

20

Fecha de presentación: junio, 2024
Fecha de aceptación: noviembre, 2024
Fecha de publicación: diciembre, 2024

CARACTERIZACIÓN

DE SUELO DE VERTEDERO CONTAMINADO CON LIXIVIADOS EN
COMPARACIÓN CON SUELO NO CONTAMINADO

CHARACTERIZATION OF LANDFILL SOIL CONTAMINATED WITH LEACHATE IN COMPARISON WITH UNCONTAMINATED SOIL

Yesenia Mendoza-Burguete ^{1*}

E-mail: maria.yesenia.mendoza@uaq.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4097-833X>

Juvenal Rodríguez-Resendíz ¹

E-mail: juvenal.rodriguez@uaq.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8598-5600>

Mónica López-Velarde Santos ¹

E-mail: monica.lopez.velarde.santos@uaq.mx

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1236-3172>

Jaime Moroni Mora-Muñoz ¹

E-mail: jaime.mora@uaq.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7237-1121>

José Alberto Rodríguez Morales^{1*}

E-mail: jose.alberto.rodriguez@uaq.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4532-9665>

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Querétaro, Qro.
México.

*Autor para correspondencia

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Mendoza-Burguete, Y., Rodríguez-Resendíz, J., López-Velarde Santos, M., Mora-Muñoz, J. M. & Rodríguez Morales, J. A. (2024). Caracterización de Suelo de Vertedero Contaminado con Lixiviados en Comparación con Suelo no Contaminado. *Universidad y Sociedad* 16 (S2). 186-197.

RESUMEN

Este estudio evalúa el impacto de los lixiviados de vertederos en la calidad fisicoquímica y microbiológica del suelo, comparando un suelo contaminado (SCL) con uno no contaminado (SNC). El SCL muestra altos niveles de humedad (22.67 %), salinidad (19.705 dS/m), materia orgánica (6.2 %) y metales pesados como arsénico (34.28 mg/kg) y mercurio (0.49 mg/kg), superando los límites máximos permisibles. Microbiológicamente, el SCL está dominado por *Cytobacillus firmus* (27 %), mientras que el SNC presenta mayor presencia de *Pseudomonas oleovorans* (53 %), evidenciando la adaptación microbiana al estrés químico. Los resultados destacan cómo los lixiviados acumulan contaminantes, alteran comunidades microbianas y limitan el uso agrícola del suelo, pero también muestran el potencial de microorganismos adaptados como agentes biorremediadores. Este estudio enfatiza la necesidad de gestionar adecuadamente los residuos sólidos urbanos y desarrollar estrategias para restaurar suelos y mitigar riesgos ecológicos.

Palabras clave: Caracterización de suelos, Diversidad microbiana, Metales pesados, Vertederos.

ABSTRACT

This study evaluates the effects of landfill leachate on the physicochemical and microbiological quality of the soil, comparing a contaminated soil (SCL) with a non-contaminated soil (SNC). The SCL has high levels of moisture (22.67%), salinity (19.705 dS/m), organic matter (6.2%) and heavy metals such as arsenic (34.28 mg/kg) and mercury (0.49 mg/kg), which exceed the maximum permitted levels. Microbiologically, the SCL is dominated by *Cytobacillus firmus* (27 %), while the SNC shows a higher presence of *Pseudomonas oleovorans* (53 %), indicating microbial adaptation to chemical stress. The results illustrate how leachates accumulate pollutants, alter microbial communities and limit the agricultural use of the soil, but also show the potential of adapted microorganisms as bioremediation agents. This study

emphasizes the need for proper management of municipal solid waste and the development of strategies to remediate soils and mitigate ecological risks.

Keywords: Soil characterization, Microbial diversity, Heavy metals, Landfill sites.

INTRODUCCIÓN

Con el acelerado proceso de urbanización y el aumento poblacional, la generación de residuos sólidos urbanos (RSU) en las ciudades ha experimentado un notable incremento. Los lixiviados, que se originan a partir de los RSU, representan una forma líquida altamente contaminante que impacta negativamente los recursos naturales, como el agua subterránea y superficial, además de afectar en la salud pública y la higiene ambiental. Este líquido contaminado proviene de residuos sólidos, como los acumulados en vertederos, y está compuesto por partículas suspendidas y sustancias orgánicas e inorgánicas disueltas.

La composición de los lixiviados varía según las características de los residuos depositados, los procesos químicos y biológicos involucrados en su degradación, y la cantidad de agua presente en los desechos. La generación de lixiviado con cargas altas de contaminante es crítica por la falta de prácticas adecuadas de recolección, clasificación y disposición de RSU. Su dispersión representa un riesgo significativo para la calidad del suelo y de las aguas subterráneas (Becerra-Moreno et al., 2021). En países como México, el problema es más crítico debido a la ausencia de sistemas efectivos para recolectar, separar y tratar lixiviados en los vertederos. Por ello, es crucial implementar medidas efectivas de tratamiento y remediación que prevengan la contaminación de los suelos y acuíferos subyacentes.

En México, los vertederos a cielo abierto carecen tanto de sistemas de barrera o revestimiento como de infraestructura para la recolección de lixiviados, lo que facilita su infiltración hacia las aguas subterráneas. Estos vertederos suelen ubicarse en suelos permeables con capas freáticas poco profundas, incrementando el riesgo de contaminación de acuíferos. Aunque las regulaciones sobre el manejo de residuos sólidos municipales recomiendan la recolección y tratamiento de lixiviados, no existe actualmente una supervisión efectiva que obligue a los operadores de vertederos a implementar estas medidas, lo que agrava la contaminación del suelo.

Por el contrario, los rellenos sanitarios están regulados bajo Normas Oficiales Mexicanas, que establecen lineamientos específicos para la protección ambiental para la correcta operación de sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos. Estas normativas son supervisadas por instituciones gubernamentales con el objetivo de salvaguardar el suelo destinado a estas actividades. En los países desarrollados, además, se han implementado normativas estrictas que regulan la recolección, contención, tratamiento y disposición de lixiviados, incluyendo el monitoreo de aguas superficiales y subterráneas en las áreas cercanas a los vertederos (Naveen et al., 2017).

