

Soluciones tecnológicas para el abastecimiento de agua potable en ciudades metrópolis: una revisión sistemática

Technological Solutions for Drinking Water Supply in Metropolitan Cities: A Systematic Review

Jesús Alberto Barreto-Paico¹, bpaicoja@ucvvirtual.edu.pe, <https://orcid.org/0009-0005-1696-2831>

¹Universidad Cesar Vallejo, Chiclayo, Perú.

Recibido: (19/02/2026), Aceptado: (20/04/2026)

Resumen. En este estudio se evaluó la evidencia científica sobre soluciones tecnológicas aplicadas al abastecimiento de agua potable en ciudades metropolitanas. Se realizó una revisión sistemática bajo el protocolo PRISMA, analizando 21 artículos indexados en *Scopus*, *Web of Science* y *SciELO* entre 2022 y 2025. Los resultados evidenciaron un predominio de tecnologías digitales orientadas al monitoreo, distribución y control inteligente de redes hídricas, con mejoras en eficiencia operativa y calidad del agua. Se concluye que la innovación tecnológica fortalece la gestión urbana del agua, aunque su implementación sostenible requiere capacidades institucionales y políticas públicas adecuadas.

Palabras clave: agua potable, metrópolis, tecnología, gestión de recursos.

Abstract. This study evaluated the scientific evidence on technological solutions applied to drinking water supply in metropolitan cities. A systematic review was conducted under the PRISMA protocol, analyzing 21 articles indexed in *Scopus*, *Web of Science*, and *SciELO* between 2022 and 2025. The results showed a predominance of digital technologies aimed at monitoring, distribution, and intelligent control of water networks, with improvements in operational efficiency and water quality. It is concluded that technological innovation strengthens urban water management, although its sustainable implementation requires adequate institutional capacities and public policies.

Keywords: drinking water, metropolis, technology, resources management.

I. INTRODUCCIÓN

El abastecimiento de agua potable en ciudades metropolitanas constituye uno de los principales desafíos de la gestión urbana contemporánea debido al crecimiento poblacional, la presión sobre los recursos hídricos y los efectos del cambio climático. Estas condiciones han impulsado el desarrollo de soluciones tecnológicas orientadas a optimizar la captación, distribución y control del agua mediante herramientas digitales e inteligentes [1]. En este contexto, tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), los sensores inteligentes y la inteligencia artificial han adquirido relevancia por su capacidad para mejorar la eficiencia operativa, reducir pérdidas y fortalecer el monitoreo en tiempo real de las redes hídricas urbanas [2], [3].

Asimismo, la transformación digital del sector hídrico ha favorecido la automatización de procesos y la incorporación de modelos predictivos para la gestión sostenible del agua potable [4], [5]. Diversos estudios recientes destacan la necesidad de integrar enfoques tecnológicos y estrategias de planificación urbana que permitan responder a escenarios de estrés hídrico y creciente demanda en grandes ciudades [6], [3]. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue evaluar la evidencia científica disponible sobre soluciones tecnológicas aplicadas al abastecimiento de agua potable en ciudades metropolitanas, identificando las principales tecnologías implementadas, sus aportes en términos de eficiencia y calidad del agua, así como las tendencias emergentes en innovación para la gestión hídrica urbana sostenible.

II. METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló como una revisión sistemática de literatura con alcance analítico, orientada a evaluar la evidencia científica reciente sobre soluciones tecnológicas aplicadas al abastecimiento de agua potable en ciudades metropolitanas. El procedimiento siguió las directrices PRISMA, con el propósito de garantizar transparencia en la identificación, depuración, elegibilidad e inclusión de los estudios. La revisión no se limitó a describir tecnologías, sino que comparó sus funciones, niveles de aplicación, beneficios reportados y restricciones técnicas e institucionales.

La búsqueda se realizó en *Scopus*, *Web of Science* y *SciELO*, considerando publicaciones científicas entre 2022 y 2025. Se utilizaron combinaciones booleanas en inglés asociadas con *smart water systems*, *urban water supply*, *drinking water*, *IoT*, *artificial intelligence*, *smart monitoring*, *water distribution networks* y *water quality control*. Se incluyeron artículos científicos y revisiones sistemáticas que abordaran tecnologías aplicadas a captación, tratamiento, distribución, monitoreo o control del agua potable en contextos urbanos. Se excluyeron documentos sin relación directa con el abastecimiento de agua potable, estudios meramente conceptuales, trabajos sin información técnica verificable y publicaciones duplicadas.

