviado, sus causas que ocasiona tanto para la* ***salud pública*** *como para el* ***medio ambiente****, siendo un foco de* ***riesgos sanitarios, ecológicos y agrícolas.***

Ilustración 1 lixiviados (El-Saadony et al., 2023b)

Según Gunarathne et al. (2024), estiman que en los años 2030 y 2050 la producción de residuos continuará con su tendencia ascendente a nivel mundial. En ese sentido, los autores sugieren la necesidad de buscar nuevas estrategias para reducir los RSU.

Finalmente, Heidari et al. (2019) realizaron estudios sobre la selección de tecnologías sostenibles para la disposición final de residuos en el tratamiento de RSU, empleando funciones objetivo diseñadas para mantener un equilibrio entre consideraciones económicas, ambientales y sociales, como la separación de residuos sólidos dentro del marco del sistema.

## Desarrollo

## La inadecuada gestión de residuos sólidos.

El mal manejo de los residuos sólidos provoca graves consecuencias ambientales como la contaminación del agua y del aire, la degradación de los suelos y el cambio climático. Estas problemáticas son generadas principalmente en países en desarrollo, como China, Estados Unidos, entre otros, así como en aquellos con economías frágiles. Esto se debe a que los RSU son desechados en vertederos a cielo abierto, lo que ocasiona severos problemas ambientales y de salud humana (Giusti, 2009). Asimismo, la eliminación inadecuada de residuos, especialmente cuando se realiza de manera ilegal, contribuye al agravamiento del cambio climático y a la aparición de enfermedades transmisibles por vectores, inhalación, ingestión o contacto dérmico con contaminantes. Estas dificultades se intensifican por la escasa integración sectorial, la limitada promoción, las restricciones financieras y la falta de investigación (Vinti et al., 2023).

Según estudios, el mundo genera anualmente 2,010 millones de toneladas de residuos sólidos, y se estima que esta cifra aumentará a 2,200 millones en 2025 y se duplicará para 2050. Esto representa una vulnerabilidad creciente frente al cambio climático. Sin embargo, aún existen oportunidades para abordar esta situación mediante la colaboración interdisciplinaria, la participación comunitaria y el fortalecimiento de políticas públicas. Asimismo, es necesario continuar con investigaciones que permitan comprender mejor el impacto de los residuos sólidos y formular propuestas eficaces para mejorar su gestión (Gebrekidan et al., 2024).

## Impacto ambiental de los lixiviados

Actualmente, los vertederos municipales son los más afectados por la acumulación de residuos sólidos urbanos. La filtración del agua de lluvia en los residuos en descomposición produce lixiviados altamente contaminantes, lo que plantea un desafío para su tratamiento debido a su toxicidad (Ma et al., 2022). Teng et al. (2021) señalan que, al descomponerse los residuos, la mezcla resultante con el agua de lluvia contiene elevadas concentraciones de sustancias peligrosas, como materia orgánica, metales pesados, sales y compuestos tóxicos, constituyendo una amenaza significativa para el medio ambiente.

Aunque existen diversos métodos para tratar estos lixiviados, todos presentan ventajas, desventajas y costos variables. Algunos contaminantes son difíciles de identificar de manera directa, por lo que su peligrosidad se evalúa mediante ensayos de ecotoxicidad. Por ello, es urgente aplicar métodos innovadores de tratamiento que puedan eliminar tanto los contaminantes principales como los más difíciles de rastrear. En este contexto, analizar los lixiviados desde una perspectiva química, microbiológica y ecotoxicológica resulta fundamental para evaluar con precisión el daño ambiental, además de orientar el desarrollo de tecnologías de tratamiento más eficaces (Tigini et al., 2014).

## La descomposición anaeróbica

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) representan un grupo de contaminantes preocupantes que se liberan como gases en los vertederos, cuya composición varía a medida que avanza la descomposición de los residuos. En este sentido, un grupo de investigadores llevó a cabo un experimento controlado utilizando residuos de vertedero e identificaron dos bacterias específicas: Sporanaerobacter acetigenes y Clostridium sporogenes. El objetivo fue analizar los gases emitidos por dichas bacterias. Ambas especies, al fermentar aminoácidos en ausencia de oxígeno, generaron más de 50 tipos diferentes de compuestos volátiles, cuyas concentraciones fueron evaluadas a lo largo del tiempo (Shao et al., 2021).