Los lixiviados generados en vertederos contienen una amplia variedad de compuestos peligrosos, entre ellos aromáticos, sustancias halogenadas, fenoles, pesticidas y metales pesados (Yu et al., 2020). Estos contaminantes representan una seria amenaza para la salud humana, los ecosistemas acuáticos y las cadenas tróficas, alterando su equilibrio ecológico. Además, la interacción de los lixiviados con ligandos orgánicos y materiales coloidales en el suelo influye significativamente en su movilidad y en los procesos de atenuación (Qiao et al., 2024). Por ello, es crucial llevar a cabo evaluaciones detalladas de la calidad de los lixiviados provenientes de RSU.

Las condiciones fisicoquímicas del entorno y las comunidades microbianas desempeñan un papel clave en la transformación de compuestos orgánicos e inorgánicos, favoreciendo su descomposición y mineralización, lo que resulta esencial para su tratamiento. Sin embargo, la presencia de metales pesados en los lixiviados genera toxicidad que afecta negativamente el desarrollo de microflora beneficiosa, la cual es vital para la degradación de contaminantes. El análisis de la composición microbiana, tanto a nivel morfológico como funcional, permite identificar y caracterizar aquellas comunidades capaces de participar en la remediación de lixiviados. En particular, diversas cepas bacterianas han demostrado un potencial significativo para ser utilizadas en tratamientos in situ.

La heterogeneidad de los residuos sólidos urbanos también implica la presencia de sustancias orgánicas no biodegradables en los lixiviados, lo que resalta la importancia de emplear índices de contaminación como herramientas para evaluar y monitorear rápidamente su calidad (Velvizhi et al., 2020). Este problema ha despertado gran interés en países en desarrollo como México, donde su toxicidad y efectos ambientales adversos representan

un desafío crítico, mientras que, en países desarrollados, aunque en menor medida, también se reconoce su impacto negativo en el entorno natural.

Esta investigación tiene como propósito principal analizar y caracterizar dos tipos de suelos. Suelo Contaminado con Lixiviado (SCL) y Suelo No Contaminado (SNC), utilizando metodologías fisicoquímicas y biológicas. Los resultados obtenidos proporcionan una herramienta valiosa para evaluar la calidad de los suelos y su nivel de vulnerabilidad ante la contaminación. Además, este estudio busca sentar las bases para implementar estrategias eficaces de tratamiento de lixiviados, contribuyendo así a mitigar su impacto negativo en el medio ambiente. Su relevancia radica en ofrecer un enfoque integral que pueda servir como referencia en la gestión sostenible de suelos y la protección de recursos naturales.

La relevancia de este estudio trasciende el ámbito científico, ya que tiene implicaciones directas en el bienestar de la sociedad. Al evidenciar los riesgos ambientales asociados a la gestión incorrecta de lixiviados, subraya la urgencia de implementar medidas preventivas y correctivas en los vertederos y rellenos sanitarios. La contaminación del suelo y de los cuerpos de agua subterráneos afecta no solo a los ecosistemas, sino también a la salud humana, la agricultura y los recursos hídricos, que son esenciales para el desarrollo sostenible. Este trabajo destaca la necesidad de fortalecer la supervisión y cumplimiento de normativas ambientales en México y en países en desarrollo, así como de fomentar la participación ciudadana en la gestión adecuada de residuos. Al comprender los impactos de los lixiviados y las soluciones basadas en la ciencia, la sociedad puede tomar decisiones objetivas y adoptar acciones colectivas para proteger los recursos naturales y garantizar un futuro ambientalmente responsable.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El vertedero, ubicado en el noreste del centro de México, ha servido como sitio de disposición para los residuos sólidos urbanos generados por las ciudades aledañas. La región presenta un clima semiárido, con una temperatura promedio anual que oscila entre 16.7 y 19 °C, y una precipitación media anual de 576 mm. La temporada de lluvias se concentra principalmente entre junio y septiembre, caracterizándose por lluvias moderadas que constituyen la mayor parte de las precipitaciones anuales. El área experimenta un clima típico de zonas semiáridas, con días cálidos y noches frescas.

Aunque el vertedero está oficialmente cerrado, los habitantes de comunidades cercanas continúan depositando residuos sólidos urbanos en el lugar. Esta actividad ha generado pendientes pronunciadas e inestables, además de la acumulación de lixiviados en la masa de residuos y la escorrentía de estos contaminantes hacia el entorno.

Muestreo y análisis físico-químico

La Figura 1 presenta (a) los puntos de muestreo identificados mediante el mapa de Google. El punto SCL corresponde a la zona de muestreo dentro de la zona del vertedero, representando el suelo contaminado con lixiviados, mientras que el punto SNC indica el área de muestreo del suelo no contaminado, ubicada a pocos metros de la zona de RSU.

Debido a tensiones en las comunidades locales, el acceso al sitio fue restringido, imposibilitando posteriores muestreos In Situ. No obstante, se obtienen muestras compuestas que resultan trasladadas en dos cajas de madera de 1 m³ cada una: una contiene SCL y la otra SNC. Estas muestras fueron llevadas a una zona restringida para su análisis. El pH y la conductividad eléctrica (CE) se midieron en el momento de la recolección y posteriormente durante el monitoreo en el sitio de resguardo, utilizando un medidor digital portátil de pH con electrodo plano (HANNA Instruments, modelo HI98191) y un medidor digital de CE (HACH, modelo HQ40D).

Las muestras enviadas para análisis de metales pesados fueron conservadas en cajas refrigeradas a temperaturas inferiores a 5 °C y enviadas a un laboratorio especializado. Los análisis fisicoquímicos se realizaron siguiendo las directrices de la Norma Oficial Mexicana, NOM-021-RECNAT-2000, NORMA, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, mientras que los análisis biológicos se llevaron a cabo mediante métodos estándar para determinar Unidades Formadoras de Colonia en Agar Soya Trypticaseína, con la Norma Oficial Mexicana NOM-110-SSA1-1994, bienes y servicios, preparación y dilución de muestras de alimentos para su análisis microbiológico.

Fig 1. Vista aérea del mapa de Google y las zonas de muestreo de SCL y SNC.



Fuente: Google Maps. Link: https://www.google.com/intl/es_all/permissions/geoguidelines/, n.d.

Análisis microbiológico

Dilución seriada

Se tomaron 0.5 g de SCL y de SNC para llevar a cabo el análisis microbiológico. Las muestras fueron sometidas a un proceso de dilución seriada, abarcando diluciones desde 1×10^1 hasta 1×10^7 . El procedimiento se realizó siguiendo protocolos estándares de microbiología para garantizar la precisión de los resultados obtenidos. Todas las operaciones se efectuaron en condiciones asépticas dentro de una campana de flujo laminar, con el fin de minimizar la contaminación cruzada y preservar la integridad microbiológica de las muestras.

