

## **ARTÍCULO ORIGINAL**

### **Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales con fines de reutilización en áreas verdes**

#### **Design of a wastewater treatment system aimed at reuse in green spaces**

De la Cruz, B.<sup>1</sup>  y Pérez, L.<sup>2</sup> 

### **RESUMEN**

El uso de agua potable para el riego de áreas verdes en zonas urbanas constituye una práctica insostenible frente a la creciente demanda hídrica y a la limitada disponibilidad del recurso. En este contexto, la presente investigación tiene como propósito diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales que permita la reutilización del efluente tratado en áreas verdes. El estudio es de tipo aplicado, con enfoque cuantitativo, diseño no experimental y nivel descriptivo. La población considerada es de 456 habitantes, con un caudal promedio de diseño de 1.68 L/s, y el análisis del suelo lo clasifica como arena arcillosa con una capacidad portante de 192 kg/cm<sup>2</sup>. El sistema propuesto integra procesos de tratamiento preliminar, primario, secundario y desinfección, mediante unidades como cámara de rejillas, desarenador, tanque Imhoff, filtro biológico, sedimentador y cámara de cloración. Los resultados del diseño evidencian que el sistema es técnico y ambientalmente viable, permite obtener un efluente apto para el riego de áreas verdes y cumple con la normativa peruana vigente, constituyendo una solución sostenible para contextos urbanos altoandinos, basada en una gestión eficiente del recurso hídrico y principios de economía circular.

**Palabras clave:** Sostenibilidad Urbana; Gestión del Recurso Hídrico; Efluente Tratado; Infraestructura Sanitaria.

### **ABSTRACT**

The use of potable water for irrigating urban green areas represents an unsustainable practice under increasing water demand and limited water availability. In this context, this research aims to design a wastewater treatment system that enables the safe reuse of treated effluent for irrigating green areas. The study follows an applied approach, with a quantitative methodology, non-experimental design, and descriptive level. The considered population is 456 inhabitants, with an average design flow rate of 1.68 L/s, and the soil is classified as clayey sand with a bearing capacity of 192 kg/cm<sup>2</sup>. The proposed system integrates preliminary, primary, secondary, and disinfection treatment processes, including units such as a screening chamber, grit chamber, Imhoff tank, biological filter, sedimentation unit, and chlorination chamber. The design results indicate that the system is technically and environmentally feasible, produces a treated effluent suitable for irrigation of green areas, and complies with current Peruvian regulations, representing a sustainable solution for high-Andean urban contexts based on efficient water resource management and circular economy principles.

**Keywords:** Urban Sustainability; Water Resource Management; Treated Effluent; Sanitary Infrastructure.

\* Autor para correspondencia

<sup>1</sup>Universidad César Vallejo, Perú. Email: [bcruzan@ucvvirtual.edu.pe](mailto:bcruzan@ucvvirtual.edu.pe), [lperezpe20@ucvvirtual.edu.pe](mailto:lperezpe20@ucvvirtual.edu.pe)

## INTRODUCCIÓN

El acceso al agua constituye uno de los principales retos para la humanidad en las próximas décadas, particularmente en áreas urbanas que enfrentan una creciente escasez de agua debido a la acelerada urbanización, el crecimiento demográfico y los efectos del cambio climático. Estudios recientes proyectan que la población urbana expuesta a situaciones de estrés hídrico podría aumentar de 933 millones en 2016 a entre 1 693 y 2 373 millones para 2050, debido al desbalance entre la disponibilidad hídrica y la demanda de agua en las ciudades a nivel global (He et al., 2021). Asimismo, más del 90 % de las grandes ciudades ya enfrentan desafíos significativos de disponibilidad o calidad del agua, siendo la expansión poblacional y el incremento en la demanda los factores más determinantes de esta situación (Liu et al., 2024). Estas tendencias evidencian la urgencia de soluciones innovadoras para la gestión hídrica urbana, incluida la reutilización de aguas residuales como alternativa sostenible para usos no potables.

En América Latina, la gestión del agua y de las aguas residuales se desarrolla en un contexto normativo caracterizado por avances desiguales y una elevada heterogeneidad entre países, lo que limita la implementación efectiva de estrategias integradas de saneamiento y reutilización a escala urbana (Rodríguez et al., 2022). Estas limitaciones regulatorias, asociadas a la ausencia de estándares técnicos armonizados y a marcos institucionales poco consolidados, restringen la adopción de soluciones de reutilización segura de efluentes tratados. En este escenario, se destaca la necesidad de fortalecer marcos normativos coherentes y técnicamente fundamentados como condición clave para avanzar hacia una gestión hídrica urbana más sostenible en la región (OECD, 2025).

