



XL

**Optimización de procesos
fisicoquímicos para la
remediación de lixiviados
de alta concentración en
botaderos de clima árido:
Estrategias, desafíos y
perspectivas**

Juan Carlos Quijandria Lavarello
Juan Carlos Alfredo Toledo Guerra
José Abelardo Castillo Navarro
Jorge Luis De La Cruz Martinez

Optimización de procesos fisicoquímicos para la remediación de lixiviados de alta concentración en botaderos de clima árido: Estrategias, desafíos y perspectivas

Juan Carlos Quijandria Lavarello
Juan Carlos Alfredo Toledo Guerra
José Abelardo Castillo Navarro
Jorge Luis De La Cruz Martinez

RESUMEN

La gestión de lixiviados de alta concentración en botaderos de clima árido representa un desafío crítico por la intensa evaporación que incrementa TDS hasta 50 g/L, limitando la efectividad de tratamientos convencionales. Esta revisión narrativa sistematiza evidencia científica (2010-2025) sobre optimización de procesos fisicoquímicos mediante búsqueda en Scopus, Web of Science y ScienceDirect con términos booleanos específicos. Los resultados identifican que los procesos de oxidación avanzada integrados (Fenton solar/ozonización) y electrocoagulación solar alcanzan remociones de DQO del 75-82% con costos de \$3.2-4.8/m³, mientras que la coagulación-floculación con FeCl₃/PAC alcanza 60-70% de eficiencia. La adsorción con zeolitas modificadas y biochar permite recuperación de NH₄⁺ y metales, aunque requiere regeneración térmica en clima árido. Los principales desafíos incluyen formación de incrustaciones, costos operacionales elevados, ausencia de normativa adaptada y brechas en estudios piloto a escala real con análisis de ciclo de vida completos. Se requiere investigación traslacional que integre inteligencia artificial para control predictivo, simbiosis industrial con minería y protocolos ZLD (cero líquido descargado). Se propone un enfoque modular híbrido (EC-POA-membrana) con optimización multiobjetivo que balancea eficiencia, sostenibilidad hídrica y valorización de subproductos, proporcionando a gestores ambientales una hoja de



ruta adaptable a condiciones de escasez de recursos.

Palabras clave: lixiviados, clima árido, tratamiento fisicoquímico, optimización multiobjetivo, cero líquido descargado.

ABSTRACT

Managing high-concentration leachate in arid landfills presents a critical challenge due to intense evaporation, which increases total dissolved solids (TDS) to 50 g/L, limiting the effectiveness of conventional treatments. This narrative review systematizes scientific evidence (2010–2025) on optimizing physicochemical processes by searching Scopus, Web of Science, and ScienceDirect using specific Boolean terms. The results identify that integrated advanced oxidation processes (solar Fenton/ozonation) and solar electrocoagulation achieve COD removal rates of 75–82% at costs of \$3.2–4.8/m³, while coagulation-flocculation with FeCl₃/PAC reaches 60–70% efficiency. Adsorption with modified zeolites and biochar allows for the recovery of ammonia (NH₄⁺) and metals, although it requires thermal regeneration in arid climates. The main challenges include scale formation, high operating costs, a lack of adapted regulations, and gaps in full-scale pilot studies with comprehensive life cycle assessments. Translational research is needed that integrates artificial intelligence for predictive control, industrial symbiosis with mining, and zero liquid discharge (ZLD) protocols. A hybrid modular approach (EC-POA-membrane) with multi-objective optimization is proposed, balancing efficiency, water sustainability, and byproduct valorization, providing environmental managers with a roadmap adaptable to resource-scarce conditions.

Keywords: leachate, arid climate, physicochemical treatment, multi-objective optimization, zero liquid discharge.

INTRODUCCIÓN

La gestión de lixiviados de botaderos de residuos sólidos municipales representa uno de los desafíos ambientales más críticos a nivel global, generando contaminación de suelos y aguas subterráneas por su elevada carga de contaminantes orgánicos e

inorgánicos (Renou et al., 2008). Estos efluentes se caracterizan por concentraciones extremadamente altas de sólidos disueltos totales (TDS), demanda química de oxígeno (DQO), demanda bioquímica de oxígeno (DBO5), nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) y metales pesados, cuya toxicidad y persistencia amenazan la integridad de los ecosistemas y la salud pública (Naveen et al., 2017; Luo et al., 2020). En zonas áridas, esta problemática se magnifica debido a la interacción entre condiciones climáticas extremas y procesos de degradación de residuos, generando flujos de alta concentración que superan las capacidades de los sistemas convencionales de tratamiento.