Extracción de ADN y secuenciación

La purificación del ADN metagenómico se llevó a cabo utilizando el kit ZymoBIOMICSTM de Zymo Research (California, EE.UU.). La integridad del ADN fue verificada mediante electroforesis en gel de agarosa al 1 %, lo que permitió confirmar la calidad de las muestras y obtener colonias bacterianas.

El ADN metagenómico aislado de las muestras, derivado del método de cultivo de colonias bacterianas, fue procesado y secuenciado mediante el servicio de secuenciación metagenómica de ZymoBIOMICS. Para la construcción de la biblioteca de ADN, se emplearon adaptadores Nextera® y la secuenciación se realizó en la plataforma NovaSeq® (Illumina, San Diego, CA, EE.UU.) (Mena et al., 2024).

El análisis bioinformático de las muestras de SCL y SNC se realizó utilizando la plataforma Bacterial and Viral Bioinformatics Resource Center (BV-BRC). Las secuencias correspondientes a SCL se etiquetaron como 1_R1 y 1_R2, mientras que las de SNC se identificaron como 2_R1 y 2_R2. Se activó la herramienta de recorte para eliminar adaptadores y secuencias de baja calidad, asegurando que los análisis posteriores incluyeran únicamente datos de alta calidad.

Tras el recorte, los resultados fueron nuevamente cargados en la plataforma, esta vez utilizando la opción de filtro emparejado para garantizar lecturas pareadas de alta fidelidad. Finalmente, se realizó una clasificación taxonómica y metagenómica mediante las herramientas de clasificación de BV-BRC, lo que permitió identificar las lecturas en

diferentes niveles taxonómicos y obtener una descripción detallada de la composición microbiana en cada tipo de suelo (Olson et al., 2023).

RESULTADOS-DISCUSIÓN

Análisis de parámetros fisicoquímicos

Diversos factores, como la composición de los RSU, el tiempo transcurrido, la temperatura, la humedad, así como los niveles de macro y micronutrientes, son muy importantes en la determinación de la composición y el equilibrio del suelo. La calidad del lixiviado puede variar significativamente incluso cuando se gestionan residuos de composiciones similares, especialmente en vertederos localizados en regiones con diferentes condiciones climáticas (Parvin & Tareq, 2021). Asimismo, las prácticas operativas implementadas en los vertederos influyen notablemente en las características de los lixiviados generados que, a su vez, afecta al suelo que lo contiene.

La tabla 1 muestra los resultados sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo contaminado con lixiviado (SCL) y del suelo no contaminado (SNC) visualizando claramente la diferencia en las propiedades de cada suelo.

Tabla1. Resultados fisicoquímicos de SCL y SNC.

Características	SCL	SNC
Conductividad, mS/cm	19.705	4.15
pH	7.45	7.96
Nitrógeno Total, mg/Kg	3100	310
Fósforo, mg/Kg	13.63	7.72
Potasio, mg/Kg	640.15	512.13
Materia orgánica, %	6.2	0.96
Carbono orgánico, %	1.28	0.56
Nitratos, mg/Kg	0.93	65.39
Nitrógeno amoniacal, mg/Kg	9.89	81.23
Cationes intercambiables de suelo, mol(+)/Kg	129.92	24.36
Calcio, mg/Kg	3322.66	4595.58
Magnesio, mg/Kg	546.78	366.97
Azufre, mg/Kg	524.59	124.11
Humedad, %	22.67	1.99
Densidad Real, g/ml	2.23	2.2
Densidad relativa, g/ml	1.65	1.26
Temperatura, °C	26.25	26.75
Densidad de partícula, g/ml	2.27	2.77
Porosidad, %	51.11	54.435
Color Musell, no unit	negro	gris oscuro
Arsénico, mg/Kg	93.7	0.012
Cadmio, mg/Kg	0.08	0.02
Cobre, mg/Kg	4.9	0.086
Cromo, mg/Kg	12	0.034
Mercurio, mg/Kg	1284.7	0.02
Plomo, mg/Kg	6.38	0.522

Fuente: Elaboración propia.

Conductividad eléctrica (CE)

La conductividad eléctrica del SCL alcanza un valor de 19.705 mS/cm, significativamente mayor al registrado en el SNC, que fue de 4.15. Esta notable diferencia evidencia el impacto que ha tenido el lixiviado en SCL, en contraste con las condiciones naturales del SNC, las cuales presentan una menor acumulación de sales y reflejan un ambiente menos afectado por la contaminación.

El exceso de sales en el suelo tiene efectos adversos sobre las plantas, ya que dificulta la absorción de agua y nutrientes esenciales, lo que a su vez reduce la fertilidad y productividad del suelo. La conductividad eléctrica está directamente influida por la concentración total de compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos, siendo un indicador clave para evaluar la salinidad y el contenido mineral del lixiviado. Asimismo, este parámetro proporciona información sobre la carga contaminante total asociada al lixiviado.

La alta conductividad observada en SCL se atribuye a la presencia elevada de cationes como potasio, sodio y amonio, así como de aniones como cloruros, nitratos y sulfatos. Estos iones son responsables del incremento en los niveles de salinidad del suelo, exacerbando las condiciones de estrés hídrico para las plantas y aumentando la degradación de las propiedades edáficas del suelo contaminado.

pH

El pH registrado en SCL es de 7.45, mientras que en el SNC es de 7.96. Ambos valores se encuentran dentro del rango neutro, aunque el SNC muestra una ligera tendencia hacia la alcalinidad. Estos resultados sugieren que, aunque el lixiviado no ha provocado una acidificación significativa del suelo, las condiciones neutras observadas en ambos suelos son favorables para la actividad biológica y la disponibilidad de nutrientes esenciales.

En sistemas de residuos sólidos urbanos (RSU), una de las reacciones principales es la descomposición de materiales orgánicos, que produce dióxido de carbono (CO_2) y pequeñas cantidades de amoníaco. Este amoníaco se convierte en iones amonio y ácido carbónico, los cuales tienen un impacto directo sobre el pH del sistema. El ácido carbónico, al disociarse, genera iones hidrógeno y bicarbonato, influyendo en los niveles de pH. Además, el pH está influido por la presión parcial del CO_2 .