Diversos estudios científicos han demostrado la viabilidad del diseño de sistemas de tratamiento de aguas residuales para su reutilización en el riego de áreas verdes urbanas, incluyendo parques y jardines, al mismo tiempo que resaltan la importancia de considerar aspectos de salud pública asociados a la calidad del efluente. Por ejemplo, la reutilización de aguas residuales tratadas para el riego de espacios verdes urbanos ha sido planteada como una solución sostenible para aliviar la presión sobre fuentes de agua dulce y reducir la escasez hídrica en entornos urbanos (Boukhaffa et al., 2025). Investigaciones globales también señalan que, con tratamientos adecuados que reduzcan contaminantes microbiológicos y físico-químicos, el agua residual tratada puede utilizarse de forma segura para mantener el verde urbano, siempre que se implementen mecanismos de monitoreo y control de calidad (Mishra et al., 2023). Sin embargo, el uso de efluentes tratados con fines de riego implica considerar riesgos microbiológicos, ya que

estos pueden alojar patógenos que afectan la salud humana si no se eliminan adecuadamente durante el proceso de tratamiento, por lo cual el diseño debe incluir etapas de tratamiento que reduzcan la presencia de bacterias, virus y otros agentes patógenos (Ofori et al., 2025). A partir de estas evidencias, el diseño de sistemas de tratamiento con capacidades de producir agua de calidad adecuada para riego urbano se posiciona como una alternativa técnica que, bien implementada, puede combinar sostenibilidad ambiental y protección sanitaria.

Investigaciones en contextos latinoamericanos han demostrado que el diseño y operación de plantas de tratamiento que integran procesos de tratamiento biológico y desinfección puede reducir de manera significativa tanto la demanda bioquímica de oxígeno (DBO) como la carga microbiológica patógena, lo cual es fundamental para minimizar riesgos de salud pública asociados a la presencia de bacterias y virus en efluentes reutilizados (Ofori et al., 2025). Evaluaciones de ciclo de vida y análisis de riesgos han mostrado que, si bien el uso de agua residual tratada puede reducir la presión sobre fuentes de agua dulce, también puede introducir contaminantes microbiológicos, químicos y otros agentes que afectan la salud pública y el ambiente si no se aplican tratamientos adecuados (Santos & Brás, 2024). Por otra parte, estudios sobre reúso de aguas tratadas han enfatizado que la presencia de patógenos también puede estar vinculada a la proliferación de vectores y a la producción de olores desagradables si los procesos de tratamiento son insuficientes o no incluyen etapas de desinfección adecuadas (Wastewater Treatment and Reuse: a Review of its Applications and Health Implications, 2021).

Estos antecedentes científicos muestran que la incorporación de etapas de tratamiento que reduzcan de forma confiable la carga patógena del agua residual es esencial para garantizar su uso seguro en el riego de parques, jardines y otros espacios verdes urbanos, reforzando así la justificación de diseñar sistemas de tratamiento con criterios técnicos y de salud pública claros.

En este contexto, el presente artículo tiene como objetivo principal diseñar un sistema de tratamiento de aguas residuales orientado a la reutilización segura del efluente tratado en áreas verdes urbanas. La propuesta se desarrolla considerando las condiciones hidráulicas y geotécnicas del sitio, así como criterios técnicos de tratamiento que permitan reducir tanto la carga orgánica como los riesgos sanitarios asociados al reúso del agua.

El diseño planteado busca constituirse en una alternativa técnica viable para el uso racional del recurso hídrico en entornos urbanos, aportando a la gestión sostenible del agua mediante la incorporación de sistemas de tratamiento que permitan disminuir la demanda de agua potable para

el riego de parques y jardines, y que puedan ser replicables en contextos urbanos con características similares.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

La investigación se desarrolló en el distrito de Independencia, ubicado en la región Áncash, Perú, caracterizado por un entorno urbano con demanda creciente de agua para el mantenimiento de áreas verdes públicas. El área de estudio corresponde a una zona urbana donde se proyecta la implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales orientado al reúso del efluente tratado en el riego de parques y jardines. La población servida considerada para el diseño fue de 456 habitantes, a partir de la cual se estimó un caudal medio de aguas residuales de 1,68 L/s, valor utilizado como base para el dimensionamiento hidráulico del sistema.