La composición típica de lixiviados varía según la edad del botadero y las condiciones operacionales. En fases tempranas (lixiviados jóvenes), predominan compuestos orgánicos biodegradables con relaciones $\text{DBO5/DQO} > 0.5$, mientras que en etapas maduras, la fracción recalcitrante aumenta significativamente con disminución de la biodegradabilidad y predominio de sustancias húmicas y ácidos fúlvicos (Abdel-Shafy et al., 2024). Este cambio composicional es particularmente acentuado en climas áridos, donde la baja precipitación (< 250 mm/año) y la evaporación intensa concentran los contaminantes hasta 5-8 veces más que en regiones húmedas durante la estación seca (Mavakala et al., 2016; Al-Yaqout, 2003). Estudios en Kuwait han reportado conductividades eléctricas de 1.2-16.9 mS/cm y concentraciones de sulfatos entre 1600-3650 mg/L en lixiviados activos, evidenciando la severa mineralización que ocurre en estas condiciones.

El contexto de clima árido, definido por un índice de aridez < 0.20 , impone particularidades que distinguen estos escenarios de otros entornos de gestión de residuos. La escasez hídrica limita la disponibilidad de agua para operaciones de tratamiento, mientras que la alta radiación solar y temperaturas extremas ($> 40^\circ\text{C}$) aceleran procesos de volatilización y precipitación, alterando el comportamiento de contaminantes como N-NH_4^+ y metales pesados (Gautam y Kumar, 2021). La evaporación solar intensificada actúa como mecanismo de concentración natural, generando lixiviados con salinidades que pueden exceder 35 g/L de TDS, dificultando la aplicación de tecnologías biológicas convencionales (Kjeldsen et al., 2002). Casos documentados en botaderos de Chile, España, México y el norte de África demuestran que estas condiciones requieren adaptaciones tecnológicas específicas, donde incluso la precipitación estacional puede percolar y arrastrar contaminantes acumulados, produciendo pulsos de carga contaminante 10-40 veces superiores a períodos secos (Mavakala et al., 2016).

La insuficiencia de tecnologías convencionales para tratar lixiviados altamente



concentrados en zonas áridas constituye una brecha crítica en la gestión ambiental. Procesos biológicos como UASB y MBR muestran eficiencias reducidas cuando la DQO supera 10,000 mg/L o la salinidad afecta la actividad microbiana, mientras que los sistemas de membrana (NF/RO) enfrentan fouling acelerado y producen rechazos concentrados que requieren manejo especializado (Peng, 2017). Aunque los procesos fisicoquímicos—coagulación-floculación, precipitación química, oxidación avanzada y adsorción—demuestran capacidad para remover 40-70% de DQO y hasta 99% de N-NH_4^+ mediante stripping, su optimización para altas concentraciones y condiciones climáticas extremas permanece insuficientemente investigada (Renou et al., 2008; De et al., 2019b). La falta de investigación específica en adaptación climática y la necesidad de integrar optimización con sostenibilidad hídrica evidencian la urgencia de sistematizar conocimientos que permitan diseñar sistemas robustos, económicos y resilientes para estas regiones.

Esta revisión narrativa tiene como objetivo general sistematizar los conocimientos actuales sobre optimización de procesos fisicoquímicos para la remediación de lixiviados de alta concentración en botaderos de clima árido. Los objetivos específicos incluyen: (i) identificar tecnologías fisicoquímicas más prometedoras mediante análisis de eficiencia y robustez; (ii) determinar parámetros críticos de optimización (pH, dosis de coagulantes, relaciones G/L en stripping, densidad de corriente en electrocoagulación) mediante metodologías de diseño de experimentos; (iii) proponer adaptaciones específicas para clima árido, incluyendo aprovechamiento de evaporación solar y uso de aguas no convencionales; y (iv) evaluar sostenibilidad y costos mediante análisis de ciclo de vida y huella hídrica, facilitando la toma de decisiones para gestores ambientales en regiones con escasez de recursos.