Un pH inferior a 7 está asociado con sistemas más blandos, donde predominan ácidos como el carbónico, húmico y fúlvico, además de otros compuestos orgánicos. Por otro lado, un pH superior a 7 refleja la capacidad del sistema para tolerar una mayor carga de sustancias

disueltas, condición que también favorece la vida vegetal. Un pH alcalino puede ser indicativo de un vertedero en estado de madurez, lo que refleja procesos estabilizados en la degradación de los residuos orgánicos (Wdowczyk & Szymańska-Pulikowska, 2021).

Nitrógeno total

Con una diferencia significativa obtenida, el SCL de 3100 mg/Kg y SNC 310 mg/Kg. El nitrógeno total, un macronutriente clave para las plantas, es significativamente mayor en el SCL debido al aporte de compuestos nitrogenados provenientes del lixiviado. Aunque niveles altos de nitrógeno pueden ser beneficiosos, también aumentan el riesgo de lixiviación hacia cuerpos de agua cercanos, causando eutrofización (Miao et al., 2019a).

Fósforo

Ambos suelos presentan valores similares de fósforo, siendo para SCL 13.63 mg/Kg, mientras que para SNC fue de 7.72 mg/Kg, sugiere que la contaminación por lixiviado no ha afectado de manera considerable la concentración de este nutriente esencial para el desarrollo de raíces y la fotosíntesis (Yu et al., 2020).

Potasio

Los niveles más altos de potasio en el SCL con 640 mg/Kg en comparación son SNC con 512.13 mg/Kg, indican una mayor liberación de este nutriente debido a la descomposición de materiales presentes en los lixiviados. Aunque el potasio es crucial para la regulación hídrica en las plantas, su exceso podría desequilibrar la nutrición del suelo (Naveen et al., 2017).

Materia Orgánica y carbono orgánico

El SCL presenta un contenido significativamente mayor en ambas determinaciones. En materia orgánica en SCL se obtuvo 6.2 % y en SNC 0.96 %, en carbono orgánico, el SCL fue de 1.28 % y en SNC 0.56 %, esta diferencia es debido a los residuos orgánicos presentes en los lixiviados. Esto podría mejorar la capacidad de retención de agua del suelo, pero también implica una posible acumulación de compuestos tóxicos o difícilmente degradables (Liu et al., 2020).

Nitratos

El contenido notablemente bajo de nitratos en SCL, con un valor de 0.93 mg/kg, en comparación con SNC, que muestra 65.39 mg/kg, puede explicarse por la transformación del nitrógeno hacia formas menos oxidadas como el amonio. Este fenómeno se asocia con las condiciones anaeróbicas o reductoras presentes en suelos contaminados por lixiviados, donde la descomposición de materia

orgánica y la actividad microbiológica generan un entorno químico que favorece esta conversión.

En condiciones de contaminación, la acumulación de lixiviados ricos en materia orgánica puede activar procesos de reducción del nitrato a formas como nitritos o amoníaco, mediante reacciones como la desnitrificación o la reducción del nitrato a amonio. Estas reacciones son impulsadas por microorganismos que prosperan en ambientes pobres en oxígeno, comunes en suelos afectados por lixiviados. Además, el bajo contenido de nitratos puede ser un indicador de desequilibrio en el ciclo del nitrógeno del suelo, afectando la fertilidad y la capacidad del suelo para sustentar el crecimiento vegetal.

Desde una perspectiva científica e innovadora, este hallazgo resalta la importancia de entender las alteraciones biogeoquímicas que ocurren en suelos contaminados, así como el rol de los lixiviados en modificar dinámicas fundamentales como el ciclo del nitrógeno. Además, la marcada diferencia entre SCL y SNC subraya cómo la contaminación puede transformar la disponibilidad de nutrientes esenciales. Este dato es crucial para diseñar estrategias de remediación que busquen restaurar las funciones edáficas, reequilibrando la química del suelo y promoviendo condiciones óptimas para la recuperación de la productividad agrícola o ecológica (Naveen et al., 2017).

Nitrógeno amoniacal

Este análisis revela una marcada diferencia entre SCL y SNC, con valores de 9.89 mg/kg y 81.23 mg/kg, respectivamente. Esta diferencia sugiere que el lixiviado ha alterado las rutas biogeoquímicas del nitrógeno en el SCL, debido a la inhibición de microorganismos nitrificantes o a la pérdida de nitrógeno por volatilización y desnitrificación en condiciones reductoras. En contraste, el SNC mantiene niveles más altos de nitrógeno amoniacal, reflejando un ecosistema menos alterado y con mayor capacidad de fertilidad. Los resultados también indican que en SCL puede haber lixiviado nutrientes esenciales, afectando la fertilidad y aumentando la carga contaminante hacia aguas subterráneas. Este hallazgo resalta la importancia del nitrógeno amoniacal como indicador de contaminación y enfatiza la necesidad de estrategias de remediación que restauren la dinámica del nitrógeno en suelos degradados por lixiviados (Miao et al., 2019a).

Cationes Intercambiables

El análisis de cationes intercambiables muestra un valor significativamente mayor SCL de 129.92 mol (+) /kg, comparado con 24.36 mol (+) /kg en SNC. Este aumento refleja la acumulación de cationes como sodio (Na⁺), potasio

(K⁺), calcio (Ca²⁺) y magnesio (Mg²⁺), provenientes de los lixiviados. En el SCL, esta elevada concentración indica una mayor salinidad que afecta negativamente la estructura del suelo, promoviendo la dispersión de partículas de arcilla, compactación y erosión. Estas condiciones deterioran la porosidad del suelo, limitan el crecimiento radicular y dificultan la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas. En contraste, los niveles más bajos de cationes en el SNC reflejan condiciones naturales más estables, favorables para la actividad biológica y agrícola (Santander et al., 2024).