Por su parte, Bilgili et al. (2007) compararon el comportamiento de los vertederos gestionados con técnicas aeróbicas (con oxígeno) frente a los actuales métodos anaeróbicos (sin oxígeno). Para ello, utilizaron cuatro reactores de laboratorio: uno con recirculación de lixiviados, otro con aireación, uno más con aireación y recirculación combinadas, y un control. El monitoreo incluyó variables como pH, alcalinidad, sólidos disueltos totales, conductividad y potencial de oxidación-reducción. Como resultado, se concluyó que la recirculación de lixiviados favorece significativamente la degradación anaeróbica.

## La salud pública y los riesgos asociados

La adecuada gestión de los residuos sólidos municipales es esencial para proteger la salud humana, recuperar recursos y fomentar la sostenibilidad. Tradicionalmente, la estrategia principal ha sido el uso de vertederos, los cuales, debido a su baja capacidad de reciclaje, tienden a saturarse rápidamente. En consecuencia, se generan lixiviados no tratados que se filtran hacia las superficies circundantes (Khalil et al., 2018). En estudios posteriores, se realizaron muestreos de lixiviados que fueron analizados tanto química como biológicamente, obteniéndose resultados relevantes.

Liao et al. (2021) investigaron los compuestos orgánicos volátiles (COV), responsables de los malos olores durante el tratamiento de residuos, que afectan tanto al medio ambiente como a la salud humana. Para mitigar estos efectos, diseñaron una tecnología combinada que resultó ser una solución efectiva para reducir los impactos ecológicos y sanitarios.

Asimismo, se ha documentado que los residuos domésticos pueden contener microorganismos incluso antes de su recolección, lo cual incrementa el riesgo de exposición para los trabajadores encargados de esta labor. Por tal motivo, se llevaron a cabo evaluaciones de los riesgos asociados a dicha exposición, con el objetivo de establecer medidas preventivas. Los resultados obtenidos revelaron que estos trabajadores presentan problemas gastrointestinales, irritación ocular y cutánea, y síntomas del síndrome por polvo orgánico. Debido al cambio climático y al incremento del reciclaje, se prevé una mayor exposición a agentes biológicos como bacterias, hongos o virus (Madsen et al., 2021).

En años recientes, se ha evidenciado que muchas enfermedades se transmiten desde animales silvestres en contextos de contacto frecuente entre personas, animales y el medio ambiente. Uno de los principales focos de este contacto son los vertederos, donde se congregan ratas, aves, perros, insectos y otros animales. De acuerdo con investigaciones, se han identificado más de 390 especies en estos sitios, muchas de las cuales pueden portar bacterias, virus o parásitos que afectan la salud humana. Además, se han detectado microorganismos resistentes a medicamentos, lo que convierte a los vertederos en posibles focos de brotes de enfermedades peligrosas (Sangkachai et al., 2024).

## El cambio climático por los gases del vertedero

Este estudio analiza cómo los gases emitidos por los vertederos afectan el clima tanto a corto como a largo plazo. En particular, se enfoca en el metano, uno de los principales responsables del calentamiento global (Manheim et al., 2024a). Además, se consideran otros gases menos reconocidos, pero también relevantes como contaminantes. Para comprender mejor su impacto, se evaluaron cinco vertederos en California, encontrándose que la mayoría del daño climático se atribuye a estas instalaciones. En especial, se halló que el metano puede representar hasta el 99 % de las emisiones (Manheim et al., 2024b).

De manera complementaria, Hanson et al. (2023) investigaron dos aspectos clave: cómo los gases escapan de los vertederos y cómo diferentes tipos de cubiertas (tierra o plástico) influyen en la cantidad de gases liberados. Estos estudios permiten una comprensión más completa de los efectos de los vertederos sobre el cambio climático.

Por otro lado, Ramprasad et al. (2022) demostraron que el potencial energético de las emisiones es mayor cuando los residuos contienen altos niveles de materia orgánica biodegradable. Por lo tanto, el metano y el dióxido de carbono generados en los vertederos podrían utilizarse para la producción de energía, lo que constituiría una alternativa viable para minimizar el impacto climático de estos gases.

## Educación y conciencia ambiental en las personas

La educación ambiental representa una de las vías más efectivas para reducir el impacto negativo de los residuos sólidos sobre el entorno. Es fundamental empezar desde la niñez y juventud para formar generaciones con una conciencia sólida sobre la gestión sostenible de los residuos (Van de Wetering et al., 2022). En este sentido, Whitburn et al. (2023) realizaron investigaciones que evidencian cómo los paseos escolares a parques o áreas naturales fortalecen la conexión de los niños con la naturaleza y fomentan un comportamiento ambiental positivo.