Para el desarrollo del diseño se emplearon los siguientes materiales y fuentes de información:

- Información secundaria proveniente de estudios técnicos y publicaciones científicas relacionadas con el tratamiento y reúso de aguas residuales.
- Resultados de ensayos geotécnicos del terreno, que incluyeron la determinación de la capacidad portante, contenido de humedad y clasificación del suelo según el sistema SUCS.
- Herramientas informáticas, principalmente hojas de cálculo, utilizadas para el procesamiento de datos hidráulicos y el dimensionamiento de las unidades de tratamiento.
- Criterios técnicos y parámetros de diseño comúnmente empleados en sistemas de tratamiento de aguas residuales de pequeña escala reportados en la literatura especializada.

Todas las magnitudes fueron expresadas conforme al Sistema Internacional de Unidades (SI).

El procedimiento seguido para el diseño del sistema de tratamiento se desarrolló de manera secuencial en las siguientes etapas:

1. Caracterización del caudal de diseño, a partir de la población servida y los coeficientes de generación de aguas residuales reportados.
2. Caracterización del terreno, utilizando los resultados de los ensayos geotécnicos para verificar la aptitud del suelo y definir criterios estructurales de las unidades proyectadas.
3. Selección del esquema de tratamiento, considerando procesos preliminares, primarios y secundarios, así como una etapa de desinfección, en función de la calidad requerida del efluente para su reúso en áreas verdes urbanas.

4. Dimensionamiento hidráulico y volumétrico de cada una de las unidades del sistema, aplicando ecuaciones y parámetros de diseño reportados en estudios previos y manuales técnicos especializados.
5. Evaluación del efluente tratado, verificando que el diseño propuesto permita reducir la carga orgánica y microbiológica a niveles compatibles con su aplicación en riego de parques y jardines urbanos.

Los cálculos hidráulicos, volumétricos y geométricos del sistema de tratamiento se realizaron mediante hojas de cálculo, lo que permitió evaluar diferentes escenarios de demanda y verificar la coherencia técnica del diseño propuesto. El análisis se centró en la capacidad del sistema para tratar el caudal estimado y generar un volumen de agua reutilizable adecuado para el riego de áreas verdes.

## RESULTADOS

### Características de la zona de estudio

El proyecto se localiza en el sector Uquia, distrito de Independencia, provincia de Huaraz, región Áncash. El clima predominante es templado seco de altitud, con temperaturas promedio anuales entre 11 °C y 18 °C. Se realizó un levantamiento topográfico considerando los linderos existentes del predio designado para la planta. Se pudo definir un perímetro de 231.16 m y un área de 3,430.28 m<sup>2</sup>. El análisis altimétrico mostró un pendiente natural promedio de 16.09 %, con inclinaciones moderadas y sin cambios bruscos. Esta condición resultó favorable para el diseño hidráulico, al permitir el flujo por gravedad, minimizando el uso de bombeo.

Referente al análisis de suelos, se realizó una calicata con una profundidad de 2.00 m y su clasificación SUCS determinó un suelo SC (grava bien graduada semi compactada). Los principales resultados se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 1**

*Propiedades físicas y mecánicas del suelo en el área de estudio*

Parámetro	Valor
Profundidad de calicata	2.00 m
Pasa malla N° 200	27.1 %
Límite líquido	28 %
Índice plástico	19
Contenido de humedad	13.46 %
Peso específico	1.941 g/cm <sup>3</sup>
Capacidad portante	1.29 kg/cm <sup>2</sup>
Clasificación SUCS	SC

*Nota.* Esta tabla presenta los principales resultados del estudio de suelos, permitiendo evaluar la resistencia del terreno y su comportamiento mecánico.

## Caudal de diseño

La urbanización proyectada en Independencia, Áncash, cuenta con 76 viviendas, considerando una densidad de 6 habitantes por vivienda (según RNE OS.090), lo que da una población futura de 456 habitantes. Se identificaron tres tipos de usuarios: viviendas domésticas, instituciones (educativas y de salud), y una unidad comercial. Se adoptó una dotación de 180 litros/hab·día para zonas frías.