Calcio, magnesio y azufre

Los resultados de calcio, magnesio y azufre reflejan impactos considerables del lixiviado sobre la composición química del suelo. El calcio es mayor en SNC, 4595.58 mg/kg en comparación con SCL, 3322.66 mg/kg, lo que indica que el suelo puede estar lixiviando este nutriente, un proceso común cuando los lixiviados promueven la solubilización y movilización de cationes divalentes hacia capas más profundas del perfil del suelo. Por el contrario, el magnesio es más alto en SCL (546.78 mg/kg) frente a SNC (366.97 mg/kg), lo que sugiere acumulación debido a la contaminación; los lixiviados ricos en materia orgánica suelen contener magnesio disuelto, que se deposita en las capas superficiales del suelo afectado. El azufre presenta una concentración considerablemente mayor en SCL (524.59 mg/kg) con respecto a SNC (124.11 mg/kg), lo que refleja el aporte de sulfatos desde el lixiviado, un compuesto común en residuos sólidos urbanos. Altos niveles de sulfatos pueden aumentar la salinidad y generar toxicidad para las plantas, afectando la fertilidad y la actividad biológica del suelo (Santander et al., 2024).

Humedad

La humedad del suelo es un parámetro crítico que influye en su estructura, estabilidad y capacidad para soportar el crecimiento vegetal. En el caso del SCL, el contenido de humedad del 22.7 % es considerablemente mayor que en SNC, que muestra un valor de 1.99 %. Este incremento puede atribuirse a la infiltración de lixiviados ricos en compuestos orgánicos e inorgánicos, que aumentan la retención de agua debido a una mayor presencia de materia orgánica y sales disueltas. Sin embargo, aunque un mayor contenido de humedad puede mejorar temporalmente la disponibilidad hídrica, la acumulación excesiva de agua puede llevar a la saturación del suelo, disminuyendo su capacidad de aireación y alterando el equilibrio microbiano. Además, los lixiviados pueden desestabilizar la estructura del suelo al promover la dispersión de partículas, lo que afecta negativamente la porosidad y la infiltración de agua. Esto resulta en suelos más compactos y

menos permeables, perjudicando su capacidad para soportar el desarrollo de cultivos y aumentando el riesgo de erosión y escorrentía. La humedad elevada también puede fomentar la formación de condiciones anaeróbicas, que son desfavorables para la mayoría de las plantas y microorganismos benéficos (Salam et al., 2019).

Densidad y porosidad

La densidad real, relativa y de partículas, junto con la porosidad, son parámetros fundamentales para evaluar la estructura y calidad del suelo. La densidad real del SCL (2.23 g/ml) y SNC (2.2 g/ml) presentan valores similares, reflejando una composición mineralógica comparable. Sin embargo, la densidad relativa es mayor en SCL (1.65 g/ml) en comparación con SNC (1.26 g/ml), lo cual indican la acumulación de materia orgánica y compuestos disueltos provenientes del lixiviado, que incrementan el peso del suelo húmedo. Por otro lado, la densidad de partícula es menor en SCL (2.27 g/ml) que en SNC (2.77 g/ml), lo que sugiere una estructura más alterada en el suelo contaminado, debido a la dispersión de partículas finas causada por el lixiviado. La porosidad del SCL (51.11 %) es ligeramente menor que la del SNC (54.435 %), indicando que la infiltración de lixiviados y contribuye a una reducción en los espacios porosos, afectando la circulación de aire y agua. Estas alteraciones limitan el crecimiento radicular y la actividad microbiana beneficiosa, comprometiendo la estabilidad y fertilidad del suelo (Ortiz & Ramirez, 2022).

Temperatura

La temperatura del suelo es un factor crítico que regula los procesos biogeoquímicos, la actividad microbiana y el desarrollo vegetal. En el presente análisis, el SCL tiene una temperatura ligeramente inferior (26.25 °C) en comparación con el SNC (26.75 °C). Esta diferencia puede estar relacionada con el efecto aislante generado por el mayor contenido de humedad y materia orgánica en el SCL, que amortigua las fluctuaciones térmicas. Además, la presencia de lixiviados puede alterar la capacidad del suelo para disipar el calor, influyendo en la distribución de energía en el perfil del suelo. Aunque la diferencia es mínima, valores elevados de temperatura, especialmente en SNC, puede acelerar procesos de mineralización y aumentar la disponibilidad de nutrientes. Sin embargo, en SCL, una temperatura más baja junto con un exceso de humedad puede limitar la aireación y favorecer condiciones anaeróbicas, lo que afecta negativamente la actividad microbiana beneficiosa. Estos cambios en la dinámica térmica del suelo contaminado tienen implicaciones directas en su calidad y capacidad para sostener cultivos (Ortiz & Ramirez, 2022).

Color Munsell

El color del suelo es un indicador clave de su composición, contenido de materia orgánica y condiciones ambientales. En este análisis, el SCL presenta un color negro, mientras que en SNC es gris oscuro. El color negro del SCL indica un alto contenido de materia orgánica, derivada de los residuos en descomposición presentes en los lixiviados. Esta materia orgánica puede influir en varias propiedades del suelo, como la capacidad de retención de agua, la fertilidad y la estabilidad estructural. Por otro lado, el color gris oscuro del SNC refleja un contenido significativamente menor de materia orgánica y una menor alteración química, características de suelos más naturales y menos impactados por actividades antrópicas. Según estudios, el color también puede estar influenciado por óxidos metálicos y compuestos de hierro o manganeso, especialmente en suelos contaminados con lixiviados, donde la acumulación de metales puede contribuir a la tonalidad más oscura. El color del suelo tiene implicaciones directas en su temperatura superficial, con suelos más oscuros absorbiendo más calor, lo que afecta los procesos biológicos y químicos (Kirillova et al., 2018).