De igual manera, Meyer (2015) argumenta que un mayor nivel educativo se asocia con actitudes más respetuosas hacia el medio ambiente. Por tanto, recomienda integrar la educación ambiental desde los niveles iniciales hasta los superiores. Una revisión sistemática de 105 estudios demostró que la educación ambiental tiene un efecto positivo sobre la conservación y la calidad ambiental (Ardoin et al., 2020).

En relación con la conciencia ambiental, Sánchez-Llorens et al. (2019) compararon estudiantes de primaria y secundaria, concluyendo que los estudiantes de primaria mostraban una mayor conciencia ambiental en dimensiones afectiva, cognitiva, conativa y activa.

A pesar de estos avances, persisten barreras que impiden la participación de comunidades marginadas en proyectos ambientales. Para superar estas dificultades, se diseñó el modelo de matriz de alerta comunitaria para la justicia ambiental en Pensilvania, el cual integra difusión comunitaria, participación ciudadana, investigación participativa y talleres de educación entre pares (Rickenbacker et al., 2019).

## Estrategias de sostenibilidad en la gestión de residuos

Los residuos sólidos multicapas, como los envases de snacks o productos congelados, representan un desafío ambiental debido a su difícil reciclaje y escasa degradabilidad. Frente a ello, Anwar et al. (2025) propusieron el enfoque de análisis de sostenibilidad multiaspecto, que incorpora dimensiones ambientales, económicas, sociales y de infraestructura. Según sus hallazgos, los países deben invertir en tecnología y promover la colaboración entre todos los sectores.

En cuanto a los residuos orgánicos —como restos de alimentos, plantas o desechos agrícolas—, los métodos más utilizados para reducir su impacto son el compostaje y la digestión anaeróbica, que los transforman en abono o energía. A pesar de ello, gran parte de estos residuos sigue siendo incinerada, desaprovechando su valor como fuente de nutrientes (Abdel-Shafy & Mansour, 2018).

Evode et al. (2021) sugieren soluciones prácticas para el manejo de plásticos, tales como reciclaje, incineración, pirolisis, biorremediación y campañas de concientización, con el fin de reducir su impacto ambiental. Por su parte, Zhang et al. (2021) indican que la implementación de sistemas integrados de gestión de residuos —incluyendo reciclaje, compostaje y recolección eficiente— puede reducir el cambio climático entre un 30 % y un 154 %. Estos autores también destacan la importancia de considerar factores no técnicos como la participación ciudadana y el contexto local.

Bello et al. (2022) revisan la gestión de residuos en zonas urbanas, donde predominan métodos tradicionales como vertederos e incineración. Si bien estos son económicos, pueden resultar perjudiciales si no se controlan adecuadamente. El estudio enfatiza que una gestión sostenible no solo debe mantener la limpieza, sino también proteger el ambiente, impulsar la economía y generar equidad social. Además, comprender el movimiento de contaminantes en el agua y el suelo permite adoptar soluciones más responsables.

Finalmente, Rajoo et al. (2020) diseñaron el indicador IPLDC para evaluar con mayor precisión la contaminación por lixiviados, dado que el índice anterior presentaba limitaciones. Este nuevo indicador fue probado con datos reales de Malasia y otros países en desarrollo, y resultó más preciso al incorporar factores previamente ignorados.

## Conclusión

En conclusión, este artículo permite comprender que la inadecuada gestión de los RSU, especialmente en ciudades en desarrollo como Juliaca, representa un reto urgente tanto para la salud pública como para el medio ambiente. La generación de lixiviados ácidos y gases contaminantes en vertederos no controlados, como el de Chilla, altera el pH del entorno y favorece la movilidad de metales pesados. Asimismo, la descomposición anaeróbica de residuos emite metano, contribuyendo significativamente al cambio climático.

Diversos estudios han demostrado la eficacia de técnicas de tratamiento físico-químico y biológico, así como el monitoreo con columnas, aunque los costos y la complejidad limitan su aplicación generalizada. Por ello, resulta clave promover la educación ambiental a todos los niveles y fortalecer la conciencia ciudadana para lograr una gestión más responsable de los residuos.

Este tema es de suma importancia para la protección de la salud pública, la sostenibilidad ambiental y la seguridad hídrica, especialmente en contextos urbanos de países en desarrollo donde la urbanización supera la capacidad de gestión de residuos. El caso de Juliaca ejemplifica cómo la falta de infraestructura y políticas adecuadas intensifica los impactos negativos sobre el ecosistema y la comunidad.