El proceso de selección permitió identificar inicialmente 287 registros. Luego de eliminar duplicados y aplicar el cribado por título y resumen, se evaluaron 94 documentos a texto completo. Finalmente, se incluyeron 21 estudios que cumplieran criterios de pertinencia temática, actualidad, claridad metodológica y evidencia sobre desempeño tecnológico. Para fortalecer el rigor del análisis, cada artículo fue examinado mediante una matriz de extracción que integró: tipo de tecnología, etapa del ciclo hídrico intervenida, objetivo técnico, indicadores de desempeño, beneficios reportados, limitaciones y condiciones de implementación.

El análisis se realizó mediante síntesis temática comparativa. Primero, las tecnologías fueron clasificadas según su función principal: monitoreo inteligente, control de calidad, optimización de redes, automatización operativa, modelado predictivo y apoyo a la toma de decisiones. Luego, se compararon sus aportes en términos de eficiencia operativa, reducción de pérdidas, mejora de la calidad del agua, capacidad predictiva y sostenibilidad urbana. Finalmente, se identificaron convergencias, vacíos de investigación y desafíos de implementación, especialmente aquellos vinculados con infraestructura, interoperabilidad de datos, capacidades institucionales y escalabilidad en ciudades metropolitanas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la presente revisión sistemática se derivaron del análisis de 21 artículos científicos publicados entre 2022 y 2025, seleccionados mediante el protocolo PRISMA. Los estudios revisados abordaron soluciones tecnológicas aplicadas al abastecimiento de agua potable en contextos metropolitanos, con predominio de investigaciones desarrolladas en Europa, Asia y América del Norte. El análisis permitió identificar patrones tecnológicos, niveles de aplicación, beneficios operativos y limitaciones estructurales asociadas a la digitalización de los sistemas urbanos de agua.

A. Distribución y orientación de las soluciones tecnológicas

El análisis evidenció una concentración de soluciones tecnológicas en distribución y monitoreo del agua potable. La Figura 1 muestra que las tecnologías asociadas al control de redes representaron el 43% de los estudios analizados, principalmente mediante sensores inteligentes, sistemas IoT y plataformas de monitoreo orientadas a detección de fugas y optimización del consumo. Este predominio refleja una tendencia global hacia la modernización de infraestructuras urbanas y la reducción de pérdidas hídricas [2].

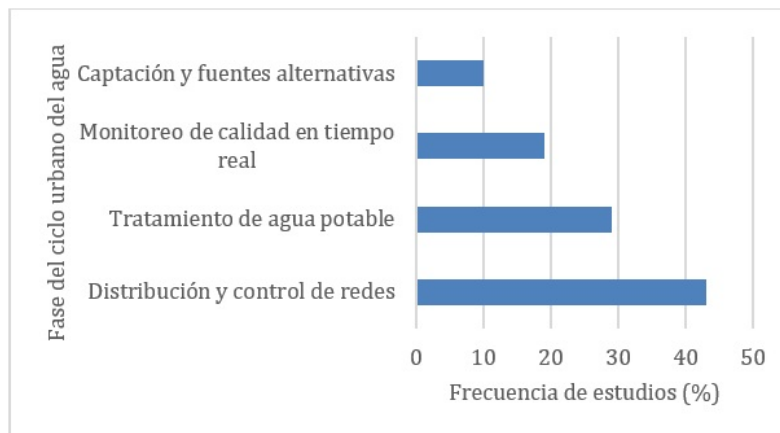


Fig. 1. Distribución de tecnologías según fase del ciclo urbano del agua ($n = 21$).

El 29% de los estudios se enfocó en tratamiento de agua potable mediante automatización, inteligencia artificial y control avanzado de procesos para mejorar eficiencia operativa y energética. En contraste, las tecnologías asociadas a captación y fuentes alternativas representaron solo el 10% de las investigaciones, evidenciando menor desarrollo en resiliencia hídrica y diversificación del abastecimiento. Asimismo, la revisión identificó una creciente integración entre monitoreo en tiempo real y análisis predictivo, consolidando los *smart water systems* como una tendencia central en la gestión hídrica urbana [2], [3].