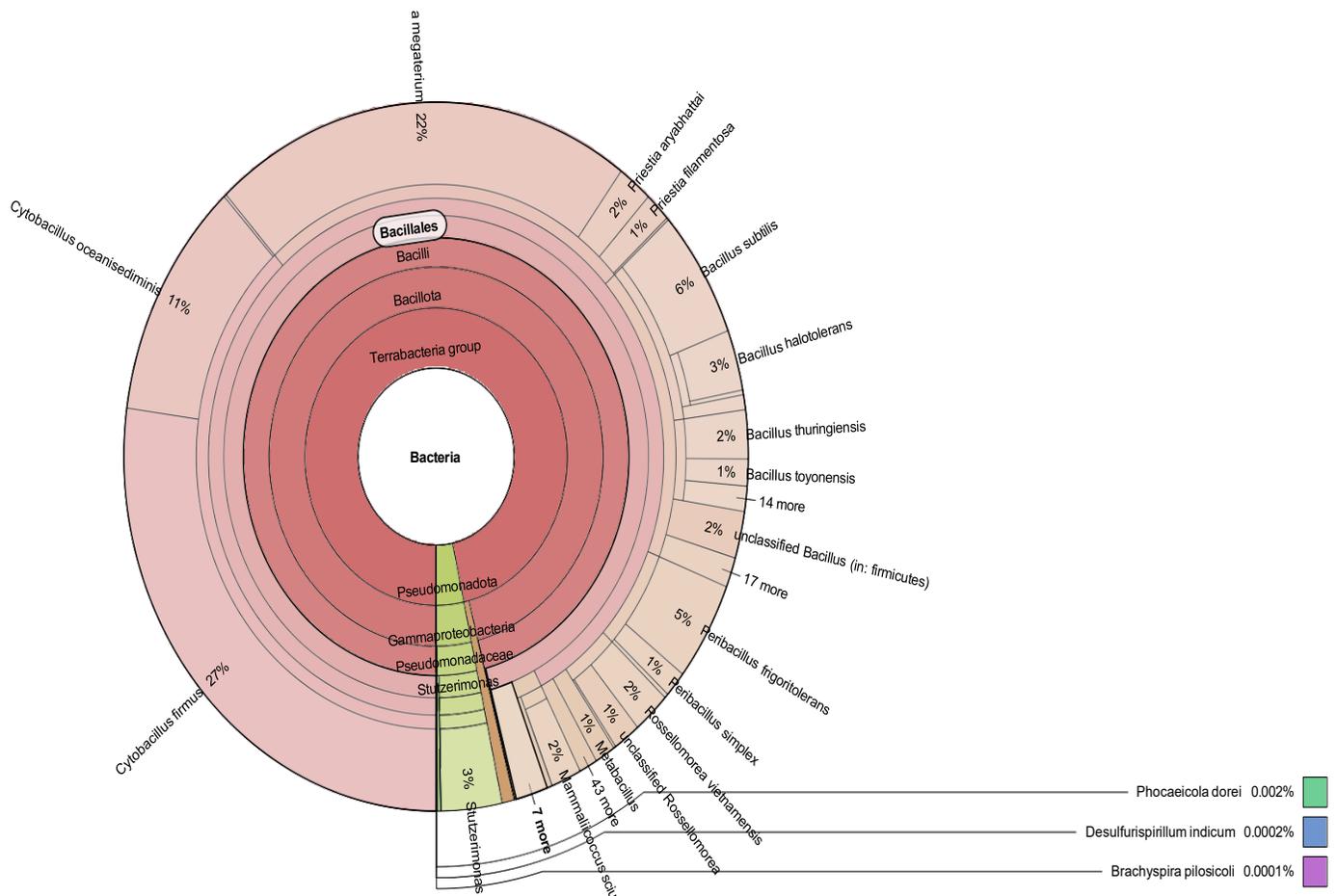
Metales pesados

Los niveles de metales pesados en SCL representan un riesgo significativo tanto para la salud humana como para los ecosistemas terrestres. El arsénico obtenido, 93.7 mg/kg en SCL frente a 0.012 mg/kg en SNC excede ampliamente el límite máximo permisible para uso agrícola con un valor máximo de 22 mg/kg. La exposición prolongada a arsénico está asociada con enfermedades crónicas como el cáncer de piel, pulmones y vejiga, así como con efectos adversos en el sistema cardiovascular. Su acumulación en plantas puede trasladarse a la cadena alimentaria, afectando directamente a los consumidores. Por otro lado, el mercurio en SCL teniendo 1284.7 mg/kg, también supera en gran medida el límite permitido de 23 mg/kg, lo que lo convierte en el contaminante más alarmante en este caso. Este metal es altamente neurotóxico y bioacumulativo, afectando los sistemas nervioso, inmunológico y reproductivo de humanos y fauna, además de ser persistente en el medio ambiente (Cai et al., 2024). Aunque los niveles de cadmio (0.08 mg/kg), cobre (4.9 mg/kg), cromo (12 mg/kg) y plomo (6.38 mg/kg) en SCL están por debajo de los límites establecidos, su acumulación progresiva podría generar toxicidad a largo plazo. Por ejemplo, el cadmio afecta la función renal y ósea, mientras que el plomo se relaciona con daños cognitivos, especialmente en niños. El cromo, en su forma hexavalente, es altamente tóxico y cancerígeno, mientras que el cobre en concentraciones elevadas puede resultar fitotóxico, inhibiendo el crecimiento de las plantas y afectando a

microorganismos beneficiosos del suelo. Desde el punto de vista microbiológico, los metales pesados tienen un impacto significativo en la biodiversidad microbiana. Suelos contaminados como el SCL experimentan una reducción en la diversidad de microorganismos sensibles, favoreciendo la proliferación de cepas tolerantes o resistentes. Esto altera procesos clave como el reciclaje de nutrientes, la descomposición de materia orgánica y la fijación biológica de nitrógeno, afectando negativamente la fertilidad del suelo y la productividad agrícola. Además, la presencia de estos metales puede generar estrés oxidativo en los microorganismos, comprometiendo sus funciones metabólicas (Rizvi et al., 2019). En conjunto, la acumulación de metales pesados en el SCL resalta la necesidad urgente de implementar medidas de remediación para reducir la toxicidad y prevenir la propagación de estos contaminantes. Tecnologías como la fitorremediación, bioacumulación o bioestimulación toman gran relevancia como soluciones viables para mitigar estos impactos.

Análisis microbiológico

El análisis de la diversidad microbiana en SCL y SNC revela diferencias significativas y ciertas similitudes en las comunidades bacterianas presentes, reflejando la alteración provocada por la contaminación. En la Figura 2, muestra una alta dominancia de bacterias del grupo *Terrabacteria*, en particular del género *Bacillus*, con especies como *Cytobacillus firmus* (27%) y *Cytobacillus oceanisediminis* (11%), lo que indica la prevalencia de microorganismos con adaptaciones específicas para sobrevivir en condiciones extremas asociadas a la contaminación química (Emenike et al., 2024). Fig 2. Resultado taxonómico de bacterias en SCL.