Con base en los cálculos realizados, se determinaron los caudales característicos que permiten dimensionar correctamente la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). A continuación, se presentan los valores del caudal máximo, promedio y mínimo de diseño, que consideran los aportes domésticos, no domésticos e infiltraciones conforme a la normativa vigente:

**Tabla 2**

*Caudales mínimo, promedio y máximo considerados para el diseño de la PTAR*

<b>Tipo de caudal</b>	<b>Ecuación utilizada</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Q <sub>máx</sub> diseño	Q <sub>MHscd</sub> + Q <sub>MHscnd</sub> + Q <sub>inf</sub>	1.68	L/s
Q <sub>promedio</sub> diseño	Q <sub>Pscd</sub> + Q <sub>MHscnd</sub> + Q <sub>inf</sub>	0.92	L/s
Q <sub>mín</sub> diseño	Q <sub>minscd</sub> + Q <sub>MHscnd</sub> + Q <sub>inf</sub>	0.54	L/s

*Nota.* Esta tabla resume los caudales críticos utilizados en el dimensionamiento del sistema de tratamiento.

## Pretratamiento

El pretratamiento del sistema considera tres componentes esenciales: cámara de rejas para retención de sólidos gruesos, desarenador para partículas sedimentables, y canal Parshall para medición del caudal. Estas unidades garantizan un ingreso controlado al sistema, reduciendo el riesgo de obstrucciones y facilitando la operación hidráulica de las etapas posteriores.

**Tabla 3***Parámetros principales del sistema de pretratamiento*

<b>Componente</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Cámara de rejillas	Número de barras	9	und
	Altura total de reja	0.70	m
Desarenador	Longitud del canal	2.60	m
	Altura útil del canal	0.50	m
Canal Parshall	Ancho de garganta	0.15	m

*Nota.* Estas unidades aseguran la remoción inicial de residuos sólidos y materiales pesados, además del control de caudal.

### Tratamiento primario

En esta etapa se diseñó un tanque Imhoff que permite separar sólidos sedimentables y estabilizarlos mediante digestión anaerobia. Su capacidad fue dimensionada para cubrir las necesidades de la población proyectada al horizonte de diseño.

**Tabla 4***Dimensiones esenciales del tanque Imhoff*

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Volumen de sedimentación	6.62	m <sup>3</sup>
Volumen de digestión	31.92	m <sup>3</sup>
Altura total del tanque	6.10	m

*Nota.* El tanque Imhoff cumple funciones duales de sedimentación y digestión primaria, optimizando espacio y facilitando el manejo de lodos sin necesidad de equipos mecánicos.

### Tratamiento secundario

El tratamiento secundario incluye un filtro biológico percolador para la degradación de materia orgánica disuelta, seguido por un sedimentador tipo Dortmund que remueve los sólidos generados durante el proceso biológico.

**Tabla 5***Parámetros clave del tratamiento biológico secundario*

Componente	Parámetro	Valor	Unidad
Filtro biológico	Volumen del reactor	206.96	m <sup>3</sup>
	Altura del medio filtrante	3.00	m
Sedimentador Dortmund	Volumen útil total	9.07	m <sup>3</sup>
	Altura del sedimentador	2.20	m

*Nota.* Esta combinación permite una alta remoción de DBO y sólidos en suspensión, manteniendo la eficiencia del sistema sin necesidad de recirculación de lodos.

### Tratamiento terciario

Para garantizar la calidad sanitaria del efluente tratado, se diseñó una cámara de cloración provista de baffles que aseguran el tiempo de contacto necesario para la desinfección.

**Tabla 6***Características de la cámara de cloro*

Parámetro	Valor	Unidad
Volumen total	1.65	m <sup>3</sup>
Número de baffles	6	und
Largo útil de contacto	2.28	m

*Nota.* El diseño permite reducir significativamente los coliformes fecales, cumpliendo con los valores límites establecidos para el reúso en riego de áreas verdes.

### Gestión de lodos

La gestión de lodos contempla un lecho de secado natural y un pozo de percolación para infiltrar excedentes líquidos. Ambas unidades fueron dimensionadas para operar sin intervención mecánica.

**Tabla 7***Parámetros representativos del sistema de manejo de lodos*

Componente	Parámetro	Valor	Unidad
Lecho de secado	Volumen por ciclo	4.36	m <sup>3</sup>
	Área total	14.54	m <sup>2</sup>
Pozo de percolación	Diámetro	3.00	m
	Altura efectiva	2.50	m

*Nota.* El sistema pasivo de secado y percolación permite un manejo económico y eficiente de los subproductos sólidos y líquidos del tratamiento.



### Balance de masa

La comparación entre las condiciones de entrada y salida del sistema evidencia el rendimiento de la planta, demostrando el cumplimiento de los estándares nacionales para reúso.