B. Clasificación funcional y desempeño de las tecnologías identificadas

El análisis comparativo permitió clasificar las tecnologías identificadas en seis categorías funcionales, según su propósito operativo dentro del ciclo urbano del agua potable. La Tabla 1 sintetiza las principales características, beneficios y limitaciones reportadas por los estudios revisados.

Tabla 1. Clasificación comparativa de las tecnologías identificadas en el ciclo urbano del agua potable.

Categoría tecnológica	Aplicación principal	Beneficios reportados	Limitaciones identificadas
Sensores inteligentes e IoT [2], [3].	Monitoreo y detección de fugas	Reducción de pérdidas y control en tiempo real	Dependencia de infraestructura digital
Inteligencia artificial y análisis predictivo [5].	Predicción y optimización operativa	Gestión predictiva y automatización	Requiere grandes volúmenes de datos
Plataformas SCADA y monitoreo digital [1], [2].	Supervisión de redes y plantas	Centralización y control operativo	Alto costo de implementación
Automatización de procesos de tratamiento [4].	Control de potabilización	Estabilidad operativa y eficiencia energética	Mantenimiento especializado
Sistemas de monitoreo continuo [1], [3].	Control de calidad del agua	Respuesta rápida ante contaminación	Interoperabilidad limitada
Desalinización y reutilización potable [4].	Fuentes alternativas de abastecimiento	Diversificación hídrica	Elevado consumo energético

Las tecnologías basadas en sensores inteligentes e IoT mostraron los beneficios más consistentes en reducción de pérdidas hídricas, monitoreo continuo y optimización de redes urbanas [3]. Asimismo, la inteligencia artificial evidenció avances hacia modelos de gestión predictiva capaces de optimizar distribución y fortalecer la respuesta ante eventos críticos [5]. Sin embargo, estas soluciones dependen de altos niveles de digitalización e interoperabilidad, lo que limita su implementación en ciudades con infraestructura tecnológica insuficiente. Por otro lado, las tecnologías de captación y reutilización presentan potencial estratégico frente al estrés hídrico, aunque continúan condicionadas por elevados costos energéticos y desafíos regulatorios [4].

C. Impacto tecnológico en eficiencia operativa y calidad del agua

El análisis de los estudios revisados evidenció beneficios recurrentes asociados a la implementación de tecnologías digitales en sistemas urbanos de agua potable. La Figura 2 muestra que el 70% de las investigaciones reportó mejoras en monitoreo en tiempo real y capacidad de respuesta operativa, mientras que el 60% identificó avances en eficiencia de redes y optimización energética. Asimismo, el uso de sensores inteligentes e inteligencia artificial favoreció modelos predictivos de gestión sanitaria y detección temprana de riesgos de contaminación [6]. No obstante, persisten limitaciones relacionadas con brechas tecnológicas, interoperabilidad e insuficiente infraestructura digital, especialmente en ciudades de países en desarrollo [3].

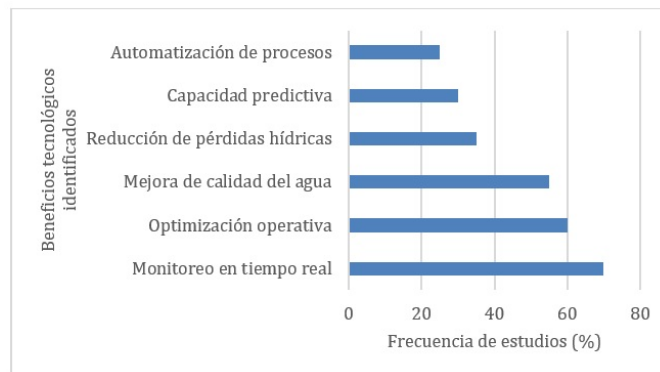


Fig. 2. Principales beneficios tecnológicos reportados en la literatura revisada.

La Figura 3 presenta un mapa de calor tecnológico elaborado a partir del análisis temático de los estudios revisados, permitiendo visualizar la intensidad de aplicación de distintas tecnologías en las principales fases del ciclo urbano del agua potable. Para la construcción de la matriz se empleó una escala ordinal de tres niveles: 1 = baja presencia tecnológica, 2 = presencia moderada y 3 = alta presencia tecnológica. Esta representación facilita identificar patrones de concentración tecnológica y diferencias funcionales entre las soluciones analizadas.