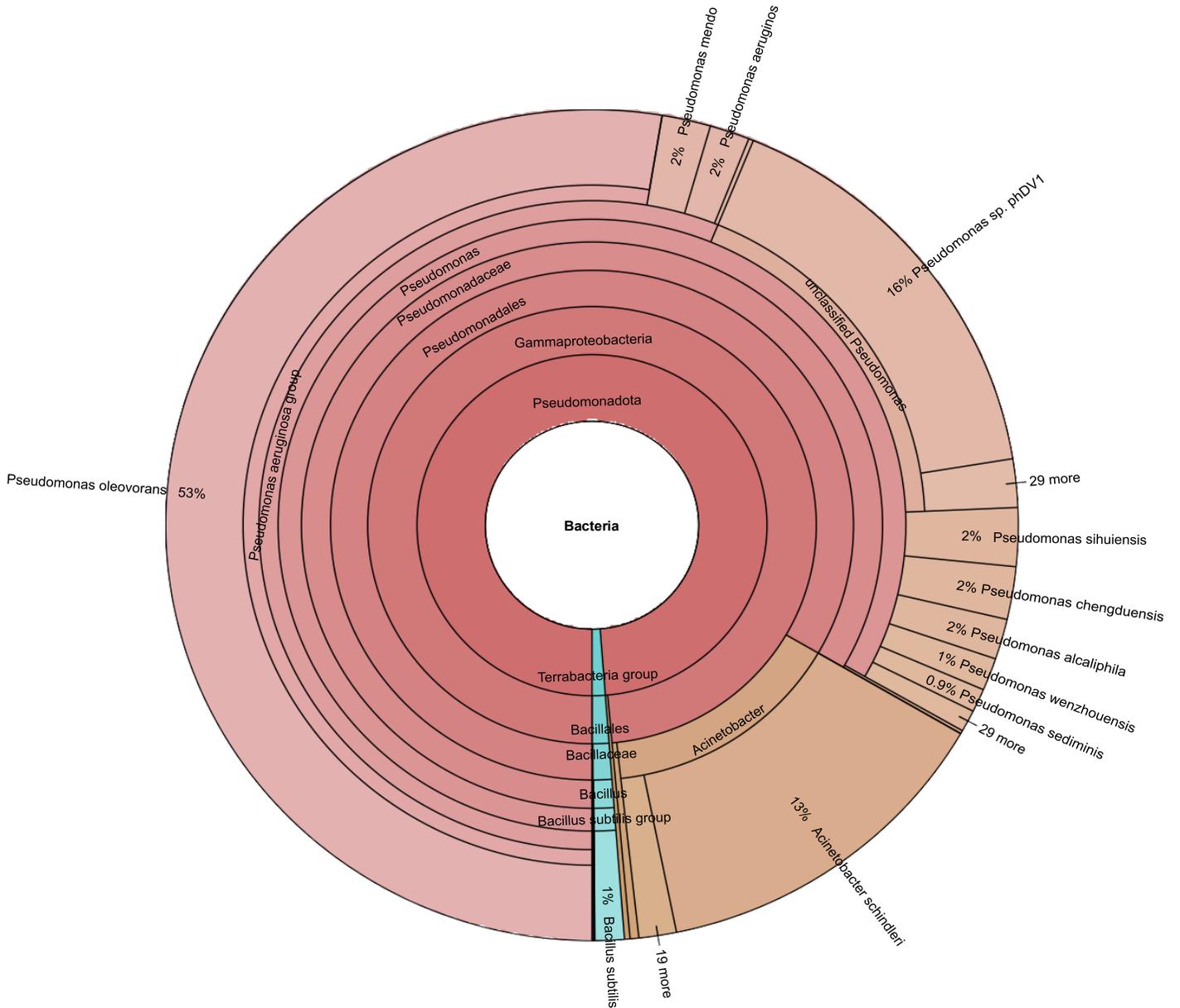
Fuente Elaboración propia.

En contraste, con la figura 3, muestra un predominio de bacterias del género *Pseudomonas*, como *Pseudomonas oleovorans* (53%), característica de entornos más equilibrados y saludables que favorecen a microorganismos generalistas.

A pesar de estas diferencias, ambos suelos comparten la presencia de géneros clave como *Bacillus* y *Pseudomonas*, aunque en proporciones marcadamente distintas, reflejando tanto la resiliencia como la variación adaptativa microbiana frente a los lixiviados. Los resultados obtenidos muestran el impacto negativo de la contaminación en la biodiversidad del suelo y la importancia de comprender cómo las comunidades microbianas se reorganizan frente al estrés químico, abriendo oportunidades para desarrollar estrategias de bioremediación basadas en microorganismos adaptados, especialmente en suelos de vertederos a cielo abierto.

La relevancia científica de este estudio radica en la capacidad de los microorganismos para actuar como agentes de recuperación ambiental, y ofrecen una línea de investigación para mitigar los impactos ecológicos derivados de la contaminación.

Fig. 3. Resultado taxonómico de bacterias en SNC.



Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

Esta investigación muestra el impacto significativo que los lixiviados provenientes de vertederos ejercen sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo. Las diferencias observadas entre SCL y SNC abarcan parámetros clave como la humedad, salinidad, contenido de materia orgánica, metales pesados y composición microbiana. El SCL se caracteriza por altos niveles de humedad, salinidad y metales tóxicos como arsénico y mercurio, lo que representa riesgos ambientales y ecológicos. Además, los lixiviados alteran la composición de comunidades microbianas, favoreciendo bacterias adaptadas a condiciones extremas, como *Cytobacillus firmus*, en detrimento de géneros característicos de suelos equilibrados, como *Pseudomonas oleovorans*.

La comparación entre estos suelos resalta no solo los efectos negativos de los lixiviados en la calidad y biodiversidad de cada suelo, sino también la resiliencia adaptativa de ciertos microorganismos, lo que abre nuevas posibilidades para estrategias de biorremediación. La investigación subraya la necesidad urgente de gestionar adecuadamente los residuos sólidos urbanos, implementar tecnologías de tratamiento para lixiviados y restaurar suelos contaminados, tanto para mitigar los riesgos de contaminación como para proteger los servicios ecosistémicos de los suelos afectados.