METODOLOGÍA

Esta revisión narrativa sistematiza el estado del arte sobre optimización de procesos fisicoquímicos para lixiviados de alta concentración en clima árido mediante una estrategia metodológica estructurada que combina rigor bibliográfico con análisis temático cualitativo (Snyder, 2019). La metodología se organizó en tres fases secuenciales: (i) estrategia de búsqueda documental, (ii) aplicación de criterios de selección, y (iii) análisis narrativo de la evidencia científica.

Para la estrategia de búsqueda, se consultaron cuatro bases de datos principales:

Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Google Académico, seleccionadas por su cobertura multidisciplinaria en ciencias ambientales e ingeniería (Bramer et al., 2016). Los términos booleanos se estructuraron en tres bloques conceptuales: (lixiviados OR leachate) AND (tratamiento fisicoquímico OR "physico-chemical treatment") AND (clima árido OR "arid climate" OR "zona árida"), incorporando sinónimos en inglés, español y portugués para maximizar la sensibilidad de la búsqueda (Akers et al., 2020). Se implementaron comodines (truncamiento) como optim* y remedi* para captar variantes terminológicas. El periodo de publicación se limitó a 2010-2025, enfatizando la última década dado el surgimiento de tecnologías emergentes como la electrocoagulación solar y procesos de oxidación avanzada adaptados a zonas áridas (Zhang et al., 2022). La búsqueda se restringió a artículos originales, revisiones sistemáticas y reportes técnicos en idiomas inglés, español y portugués, descartando literatura gris sin datos experimentales verificables.

Los criterios de inclusión y exclusión se definieron mediante consenso metodológico para garantizar relevancia y calidad (Munn et al., 2018). Se incluyeron estudios experimentales y piloto que evaluaran lixiviados con DQO > 5,000 mg/L o TDS > 10 g/L, reportaran parámetros de optimización cuantificables (dosis, pH, tiempos de residencia), y fueran aplicables a contextos áridos/semiáridos con índice de aridez <0.20 según clasificación de Naciones Unidas (UNEP, 1992). Se priorizaron investigaciones que integraran diseño de experimentos (DoE), superficie de respuesta (RSM) o análisis de costos operacionales. Los criterios de exclusión eliminaron estudios sobre lixiviados de baja carga (DQO < 3,000 mg/L), tratamientos biológicos exclusivos sin etapa fisicoquímica, investigaciones teóricas sin validación experimental, y trabajos sin datos de eficiencia de remoción o consumo energético específicos (Pico et al., 2020).

El análisis narrativo se realizó mediante síntesis cualitativa de evidencia, evitando metaanálisis debido a la heterogeneidad metodológica de los estudios (Ferrari, 2015). La información se clasificó temáticamente en cuatro grandes tecnologías: (1) coagulación-floculación y precipitación química, (2) procesos de oxidación avanzada (POA), (3) adsorción/intercambio iónico, y (4) tecnologías emergentes (electrocoagulación, membranas avanzadas, stripping solar). Para cada categoría se extrajeron datos sobre eficiencia de remoción, parámetros de optimización, cinéticas de reacción y adaptaciones climáticas (Mojiri et al., 2021). La identificación de tendencias se basó en análisis de frecuencia de términos y co-citación mediante VOSviewer, revelando clusters de investigación en optimización multiobjetivo y sostenibilidad hídrica (van Eck y Waltman, 2010). La evaluación de calidad metodológica se fundamentó en el cuestionario CASP para estudios experimentales, considerando diseño experimental



robusto, réplicas biológicas o técnicas adecuadas, reporte completo de condiciones operacionales y análisis estadístico apropiado (Munn et al., 2018). Los estudios con alta calidad metodológica reportaron diseños factoriales completos o D-optimal, validación de modelos mediante ANOVA, y análisis de sensibilidad de parámetros (Rodríguez et al., 2019).

Finalmente, se realizó un proceso de triangulación cruzada entre los hallazgos bibliográficos y estudios de caso en regiones áridas (Chile, España, México, norte de África) para validar la transferibilidad de las conclusiones, fortaleciendo la aplicabilidad práctica de esta revisión (Snyder, 2019).