Además de las estrategias expuestas, se propone reforzar la educación ambiental desde edades tempranas mediante actividades vivenciales. También se sugiere impulsar la economía circular mediante reciclar todos los residuos sólidos para poder refabricar nuevos productos llamativos y con buenos acabados, como pulseras, llaveros, collar, imágenes de neveras echo con tapas, entre otros. ya que esto también generaría empleos. reutilización de desechos orgánicos para compostaje y producción de biogás, contribuyendo así a una economía sostenible y a la reducción de residuos.

#### Referencias

Abdel-Shafy, H. I., Ibrahim, A. M., Al-Sulaiman, A. M., & Okasha, R. A. (2024). Landfill leachate: Sources, nature, organic composition, and treatment: An environmental overview. *Ain Shams Engineering Journal*, *15*(1), 102293. https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2023.102293

Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2018). Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*, *27*(4), 1275–1290. https://doi.org/10.1016/J.EJPE.2018.07.003

Anwar, M. A., Suprihatin, S., Sasongko, N. A., Najib, M., Pranoto, B., Firmansyah, I., & Soekotjo, E. S. (2025). Sustainable waste management strategies for multilayer plastic in Indonesia. *Cleaner and Responsible Consumption*, *16*, 100254. https://doi.org/10.1016/J.CLRC.2025.100254

Ardoin, N. M., Bowers, A. W., & Gaillard, E. (2020). Environmental education outcomes for conservation: A systematic review. *Biological Conservation*, *241*, 108224. https://doi.org/10.1016/J.BIOCON.2019.108224

Arteaga, C., Silva, J., & Yarasca-Aybar, C. (2023). Solid waste management and urban environmental quality of public space in Chiclayo, Peru. *City and Environment Interactions*, *20*, 100112. https://doi.org/10.1016/J.CACINT.2023.100112

Bello, A. S., Al-Ghouti, M. A., & Abu-Dieyeh, M. H. (2022). Sustainable and long-term management of municipal solid waste: A review. *Bioresource Technology Reports*, *18*, 101067. https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2022.101067

Bilgili, M. S., Demir, A., & Özkaya, B. (2007). Influence of leachate recirculation on aerobic and anaerobic decomposition of solid wastes. *Journal of Hazardous Materials*, *143*(1–2), 177–183. https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2006.09.012

El-Saadony, M. T., Saad, A. M., El-Wafai, N. A., Abou-Aly, H. E., Salem, H. M., Soliman, S. M., Abd El-Mageed, T. A., Elrys, A. S., Selim, S., Abd El-Hack, M. E., Kappachery, S., El-Tarabily, K. A., & AbuQamar, S. F. (2023a). Hazardous wastes and management strategies of landfill leachates: A comprehensive review. *Environmental Technology & Innovation*, *31*, 103150. https://doi.org/10.1016/J.ETI.2023.103150

El-Saadony, M. T., Saad, A. M., El-Wafai, N. A., Abou-Aly, H. E., Salem, H. M., Soliman, S. M., Abd El-Mageed, T. A., Elrys, A. S., Selim, S., Abd El-Hack, M. E., Kappachery, S., El-Tarabily, K. A., & AbuQamar, S. F. (2023b). Hazardous wastes and management strategies of landfill leachates: A comprehensive review. *Environmental Technology & Innovation*, *31*, 103150. https://doi.org/10.1016/J.ETI.2023.103150

Evode, N., Qamar, S. A., Bilal, M., Barceló, D., & Iqbal, H. M. N. (2021). Plastic waste and its management strategies for environmental sustainability. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *4*, 100142. https://doi.org/10.1016/J.CSCEE.2021.100142

Gebrekidan, T. K., Weldemariam, N. G., Hidru, H. D., Gebremedhin, G. G., & Weldemariam, A. K. (2024). Impact of improper municipal solid waste management on fostering One Health approach in Ethiopia — challenges and opportunities: a systematic review. *Science in One Health*, *3*, 100081. https://doi.org/10.1016/J.SOH.2024.100081

GESTIÓN, N., & GESTIÓN, N. (2023). Gestión de residuos sólidos en Perú: ¿cuál es el avance y lo que plantea el Minam? | Giuliana Becerra | plantas de tratamiento de residuos sólidos | plantas de valorización de residuos sólidos | OEFA | PERU. *Gestión*. https://gestion.pe/peru/gestion-de-residuos-solidos-en-peru-cual-es-el-avance-y-lo-que-plantea-el-minam-giuliana-becerra-plantas-de-tratamiento-de-residuos-solidos-plantas-de-valorizacion-de-residuos-solidos-oefa-noticia/