**Tabla 8**

*Resumen del balance de masa del sistema de tratamiento*

Parámetro	Entrada	Salida	Unidad
DBO <sub>5</sub>	287.02	14.06	mg/L
Sólidos suspendidos	516.64	9.30	mg/L
Coliformes fecales	1.15 × 10 <sup>8</sup>	114.81	NMP/100 mL
Oxígeno disuelto (OD)	0.30	5.00	mg/L

*Nota.* El sistema alcanza eficiencias superiores al 95 % en remoción de materia orgánica y sólidos, asegurando condiciones óptimas para la reutilización segura del agua tratada.

## DISCUSIÓN

Las condiciones geotécnicas del terreno influyen directamente en la estabilidad y desempeño estructural de las unidades que conforman un sistema de tratamiento de aguas residuales. Estudios recientes indican que la capacidad portante y el tipo de suelo determinan la distribución de cargas y el riesgo de asentamientos en cimentaciones superficiales, especialmente en infraestructuras enterradas (Keba Lukueta & Isobe, 2024). Asimismo, investigaciones en suelos con matrices finas y comportamiento mixto han demostrado que una adecuada caracterización geotécnica permite prever un comportamiento estructural estable bajo cargas operativas (Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025). En este contexto, la capacidad portante obtenida en el terreno evaluado resulta compatible con la implantación de las unidades proyectadas, siempre que el diseño estructural considere las propiedades mecánicas del suelo identificadas.

El caudal de diseño determinado en este estudio integra aportes domésticos, no domésticos e infiltración, lo cual es coherente con enfoques actuales de diseño que recomiendan considerar la variabilidad real del influente para evitar subdimensionamientos hidráulicos. Estudios recientes sobre planificación de plantas de tratamiento señalan que la incorporación de coeficientes de

retorno y factores adicionales asociados a usos no residenciales mejora la representatividad del caudal de entrada y la confiabilidad operativa del sistema (Kolpakova et al., 2024). En este contexto, el caudal estimado resulta técnicamente consistente con prácticas de diseño aceptadas para sistemas de tratamiento orientados al reúso de aguas residuales en entornos urbanos.

El diseño de las unidades del sistema se sustenta en las etapas convencionales del tratamiento de aguas residuales descritas en la literatura científica. La inclusión de rejillas y desarenadores permite reducir la carga de sólidos gruesos e inorgánicos, protegiendo las unidades posteriores y mejorando la eficiencia operativa del sistema (Fernandes et al., 2024). Asimismo, la incorporación de una etapa de desinfección es considerada esencial para disminuir la carga microbiológica del efluente antes de su reúso en áreas verdes, siempre que se garantice un adecuado control del proceso (Shamshad & Ur Rehman, 2025). El manejo de lodos mediante técnicas de secado forma parte integral del tratamiento, al facilitar una disposición más segura y reducir el volumen de residuos generados (Shamshad & Ur Rehman, 2025).

Los altos porcentajes de remoción de DBO<sub>5</sub>, sólidos suspendidos y coliformes estimados para el sistema propuesto guardan consistencia con investigaciones sobre el desempeño de plantas de tratamiento orientadas al reúso de efluentes. Estudios recientes que evaluaron plantas de tratamiento urbanas reportan que, bajo condiciones operativas controladas, es posible alcanzar eficiencias elevadas en la remoción de materia orgánica y sólidos, así como reducciones marcadas en indicadores microbiológicos cuando se incorpora una etapa de desinfección adecuada, lo cual respalda la aplicabilidad de los efluentes tratados para usos no potables como el riego de áreas verdes (Federigi et al., 2024).

## **CONCLUSIONES**

El sistema de tratamiento de aguas residuales diseñado demostró ser técnica y ambientalmente viable para la reutilización del agua tratada en áreas verdes urbanas. El análisis geotécnico evidenció que las condiciones del terreno, con suelo tipo SC (arena arcillosa), capacidad portante adecuada y tasas de percolación favorables, permiten la construcción segura de las unidades del sistema. Por su parte, el análisis hidráulico y la estimación de caudales máximos, promedio y mínimos garantizaron un dimensionamiento preciso de las unidades de tratamiento, incluyendo la cámara de rejillas, desarenador, tanque Imhoff, sedimentador secundario tipo Dortmund, cámara de cloración y lecho de secado, asegurando eficiencia en la remoción de sólidos, materia orgánica y microorganismos patógenos, así como un manejo seguro de los lodos generados. Los resultados obtenidos muestran que la propuesta permite reducir significativamente