RESULTADOS

La evidencia científica identificada revela que las tecnologías fisicoquímicas convencionales requieren optimización significativa para tratar lixiviados de alta concentración en clima árido. En coagulación-floculación, los estudios de Amor et al. (2023) y Zhao et al. (2022) demuestran que FeCl_3 y PAC alcanzan eficiencias de remoción de DQO del 52-68% en lixiviados con DQO inicial de 12,000-18,000 mg/L, siempre que el pH se controle entre 6.5-7.5. La velocidad de mezcla rápida (200-300 rpm) y lenta (30-40 rpm) resulta crítica para formar flóculos densos que resistan la alta fuerza iónica. Los polímeros catiónicos de alto peso molecular ($5\text{-}10 \times 10^6$ Da) mejoran la remoción de sólidos suspendidos hasta 85% en lixiviados maduros con TDS > 30 g/L, aunque la regeneración de lodos concentrados permanece un desafío operacional (Mojiri et al., 2021).

En procesos de oxidación avanzada (POA), el sistema Fenton/Foto-Fenton muestra adaptaciones prometedoras para alta salinidad. Trinh et al. (2023) reportan que relaciones $[\text{Fe}^{2+}]/[\text{H}_2\text{O}_2]$ de 1:10 a pH 3.0-3.5 logran remociones de DQO del 65-78% en lixiviados con conductividades de 45-60 mS/cm, aunque la precipitación de sales de hierro requiere corrección continua de pH. La ozonización en reactores de lecho fluidizado alcanza oxidación de N-NH_4^+ del 85-95% con dosis de 2.5-3.5 g $\text{O}_3/\text{g N}$, pero su eficiencia disminuye 30-40% en presencia de cloruros > 15 g/L que consumen ozono radicalario (Gomes et al., 2022). Los sistemas UV/ H_2O_2 presentan limitaciones en aguas con alta turbidez (>200 NTU) y color (Pt-Co > 2000), donde la penetración de radiación se reduce hasta 60%, requiriendo pre-filtración o etapas

de adsorción previa (Zhang et al., 2022).

La adsorción con carbón activado granular (CAG) y biochar modificados muestra capacidades de adsorción de 150-250 mg DQO/g en condiciones de alta concentración. Wang et al. (2024) demuestran que zeolitas naturales tratadas con NaOH incrementan la capacidad de intercambio catiónico para NH_4^+ de 1.8 a 3.2 meq/g, aunque la competencia con iones Na^+ y Ca^{2+} en lixiviados áridos reduce la selectividad 25-35%. La regeneración térmica de adsorbentes en clima árido aprovecha temperaturas solares de 60-80°C, reduciendo consumo energético 40% comparado con métodos convencionales, aunque genera pérdidas de material del 8-12% por ciclo (De et al., 2019b).

Las tecnologías emergentes demuestran potencial transformador. La electrocoagulación (EC) con electrodos de aluminio/ hierro en reactores solares alcanza remociones simultáneas de DQO (70-82%), metales pesados (95-99%) y turbidez (90-95%) con densidades de corriente de 15-25 mA/cm² (Vasudevan et al., 2023). La energía solar térmica reduce costos operacionales 35-45% en zonas con irradiancia > 5.5 kWh/m²/día. Los procesos de membrana (NF/RO) con pre-tratamiento EC producen rechazos concentrados con factor de concentración 8-10, requiriendo evaporación solar asistida para alcanzar "cero líquido descargado" (ZLD) con costos de \$3.2-4.8/m³ (Guo et al., 2022). Los wetland artificiales híbridos (CW-HSSF) integrando evaporación controlada mediante sombras móviles logran reducciones de DQO del 45-55% con requerimientos hídricos 60% menores que sistemas convencionales (Saeed et al., 2021).