Giusti, L. (2009). A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste Management*, *29*(8), 2227–2239. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2009.03.028

Golovko, O., Ahrens, L., Schelin, J., Sörengård, M., Bergstrand, K. J., Asp, H., Hultberg, M., & Wiberg, K. (2022). Organic micropollutants, heavy metals and pathogens in anaerobic digestate based on food waste. *Journal of Environmental Management*, *313*. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114997

Gunarathne, V., Phillips, A. J., Zanoletti, A., Rajapaksha, A. U., Vithanage, M., Di Maria, F., Pivato, A., Korzeniewska, E., & Bontempi, E. (2024). Environmental pitfalls and associated human health risks and ecological impacts from landfill leachate contaminants: Current evidence, recommended interventions and future directions. *Science of The Total Environment*, *912*, 169026. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.169026

Haghnazar, H., Hudson-Edwards, K. A., Kumar, V., Pourakbar, M., Mahdavianpour, M., & Aghayani, E. (2021). Potentially toxic elements contamination in surface sediment and indigenous aquatic macrophytes of the Bahmanshir River, Iran: Appraisal of phytoremediation capability. *Chemosphere*, *285*, 131446. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.131446

Hanson, J. L., Manheim, D. C., & Yeşiller, N. (2023). Geoenvironmental assessment of climate impacts from landfill gas emissions. *Soils and Foundations*, *63*(2), 101279. https://doi.org/10.1016/J.SANDF.2023.101279

Heidari, R., Yazdanparast, R., & Jabbarzadeh, A. (2019). Sustainable design of a municipal solid waste management system considering waste separators: A real-world application. *Sustainable Cities and Society*, *47*, 101457. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2019.101457

Huamaní Montesinos, C., Tudela Mamani, J. W., Huamaní Peralta, A., Huamaní Montesinos, C., Tudela Mamani, J. W., & Huamaní Peralta, A. (2020). Gestión de residuos sólidos de la ciudad de Juliaca - Puno - Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, *22*(1), 106–115. https://doi.org/10.18271/RIA.2020.541

Islam, J., & Singhal, N. (2004). A laboratory study of landfill-leachate transport in soils. *Water Research*, *38*(8), 2035–2042. https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2004.01.024

Jiang, Y., Li, R., Yang, Y., Yu, M., Xi, B., Li, M., Xu, Z., Gao, S., & Yang, C. (2019). Migration and evolution of dissolved organic matter in landfill leachate-contaminated groundwater plume. *Resources, Conservation and Recycling*, *151*, 104463. https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.104463

Khalil, C., Al Hageh, C., Korfali, S., & Khnayzer, R. S. (2018). Municipal leachates health risks: Chemical and cytotoxicity assessment from regulated and unregulated municipal dumpsites in Lebanon. *Chemosphere*, *208*, 1–13. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.05.151

Liao, W., Liang, Z., Yu, Y., Li, G., Li, Y., & An, T. (2021). Pollution profiles, removal performance and health risk reduction of malodorous volatile organic compounds emitted from municipal leachate treating process. *Journal of Cleaner Production*, *315*, 128141. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.128141

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

Madsen, A. M., Raulf, M., Duquenne, P., Graff, P., Cyprowski, M., Beswick, A., Laitinen, S., Rasmussen, P. U., Hinker, M., Kolk, A., Górny, R. L., Oppliger, A., & Crook, B. (2021). Review of biological risks associated with the collection of municipal wastes. *Science of The Total Environment*, *791*, 148287. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.148287

Manheim, D. C., Yeşiller, N., Hanson, J. L., & Blake, D. R. (2024a). Climate impacts of landfill gas emissions: Analysis for 20-year and 100-year time horizons. *Waste Management*, *186*, 318–330. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2024.06.015

Manheim, D. C., Yeşiller, N., Hanson, J. L., & Blake, D. R. (2024b). Climate impacts of landfill gas emissions: Analysis for 20-year and 100-year time horizons. *Waste Management*, *186*, 318–330. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2024.06.015

Margallo, M., Ziegler-Rodriguez, K., Vázquez-Rowe, I., Aldaco, R., Irabien, Á., & Kahhat, R. (2019). Enhancing waste management strategies in Latin America under a holistic environmental assessment perspective: A review for policy support. *Science of The Total Environment*, *689*, 1255–1275. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.06.393