la carga contaminante del efluente, asegurando su calidad para reúso en riego de áreas verdes, lo que contribuye a una gestión hídrica más eficiente y sostenible. Asimismo, la investigación evidencia que la integración de criterios técnicos, hidráulicos y geotécnicos en el diseño de sistemas de tratamiento en contextos urbanos altoandinos constituye un aporte relevante al conocimiento sobre la reutilización de aguas residuales y la implementación de soluciones sostenibles de economía circular en entornos urbanos, reforzando la importancia de estrategias técnicas adaptadas a las condiciones locales para optimizar el uso de los recursos hídricos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boukhaffa, C., Lafdil, M., Chkird, F. et al. (2025). Reusing Treated Wastewater for Irrigation in Urban Areas: Challenges and Opportunities for Green Spaces: Review. *E3S Web Conf.*, 632, 01011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202563201011>
- Federigi, I., Salvadori, R., Lauretani, G., Leone, A., Lippi, S., Marvulli, F., Pagani, A., Verani, M., & Carducci, A. (2024). Wastewater Treatment Plants Performance for Reuse: Evaluation of Bacterial and Viral Risks. *Water*, 16(10), 1399. <https://doi.org/10.3390/w16101399>
- Fernandes, J., Ramísio, P. J., & Puga, H. (2024). A Comprehensive Review on Various Phases of Wastewater Technologies: Trends and Future Perspectives. *Eng*, 5(4), 2633-2661. <https://doi.org/10.3390/eng5040138>
- Feng, S., Xiao, H., Liu, R., & Liu, M. (2022). Single-Side Shear Bond Strength and OTZ Microstructure of UHPC Repair Materials with Concrete Substrate
- He, C., Liu, Z., Wu, J., Pan, X., Fang, Z., Li, J., & Brett A., B. (2021). Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nat Commun*, 12, 4667. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>
- Kesari, K.K., Soni, R., Jamal, Q.M.S. et al. (2021). Wastewater Treatment and Reuse: a Review of its Applications and Health Implications. *Water Air Soil Pollut* 232, 208. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05154-8>
- Keba Lukueta, E., & Isobe, K. (2024). Bearing Capacity of a Shallow Foundation above the Soil with a Cavity Based on Rigid Plastic Finite Element Method. *Applied Sciences*, 14(5), 1975. <https://doi.org/10.3390/app14051975>
- Kolpakova, V., Yeremeyeva, Y., Anapyanova, S., et al. (2024). Design and construction of wastewater treatment facilities for small sewerage facilities. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 2666-0164. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100774>

- Liu, Z., Ying, J., He, C. et al. (2024). Scarcity and quality risks for future global urban water supply. *Landsc Ecol*, 39, 10. <https://doi.org/10.1007/s10980-024-01832-0>
- Mishra, S., Kumar, R., & Kumar, M. (2023). Use of treated sewage or wastewater as an irrigation water for agricultural purposes- Environmental, health, and economic impacts. *Environment Research Themes*, 6, 100051. <https://doi.org/10.1016/j.totert.2023.100051>.
- OECD (2025), The Circular Water Economy in Latin America, *OECD Urban Studies*, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/a0508572-en>.
- Ofori, S., Di Leto, Y., Smrčková, S., et al. (2025). Treated wastewater reuse for crop irrigation: a comprehensive health risk assessment. *Environ. Sci.: Adv.*, 4, 252-269. <http://dx.doi.org/10.1039/D4VA00274A>
- Rodríguez, C., García, B., Pinto, C., Sánchez, R., Serrano, J., & Leiva, E. (2022). Water Context in Latin America and the Caribbean: Distribution, Regulations and Prospects for Water Reuse and Reclamation. *Water*, 14(21), 3589. <https://doi.org/10.3390/w14213589>
- Santos, L., Brás, I., Ferreira, M., Domingos, I., & Ferreira, J. (2024). Life Cycle Assessment of Green Space Irrigation Using Treated Wastewater: A Case Study. *Sustainability*, 16(13), 5696. <https://doi.org/10.3390/su16135696>
- Shamsad, J., & Ur Rehman, R. (2025). Innovative approaches to sustainable wastewater treatment: a comprehensive exploration of conventional and emerging technologies. *Environ. Sci.: Adv.* 4(2). <http://dx.doi.org/10.1039/D4VA00136B>
- Shi, X., Miao, X., Xiong, H., & Bian, X. (2025). Estimation of bearing capacity of bimsoils under shallow foundations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(9), 1674-7755. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.11.009>