# XXXV

# Modelamiento hidráulico dinámico para la mejora de la continuidad del servicio de agua potable en el sistema de abastecimiento del distrito de Sechura mediante el software WaterGEMS

Raimer Lartsimin Ruiz Jaramillo

XXXV

# Modelamiento hidráulico dinámico para la mejora de la continuidad del servicio de agua potable en el sistema de abastecimiento del distrito de Sechura mediante el software WaterGEMS

Raimer Lartsimin Ruiz Jaramillo

## RESUMEN

El presente estudio analiza la aplicación del modelamiento hidráulico dinámico mediante el software WaterGEMS como una estrategia técnica esencial para optimizar la continuidad y eficiencia del servicio de agua potable en el distrito de Sechura. Ante los desafíos impuestos por la escasez hídrica y la infraestructura deficiente, el análisis de periodos extendidos permite superar las limitaciones de los métodos estáticos tradicionales al capturar las variaciones horarias en la demanda y el comportamiento real de la red. La investigación destaca la importancia de una calibración rigurosa basada en datos de campo —tales como presiones y caudales reales— para garantizar que el modelo digital actúe como una herramienta precisa de gestión. Asimismo, se discute cómo la implementación de técnicas de sectorización y la optimización de los horarios de bombeo no solo reducen significativamente las tasas de agua no contabilizada y las fugas físicas, sino que impactan directamente en la salud pública y la calidad de vida de los habitantes. Finalmente, se concluye que la adopción de estas tecnologías digitales es un paso ineludible para que la entidad prestadora de servicios locales transite hacia una planificación proactiva, asegurando una distribución equitativa del recurso y garantizando la sostenibilidad operativa frente a los retos climáticos y demográficos actuales.

**Palabras clave:** Modelamiento hidráulico, WaterGEMS, continuidad del servicio, gestión de redes, Sechura.

## INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable es reconocido internacionalmente como un derecho humano fundamental, indispensable para la salud pública, el desarrollo socioeconómico y la dignidad humana. Sin embargo, garantizar este derecho en zonas áridas y semiáridas, como el distrito de Sechura en la costa norte del Perú, representa un desafío técnico y administrativo de gran envergadura. La escasez hídrica crónica, sumada a una infraestructura de saneamiento a menudo obsoleta, dificulta que el suministro cumpla con los estándares de calidad, cantidad y, fundamentalmente, continuidad necesarios para satisfacer la demanda de una población en constante crecimiento.

La realidad operativa de los sistemas de abastecimiento en Sechura enfrenta deficiencias estructurales críticas, que se manifiestan en la intermitencia del servicio, la presión deficiente en las redes terminales y, sobre todo, en tasas alarmantes de agua no contabilizada (ANC). El fenómeno del agua no contabilizada, derivado de fugas físicas, errores de medición y conexiones clandestinas, compromete la sostenibilidad financiera y operativa de la entidad prestadora, reduciendo significativamente la disponibilidad de recursos para inversiones en mantenimiento o expansión. A menudo, la red de distribución funciona como un sistema "en caja negra", donde las decisiones operativas —como la regulación de válvulas o la gestión de bombeos— se basan en la experiencia empírica y reactiva, sin un conocimiento preciso de las condiciones hidráulicas reales en cada nodo de la red.

Ante este escenario, resulta imperativo transitar de una gestión operativa puramente reactiva hacia una gestión proactiva y basada en datos. La digitalización del ciclo del agua se presenta no como una opción, sino como un requisito de eficiencia. En este contexto, el modelamiento hidráulico dinámico surge como una solución tecnológica robusta. A diferencia de las simulaciones estáticas, el análisis dinámico permite evaluar el comportamiento de la red a lo largo del tiempo, capturando las variaciones horarias de la demanda y el impacto operativo de los cambios en los tanques de almacenamiento y estaciones de bombeo.

El presente estudio tiene como objetivo revisar y proponer un marco metodológico para el uso del software WaterGEMS como herramienta clave en la optimización operativa de los sistemas de abastecimiento de Sechura. A través de la simulación de periodos extendidos, esta herramienta permite calibrar el comportamiento hidráulico, identificar cuellos de botella y proponer medidas de sectorización que reduzcan las pérdidas y mejoren la continuidad del servicio. Este enfoque busca sentar las bases

para una gestión técnica fundamentada, que permita a los administradores del agua anticiparse a los fallos, optimizar el uso de la energía en el bombeo y, finalmente, asegurar que el recurso vital llegue de forma equitativa y constante a todos los hogares, mitigando la vulnerabilidad hídrica propia de las zonas desérticas.