Es fundamental que la sociedad comprenda la magnitud de los impactos generados por los lixiviados de vertederos y asuma un papel activo en la solución de este problema. La contaminación del suelo no solo pone en riesgo la salud ambiental y la biodiversidad, sino también la calidad de vida y la seguridad alimenticia. Adoptar hábitos responsables, como reducir, reutilizar y reciclar los residuos, puede disminuir la presión sobre los vertederos. Además, apoyar políticas que promuevan una gestión sostenible de los residuos sólidos y tecnologías de tratamiento avanzadas es clave para minimizar el impacto de los lixiviados. Involucrarse como ciudadanos en la protección y restauración de los suelos garantiza un entorno más saludable para las generaciones presentes y futuras, preservando el ecosistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Becerra-Moreno, D., Rubio-Gómez, Y., Ramírez-Ríos, L. F., Barajas-Solano, A. F., & Machuca Martínez, F. (2021). Procesos Avanzados De Oxidación Basados En Ozono Como Alternativa De Tratamiento Para Lixiviados De Rellenos Sanitarios. *Ciencia En Desarrollo*, 12(2). <https://doi.org/10.19053/01217488.v12.n2.2021.12503>
- Cai, S., Zhou, S., Wang, Q., Cheng, J., & Zeng, B. (2024). Assessment of metal pollution and effects of physicochemical factors on soil microbial communities around a landfill. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 271, 115968. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.115968>
- Emenike, C., Omo-Okoro, P., Pariatamby, A., Barasarathi, J., & Hamid, F. S. (2024). Remediation of Leachate-Metal-Contaminated Soil Using Selected Bacterial Consortia. *Soil Systems*, 8(1), 33. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8010033>
- Kirillova, A., Kelly, C., von Windheim, N., & Gall, K. (2018). Bioinspired mineral-organic Bioresorbable bone adhesive. *Advanced healthcare materials*, 7(17), 1800467. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/adhm.201800467>
- Liu, S. J., Zheng, M. X., Sun, X. J., Xi, B. D., He, X. S., & Xiao, X. (2020). Evolution properties and dechlorination capacities of particulate organic matter from a landfill. *Journal of Hazardous Materials*, 400. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123313>
- Mena Navarro, M. P., Espinosa Bernal, M. A., Alvarado Osuna, C., Ramos López, M. Á., Amaro Reyes, A., Arvizu Gómez, J. L., Pacheco Aguilar, J. R., Saldaña Gutiérrez, C., Pérez Moreno, V., Rodríguez Morales, J. A., García Gutiérrez, M. C., Álvarez Hidalgo, E., Nuñez Ramírez, J., Hernández Flores, J. L., & Campos Guillén, J. (2024). A Study of Resistome in Mexican Chili Powder as a Public Health Risk Factor. *Antibiotics*, 13(2), 182. <https://doi.org/10.3390/antibiotics13020182>
- Miao, L., Yang, G., Tao, T., & Peng, Y. (2019a). 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>
- Naveen, B. P., Mahapatra, D. M., Sitharam, T. G., Sivapullaiah, P. V., & Ramachandra, T. V. (2017). Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate. *Environmental Pollution*, 220, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.09.002>
- Olson, R. D., Assaf, R., Brettin, T., Conrad, N., Cucinell, C., Davis, J. J., Dempsey, D. M., Dickerman, A., Dietrich, E. M., Kenyon, R. W., Kuscuoglu, M., Lefkowitz, E. J., Lu, J., Machi, D., Macken, C., Mao, C., Niewiadomska, A., Nguyen, M., Olsen, G. J., ... Stevens, R. L. (2023). Introducing the Bacterial and Viral Bioinformatics Resource Center (BV-BRC): a resource combining PATRIC, IRD and ViPR. *Nucleic Acids Research*, 51(D1), D678–D689. <https://doi.org/10.1093/nar/gkac1003>

- Ortiz, O., & Ramirez, R. (2022). Impacto de la adición de carbón de bajo rango en la conductividad térmica del suelo salino sódico. *Información Tecnológica*, 33(4), 53–62. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000400053>
- Parvin, F., & Tareq, S. M. (2021). Impact of landfill leachate contamination on surface and groundwater of Bangladesh: a systematic review and possible public health risks assessment. *Applied Water Science*, 11(6), 100. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01431-3>
- Qiao, H., Liu, Z., Peng, X., Xian, H., Cheng, K., & Yang, F. (2024). Significance of humic matters-soil mineral interactions for environmental remediation: A review. *Chemosphere*, 365, 143356. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.143356>
- Rizvi, A., Ahmed, B., Zaidi, A., & Khan, Mohd. S. (2019). Heavy metal mediated phytotoxic impact on winter wheat: oxidative stress and microbial management of toxicity by *Bacillus subtilis* BM2. *RSC Advances*, 9(11), 6125–6142. <https://doi.org/10.1039/C9RA00333A>
- Salam, A., Shaheen, S. M., Bashir, S., Khan, I., Wang, J., Rinklebe, J., Rehman, F. U., & Hu, H. (2019). Rice straw- and rapeseed residue-derived biochars affect the geochemical fractions and phytoavailability of Cu and Pb to maize in a contaminated soil under different moisture content. *Journal of Environmental Management*, 237, 5–14. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.047>
- Santander, J. S., Lira, B. P., Arteaga, K. A., & Camarillo, J. P. P. (2024). Physicochemical characterization of agricultural soils under a traditional system in the Mezquital Valley, Hidalgo. *South Florida Journal of Development*, 5(5), e3937. <https://doi.org/10.46932/sfjdv5n5-017>
- Velvizhi, G., Shanthakumar, S., Das, B., Pugazhendhi, A., Priya, T. S., Ashok, B., Nanthagopal, K., Vignesh, R., & Karthick, C. (2020). Biodegradable and non-biodegradable fraction of municipal solid waste for multifaceted applications through a closed loop integrated refinery platform: Paving a path towards circular economy. *Science of The Total Environment*, 731, 138049. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138049>
- Wdowczyk, A., & Szymańska-Pulikowska, A. (2021). Analysis of the possibility of conducting a comprehensive assessment of landfill leachate contamination using physicochemical indicators and toxicity test. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 221, 112434. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112434>
- Yu, M.-D., Xi, B.-D., Zhu, Z.-Q., Zhang, L., Yang, C., Geng, C.-M., & He, X.-S. (2020). Fate and removal of aromatic organic matter upon a combined leachate treatment process. *Chemical Engineering Journal*, 401, 126157. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126157>
- Yu, Y., Cui, S., Fan, R., Fu, Y., Liao, Y., & Yang, J. (2020). Distribution and superposed health risk assessment of fluorine co-effect in phosphorous chemical industrial and agricultural sources. *Environmental Pollution*, 262, 114249. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114249>