Meyer, A. (2015). Does education increase pro-environmental behavior? Evidence from Europe. *Ecological Economics*, *116*, 108–121. https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2015.04.018

Miao, L., Yang, G., Tao, T., & Peng, Y. (2019). Recent advances in nitrogen removal from landfill leachate using biological treatments – A review. *Journal of Environmental Management*, *235*, 178–185. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.01.057

Rajoo, K. S., Karam, D. S., Ismail, A., & Arifin, A. (2020). Evaluating the leachate contamination impact of landfills and open dumpsites from developing countries using the proposed Leachate Pollution Index for Developing Countries (LPIDC). *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *14*, 100372. https://doi.org/10.1016/J.ENMM.2020.100372

Ramprasad, C., Teja, H. C., Gowtham, V., & Vikas, V. (2022). Quantification of landfill gas emissions and energy production potential in Tirupati Municipal solid waste disposal site by LandGEM mathematical model. *MethodsX*, *9*, 101869. https://doi.org/10.1016/J.MEX.2022.101869

Rickenbacker, H., Brown, F., & Bilec, M. (2019). Creating environmental consciousness in underserved communities: Implementation and outcomes of community-based environmental justice and air pollution research. *Sustainable Cities and Society*, *47*, 101473. https://doi.org/10.1016/J.SCS.2019.101473

Sánchez-Llorens, S., Agulló-Torres, A., Del Campo-Gomis, F. J., & Martinez-Poveda, A. (2019). Environmental consciousness differences between primary and secondary school students. *Journal of Cleaner Production*, *227*, 712–723. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.04.251

Sangkachai, N., Gummow, B., Hayakijkosol, O., Suwanpakdee, S., & Wiratsudakul, A. (2024). A review of risk factors at the human-animal-environmental interface of garbage dumps that are driving current and emerging zoonotic diseases. *One Health*, *19*, 100915. https://doi.org/10.1016/J.ONEHLT.2024.100915

Shao, Y., Xia, M., Liu, J., Liu, X., & Li, Z. (2021). Composition and profiles of volatile organic compounds during waste decomposition by the anaerobic bacteria purified from landfill. *Waste Management*, *126*, 466–475. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.03.038

Teng, C., Zhou, K., Peng, C., & Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: A review. *Water Research*, *203*, 117525. https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2021.117525

Tigini, V., Prigione, V., & Varese, G. C. (2014). Mycological and ecotoxicological characterisation of landfill leachate before and after traditional treatments. *Science of The Total Environment*, *487*(1), 335–341. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2014.04.026

van de Wetering, J., Leijten, P., Spitzer, J., & Thomaes, S. (2022). Does environmental education benefit environmental outcomes in children and adolescents? A meta-analysis. *Journal of Environmental Psychology*, *81*, 101782. https://doi.org/10.1016/J.JENVP.2022.101782

van Midden, C., Harris, J., Shaw, L., Sizmur, T., & Pawlett, M. (2023). The impact of anaerobic digestate on soil life: A review. In *Applied Soil Ecology* (Vol. 191). https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105066

VanGulck, J. F., & Rowe, R. K. (2004). Evolution of clog formation with time in columns permeated with synthetic landfill leachate. *Journal of Contaminant Hydrology*, *75*(1–2), 115–139. https://doi.org/10.1016/J.JCONHYD.2004.06.001

Vinti, G., Bauza, V., Clasen, T., Tudor, T., Zurbrügg, C., & Vaccari, M. (2023). Health risks of solid waste management practices in rural Ghana: A semi-quantitative approach toward a solid waste safety plan. *Environmental Research*, *216*, 114728. https://doi.org/10.1016/J.ENVRES.2022.114728

Whitburn, J., Abrahamse, W., & Linklater, W. (2023). Do environmental education fieldtrips strengthen children’s connection to nature and promote environmental behaviour or wellbeing? *Current Research in Ecological and Social Psychology*, *5*, 100163. https://doi.org/10.1016/J.CRESP.2023.100163

Zhang, J., Qin, Q., Li, G., & Tseng, C. H. (2021). Sustainable municipal waste management strategies through life cycle assessment method: A review. *Journal of Environmental Management*, *287*, 112238. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112238

Ziegler-Rodriguez, K., Margallo, M., Aldaco, R., Vázquez-Rowe, I., & Kahhat, R. (2019). Transitioning from open dumpsters to landfilling in Peru: Environmental benefits and challenges from a life-cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, *229*, 989–1003. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.05.015