Las estrategias de optimización mediante Diseño de Experimentos (DoE) identificaron variables críticas. Estudios con superficie de respuesta (RSM) revelan que pH, tiempo de reacción y dosis de oxidante explican 78-85% de la variabilidad en remoción de DQO (Rodríguez et al., 2019). Los diseños Taguchi L16 y L32 demuestran robustez en condiciones de variable climática, minimizando la sensibilidad a fluctuaciones de temperatura (20-45°C) y salinidad (TDS 15-50 g/L) (Trinh et al., 2023). El modelado cinético de pseudo-primer orden ajusta bien remoción de N-NH_4^+ por stripping ($R^2 > 0.92$), mientras que modelos de Langmuir-Freundlich describen adsorción de metales pesados en biochar con errores < 15% (Wang et al., 2024). Herramientas de optimización multiobjetivo como Análisis de Redes Neuronales Artificiales (ANN) y algoritmos genéticos permiten eficiencia (65-80%) versus costos (\$/kg DQO) y huella de carbono (CO₂-eq), identificando soluciones de Pareto óptimas que reducen impacto ambiental 25-30% manteniendo eficiencia (Guo et al., 2022).



Las adaptaciones climáticas específicas son fundamentales. La evaporación solar mejorada con paneles de bajo costo incrementa la tasa de evaporación 2.5-3.0 veces, concentrando lixiviados de 50 a 200 g/L de TDS para precipitación controlada de sales valorizables (Rodríguez et al., 2021). El uso de agua de mar desalinizada como agua de proceso en zonas costeras áridas reduce el consumo de agua dulce 70%, aunque requiere pre-tratamiento para remover boro y bromuros que interfieren en POA (Saeed et al., 2021). La temperatura ambiente elevada (35-45°C) acelera constantes cinéticas en Fenton 1.8-2.2 veces, pero incrementa la formación de incrustaciones de CaSO_4 y CaCO_3 en electrodos EC, requiriendo pulsos de corriente inversa cada 30-45 minutos (Vasudevan et al., 2023).

La evaluación de costos y sostenibilidad muestra que la combinación EC-adsorción tiene costos operacionales de \$2.8-3.5/m³, 40% menor que POA convencionales, con consumos energéticos de 12-18 kWh/kg DQO removido (Guo et al., 2022). La huella de carbono es 2.5-3.5 kg CO₂-eq/m³, reducible 35% mediante integración solar. Los análisis de sensibilidad indican que el costo de coagulante representa 45-55% de OPEX, siendo la optimización de dosis mediante DoE la variable de mayor impacto económico (Mojiri et al., 2021).

DISCUSIÓN

La síntesis comparativa evidencia que ninguna tecnología fisicoquímica aislada alcanza eficiencia integral para lixiviados de alta concentración en clima árido. La coagulación-floculación ofrece robustez operacional y costos moderados (\$2.5-4.0/m³), pero su eficiencia de DQO se estanca en 60-70% para lixiviados maduros, requiriendo combinación con POA para cumplir normativas de vertido (Mojiri et al., 2021). Los POA (Fenton, ozonización) alcanzan remociones superiores al 75% de compuestos recalcitrantes, pero su OPEX es 2.5-3.0 veces superior y generan subproductos tóxicos (bromatos, cloruros orgánicos) en presencia de alta salinidad (Gomes et al., 2022). La electrocoagulación solar emerge como alternativa intermedia, logrando eficiencias del 70-82% con costos competitivos (\$3.2/m³), aprovechando las condiciones de irradiancia propias de zonas áridas (Vasudevan et al., 2023). Sin embargo, su escalabilidad se limita por la formación de incrustaciones en electrodos y la necesidad de reemplazo cada 30-45 días bajo alta TDS. Los procesos de membrana (NF/RO) garantizan calidad de efluente, pero generan rechazos concentrados (20-

30% del volumen) que demandan sistemas ZLD, incrementando CAPEX 40-60% (Guo et al., 2022). Esta matriz de desempeño confirma que la configuración híbrida EC-Adsorción-NF ofrece la mejor relación eficiencia-costo-robustez para escenarios áridos.

Los desafíos particulares de zonas áridas centran el debate en la gestión de efluentes finales con TDS > 50 g/L, donde la normativa convencional no establece límites específicos. El concepto de "cero líquido descargado" (ZLD) mediante evaporación solar asistida permite concentrar flujos hasta 200 g/L, facilitando la valorización de sales (NaCl, KCl) y metales pesados (Cu, Zn) con recuperación económica del 15-25% de OPEX (Rodríguez et al., 2021). No obstante, la formación de escamas de sulfatos y carbonatos en evaporadores solares reduce la tasa de evaporación 30-40% tras 60 días de operación, requiriendo limpieza química periódica con ácido cítrico (Saeed et al., 2021). La innovación en precipitación selectiva de fases sólidas (halita, sylvita) mediante control de temperatura (40-80°C) y presión osmótica emerge como alternativa para reducir volúmenes de rechazo 50%, aunque su viabilidad a escala piloto permanece insuficientemente documentada (Mavakala et al., 2016).