Los resultados evidencian una alta intensidad de aplicación de sensores inteligentes, Internet de las Cosas (IoT) y plataformas SCADA en las etapas de distribución y monitoreo del agua, mientras que la inteligencia artificial presenta mayor integración en procesos de monitoreo predictivo y tratamiento automatizado. En contraste, las tecnologías relacionadas con desalinización y reutilización potable muestran una presencia más limitada y focalizada principalmente en captación y diversificación de fuentes hídricas. Este comportamiento confirma un desarrollo tecnológico desigual dentro del ciclo urbano del agua, con mayor énfasis en eficiencia operativa y control de redes que en estrategias de resiliencia hídrica y sostenibilidad de largo plazo.

Tecnología	Distribución	Tratamiento	Monitoreo	Captación
IoT y sensores	3	1	3	1
Inteligencia artificial	2	3	3	1
SCADA	3	2	2	1
Automatización	2	3	1	1
Desalinización	1	1	1	3
Reutilización potable	1	2	1	3

Fig. 3. Mapa de calor de intensidad tecnológica según fase del ciclo urbano del agua potable.

D. Tendencias emergentes y desafíos futuros

El análisis temático permitió identificar una consolidación progresiva de los *smart water systems*, integrando sensores, análisis de datos, inteligencia artificial y plataformas centralizadas para optimizar la distribución, monitoreo y tratamiento del agua potable en tiempo real [2], [5]. Estas tecnologías fortalecen la eficiencia operativa y la resiliencia frente a escenarios de estrés hídrico y cambio climático; sin embargo, su efectividad depende también de capacidades institucionales, marcos regulatorios y planificación urbana sostenible [6]. Desde una perspectiva crítica, la revisión evidenció un desarrollo tecnológico desigual dentro del ciclo urbano del agua, con predominio de investigaciones en monitoreo y distribución, y menor atención a captación, reutilización y diversificación de fuentes hídricas.

CONCLUSIONES

La revisión sistemática evidenció que las soluciones tecnológicas aplicadas al abastecimiento de agua potable en ciudades metropolitanas se concentran principalmente en distribución, monitoreo y control inteligente de redes, destacando el uso de sensores, Internet de las Cosas (IoT) e inteligencia artificial como herramientas clave para optimizar la gestión hídrica urbana. Los estudios analizados reportaron mejoras en eficiencia operativa, reducción de pérdidas y capacidad de monitoreo en tiempo real.

Asimismo, se identificó un desarrollo desigual de la innovación tecnológica dentro del ciclo urbano del agua, con menor presencia de investigaciones orientadas a captación, reutilización y diversificación de fuentes hídricas. Finalmente, la evidencia revisada demuestra que la sostenibilidad de estas soluciones depende no solo de su desempeño técnico, sino también de capacidades institucionales, infraestructura digital y marcos regulatorios adecuados para su implementación en contextos urbanos complejos.

REFERENCIAS

- [1] Z. A. Al-Qaisi, R. A. Ogla, and Z. H. Ali, "Smart water systems: The role of technology and engineering in optimizing urban water resources," *Journal of Integrated Smart Water Management*, vol. 10, no. 2, pp. 45–62, 2024, doi: 10.52783/jisem.v10i21s.3445.
- [2] D. Quintana, L. C. Felix-Herran, J. C. Tudón-Martínez, and J. d. J. Lozoya-Santos, "On smart water system developments: A systematic review," *Water*, vol. 17, no. 17, p. 2571, 2025, doi: 10.3390/w17172571.
- [3] P. O. Obunga, S. S. Rwanga, M. O. Dinka, and B. O. Otieno, "Review of the emerging technologies in the water sector with a focus on the deployment of Internet of Things solutions," *npj Clean Water*, vol. 8, p. 53, 2025, doi: 10.1038/s41545-025-00487-x.
- [4] J. A. Silva, "Water supply and wastewater treatment and reuse in future cities: A systematic literature review," *Water*, vol. 15, no. 17, p. 3064, 2023, doi: 10.3390/w15173064.
- [5] D. De León-Pérez, R. Acosta-Vega, S. Salazar-Galán, J. A. Aranda, and F. Francés-García, "Toward systematic literature reviews in hydrological sciences," *Water*, vol. 16, no. 3, p. 436, 2024, doi: 10.3390/w16030436.
- [6] Y. Zhang, S. Wang, and X. Li, "Artificial intelligence for urban water management: A state-of-the-art review," *Water Resources Management*, vol. 38, pp. 3113–3134, 2024, doi: 10.1007/s11269-024-03823-x.