Las barreras de implementación son multidimensionales. Los costos operacionales elevados (\$4-8/m³ para sistemas híbridos) superan 2-3 veces los presupuestos municipales en países en desarrollo, limitando la adopción tecnológica. La necesidad de personal técnico especializado en operación de POA, EC y membranas genera brecha de capacidades, con requerimientos de entrenamiento de 120-180 horas para operadores locales (Bashir et al., 2016). La normativa ambiental, diseñada para regiones húmedas, no contempla índices de aridez ni límites de TDS adaptados, forzando cumplimiento de estándares inalcanzables sin ZLD. En Chile y México, las resoluciones de calidad de agua para vertidos industriales ignoran la salinidad, generando incertidumbre legal para gestores de botaderos áridos (Al-Yaqout, 2003).

Las oportunidades de optimización son transformadoras. La inteligencia artificial (IA) mediante redes neuronales recurrentes (RNN) y algoritmos de aprendizaje por refuerzo permite control predictivo de dosis de coagulante y densidad de corriente EC, reduciendo consumos químicos 20-30% y estabilizando eficiencia ante fluctuaciones de carga (Vasudevan et al., 2023). La co-digestión anaerobia de lixiviados diluidos con residuos agrícolas (relación 1:3 v/v) en reactores UASB aumenta la producción de biogás 40% y remueve DQO del 60-65%, generando sinergia energética (Fang et al., 2021). La simbiosis industrial con minería permite co-tratamiento de lixiviados y aguas ácidas de mina, neutralizando alcalinidad y recuperando metales (Cu, Mo) mediante precipitación sulfúrica, con reducción de costos compartidos del 30-35%



(Rodríguez et al., 2021).

Las brechas de conocimiento identificadas limitan la transferencia tecnológica. La escasez de estudios piloto a escala real ($> 1 \text{ m}^3/\text{h}$) durante múltiples ciclos estacionales (3-4 años) impide validar la robustez a largo plazo de sistemas híbridos. La falta de datos de ciclo de vida completos (LCA) que integren huella hídrica, energética y toxicológica en unidades funcionales comparables (por m^3 tratado) dificulta la toma de decisiones sostenibles (Guo et al., 2022). La evaluación toxicológica de efluentes tratados mediante bioensayos con especies nativas de zonas áridas (*Daphnia magna*, *Pseudokirchneriella subcapitata*) bajo estrés hídrico es inexistente, ignorando efectos sinérgicos de cloruros, boron y subproductos de oxidación en ecosistemas receptoras fragiles. Esta revisión sistematiza las evidencias disponibles, pero demanda investigación traslacional que integre optimización tecnológica con viabilidad socioeconómica y adaptaciones climáticas específicas.

CONCLUSIÓN

Los procesos de oxidación avanzada integrados (Fenton solar + ozonización) y la electrocoagulación solar emergen como las tecnologías más prometedoras para lixiviados de alta concentración en clima árido, alcanzando eficiencias de DQO del 75-82% con costos operacionales 35-45% inferiores a sistemas convencionales. Su implementación requiere un enfoque de diseño modular y flexible que permita escalado gradual: pre-tratamiento EC (módulo 1), oxidación avanzada (módulo 2) y separación final por membranas o evaporación solar (módulo 3), facilitando adaptación a fluctuaciones estacionales y económicas locales.

La optimización multiobjetivo (eficiencia, costos, huella hídrica) mediante algoritmos de inteligencia artificial y diseño de experimentos es crítica para balancear remoción de contaminantes con sostenibilidad, logrando reducciones de consumo energético y químicos del 20-30%. Sin embargo, la transferencia tecnológica se ve limitada por la escasez de estudios piloto a escala real y la ausencia de datos de ciclo de vida integrados que validen la viabilidad a largo plazo bajo estrés hídrico crónico.

Se propone un protocolo de actuación para gestores ambientales: (i) caracterización estacional rigurosa (TDS, DQO, metales), (ii) selección tecnológica mediante análisis de Pareto (costo-eficiencia-robustez), (iii) implementación piloto por módulos con monitoreo IA, y (iv) evaluación de valorización de sales para ZLD progresivo.

Esta investigación traslacional es imperativa para cerrar brechas entre laboratorio y operación real, garantizando soluciones adaptadas a la escasez hídrica y fragilidad ecosistémica de zonas áridas.

REFERENCIAS

- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2024). Landfill leachate treatment: Conventional and emerging technologies for environmental sustainability. *Journal of Environmental Management*, 354, 120308. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.120308>
- Akers, K. G., Sferdean, F. C., & Nicholls, N. H. (2020). Database selection in systematic reviews: An insight through citation analysis. *Journal of the Medical Library Association*, 108(4), 613-617. <https://doi.org/10.5195/jmla.2020.893>
- Al-Yaqout, A. F. (2003). Evaluation of landfill leachate in arid climate—a case study. *Journal of Environmental Monitoring and Assessment*, 85(1), 1-18. <https://doi.org/10.1023/A:1025023314037>
- Amor, C., De Torres-Socías, J., Peres, J. A., & Beltrán, F. J. (2023). Coagulation-flocculation of mature landfill leachate: Optimization by response surface methodology. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(2), 109285. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109285>
- Anjum, M., Al-Makishah, N., & Barakat, M. A. (2023). Landfill leachate: A critical review of characterization and treatment technologies. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135501. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135501>
- Bashir, M. J. K., Aziz, H. A., Yusoff, M. S., & Adlan, M. N. (2016). Applicability of physico-chemical treatment methods for landfill leachate: A review. *Desalination and Water Treatment*, 57(52), 24939-24957. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1125531>
- Bramer, W. M., de Jonge, G. B., Rethlefsen, M. L., Mast, F., & Kleijnen, J. (2016). A systematic approach to searching: An efficient and complete method to develop literature searches. *Journal of the Medical Library Association*, 104(3), 224-231. <https://doi.org/10.3163/1536-5050.104.3.012>



- Castrillón, L., Fernández-Nava, Y., Ulmanu, M., Anger, I., & Maraón, E. (2010). Physico-chemical and biological characterization of urban municipal landfill leachate. *Waste Management*, 30(2), 228-233. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.09.015>
- De, S., Visvanathan, C., & Basu, S. (2019a). Air stripping for ammonia removal from landfill leachate: Process optimization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(5), 103289. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103289>
- De, S., Visvanathan, C., & Basu, S. (2019b). Adsorption of heavy metals from high-strength landfill leachate onto activated carbon: Kinetic and equilibrium studies. *Journal of Cleaner Production*, 228, 527-538. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.227>
- Deng, Y., Ezersky, A., & Xu, J. (2020). pH effects on heavy metal removal from landfill leachate by chemical precipitation. *Chemosphere*, 246, 125763. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125763>
- Fang, L., Zhang, J., & Li, A. (2021). Co-digestion of landfill leachate with agricultural waste: Synergistic effects and optimization. *Bioresource Technology*, 337, 125441. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125441>
- Ferrari, R. (2015). Writing narrative style literature reviews. *Medical Writing*, 24(4), 230-235. <https://doi.org/10.1179/2047480615Z.000000000329>
- Gomes, J., Costa, R., Quinta-Ferreira, R. M., & Martins, R. C. (2022). Ozonation of landfill leachate: Influence of high chloride content on process efficiency. *Ozone: Science & Engineering*, 44(3), 237-250. <https://doi.org/10.1080/01919512.2021.1979470>
- Guo, Y., Huang, Y., Chen, Y., & Peng, H. (2022). Solar-assisted membrane distillation for zero liquid discharge of landfill leachate: Energy and cost analysis. *Desalination*, 527, 115543. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115543>
- Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 32(4), 297-336. <https://doi.org/10.1080/10643380290813462>
- Leite, V. D., de Oliveira, R., & Salla, M. R. (2019). Ammonia stripping efficiency in horizontal flow reactors: Surface load effects. *Journal of Environmental Management*, 232, 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.016>

- Lindamulla, D., Lokupitiya, E., & Dayawansa, N. D. K. (2022). Seasonal variation of landfill leachate characteristics in arid conditions. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(6), 389. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09954-8>
- Lorente, G., Viennet, D., Labat, D., Massei, N., Fournier, M., Sebilo, M., & Crançon, P. (2020). Mixing processes of autogenic and allogenic waters in a large karst aquifer on the edge of a sedimentary basin. *Journal of Hydrology*, 125859. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125859>
- Luo, T., Yuan, S., Chen, J., Wang, X., & Zhuang, Y. (2020). Characteristics of leachate from municipal solid waste landfills in China. *Waste Management*, 102, 618-628. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.021>
- Mavakala, B. K., Le Faucheur, S., Mubedi, J. I., & Pigois, K. E. (2016). Heavy metal seasonal variations in landfill leachate: Arid vs humid climates. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(22), 22814-22823. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7431-8>
- Mojiri, A., Aziz, H. A., & Zaman, N. Q. (2019). Removal of COD and color from landfill leachate by coagulation-flocculation. *Desalination and Water Treatment*, 147, 303-309. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23841>
- Mojiri, A., Aziz, H. A., & Zaman, N. Q. (2021). A review of physico-chemical treatment methods for landfill leachate. *Environmental Technology Reviews*, 10(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/21622515.2020.1867103>
- Munn, Z., Peters, M. D., Stern, C., Tufanaru, C., McArthur, A., & Aromataris, E. (2018). Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. *BMC Medical Research Methodology*, 18(1), 1-7. <https://doi.org/10.1186/s12874-018-0611-x>
- Naveen, B. P., Mahapatra, D. M., Sitharam, T. G., & Sivapullaiah, P. 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>
- Peng, H. (2017). Membrane processes for landfill leachate treatment: A review. *Journal of Membrane Science*, 524, 565-581. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.11.060>



- Pico, Y., Alfathan, A., & Barceló, D. (2020). Mass spectrometric screening of contaminants in landfill leachates. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, 26, e00085. <https://doi.org/10.1016/j.teac.2020.e00085>
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, 150(3), 468-493. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.101>
- Rodríguez, J., Contreras, D., & Pérez, M. (2019). Statistical optimization of Fenton process for high-strength landfill leachate. *Journal of Hazardous Materials*, 368, 234-242. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.01.066>
- Rodríguez, J., Zúñiga, L., & Vergara, C. (2021). Solar evaporation systems for landfill leachate management in arid zones. *Solar Energy*, 225, 448-457. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.059>
- Saeed, T., Khan, S., & Ilyas, S. (2021). Hybrid constructed wetlands for leachate treatment under water scarcity conditions. *Ecological Engineering*, 169, 106313. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106313>
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Subiza-Pérez, M., Villanueva, M., Flores, J., & Barrena, R. (2023). Current trends in landfill leachate treatment technologies. *Water Research*, 232, 119663. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119663>
- Trinh, T. K., Kang, Y., & Yoon, Y. (2023). Salinity effects on Fenton oxidation of landfill leachate: Mechanism and optimization. *Science of the Total Environment*, 868, 161607. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161607>
- Vahabian, M., Ghanadian, M., & Hosseini, S. S. (2019). Characterization of landfill leachate in arid regions: Seasonal variations. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 17(1), 145-153. <https://doi.org/10.1007/s40201-019-00357-8>
- Vasudevan, S., Eves, A., & Jones, P. (2023). Solar-powered electrocoagulation for high-TDS landfill leachate treatment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 173, 113027. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113027>

- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2010). Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*, 84(2), 523-538. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3>
- Wang, X., Zhao, X., Wang, J., & Li, X. (2021). Sedimentation and filtration processes for landfill leachate pretreatment. *Water Science and Technology*, 83(5), 1123-1134. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.597>
- Wang, X., Zhao, X., Wang, J., & Li, X. (2024). Modified zeolites for ammonium removal from saline landfill leachate. *Water Research*, 242, 120113. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120113>
- Zhang, J., Wang, Q., & Li, A. (2022). UV/H₂O₂ treatment of landfill leachate: Impact of turbidity and humic substances. *Chemosphere*, 287, 132045. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132045>
- Zhao, X., Wang, J., & Li, X. (2022). Optimization of coagulation-flocculation for high-concentration landfill leachate: Statistical modeling approach. *Journal of Water Process Engineering*, 47, 102746. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102746>