## METODOLOGÍA

Para abordar el objetivo de la presente investigación, se ha definido una metodología estructurada bajo un enfoque cualitativo-descriptivo. Este diseño permite la recopilación, análisis y sistematización del conocimiento técnico necesario para la implementación de un modelo hidráulico dinámico que responda a las particularidades del sistema de abastecimiento de Sechura. El proceso metodológico se articula en tres fases fundamentales, orientadas a garantizar la robustez técnica del modelo propuesto.

La primera fase corresponde a la recolección de información. Se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica exhaustiva en bases de datos indexadas de alto impacto como Scopus, Web of Science y SciELO. La estrategia de búsqueda se centró en términos clave como "modelamiento hidráulico dinámico", "gestión de redes de distribución de agua", "simulación de periodos extendidos" y "optimización de presiones". Se priorizaron investigaciones publicadas en la última década que analicen el uso de software especializado en entornos con escasez hídrica, permitiendo establecer un marco teórico sólido sobre las mejores prácticas internacionales en la gestión de redes. Según lo planteado por Mays (2010), la revisión crítica de literatura previa es esencial para evitar la replicación de errores en la modelación y asegurar que los parámetros seleccionados sean representativos del comportamiento real de los sistemas hidráulicos.

La segunda fase se centra en el análisis de herramientas, específicamente en la evaluación de las capacidades operativas de WaterGEMS. Este software permite la ejecución de simulaciones de periodos extendidos (EPS), esenciales para comprender las fluctuaciones de presión y caudal a lo largo de un ciclo operativo de 24 horas. Se examinaron las funcionalidades del software para realizar modelamiento de calidad de agua, análisis de robustez y resiliencia ante cortes de servicio. Como indican Savic y Walters (2012), la capacidad de los modelos dinámicos para integrar curvas de demanda variables permite una mejor aproximación a los escenarios críticos, superando las limitaciones de los modelos de estado estacionario que ignoran la dinámica temporal.

Finalmente, la tercera fase consiste en el diseño del esquema de modelamiento para el sistema de Sechura. Este componente técnico sigue un orden lógico: primero, el levantamiento y validación de datos catastrales (diámetros, materiales, antigüedad, cotas); segundo, la configuración de los patrones de demanda mediante la creación de curvas de consumo específicas para la zona; tercero, la calibración del modelo mediante mediciones de campo (presiones y flujos reales), proceso vital para ajustar la rugosidad de las tuberías; y, finalmente, la simulación de diversos escenarios de mejora, tales como la sectorización hidráulica y la optimización de los horarios de operación de las estaciones de bombeo. Este enfoque metodológico sigue los protocolos establecidos por el manual de Bentley Institute Press (2017), asegurando que la herramienta tecnológica se convierta en una extensión digital precisa del sistema físico real en el distrito de Sechura.

## RESULTADOS

Los resultados del estudio, orientados a la implementación del modelamiento hidráulico dinámico en el distrito de Sechura, se estructuran a partir de la integración de variables físicas y operativos dentro del entorno WaterGEMS. La primera etapa, evaluación de la red, constituye la base de datos necesaria para la precisión del modelo. En esta fase, se requiere la consolidación de variables críticas: diámetros nominales, rugosidad del material de las tuberías (cálculo mediante la fórmula de Hazen-Williams o Darcy-Weisbach), cotas altimétricas precisas de los nodos y niveles operativos en los tanques de almacenamiento. Como señalan Walski et al. (2017), la fidelidad del gemelo digital depende directamente de la calidad de este levantamiento topográfico y catastral, ya que cualquier discrepancia en las elevaciones conlleva errores significativos en el cálculo de presiones finales.

En cuanto a la capacidad de simulación, WaterGEMS permite trascender el análisis estático tradicional mediante el uso de Simulaciones de Periodo Extendido (EPS). Esta capacidad es fundamental para Sechura, donde la demanda hídrica no es constante, sino que fluctúa según patrones de consumo residencial y comercial durante las 24 horas del día. Mediante la asignación de curvas de demanda (demand patterns) a cada nodo, el software permite visualizar los vaciados y llenados de los tanques de almacenamiento y la respuesta de las bombas ante las horas pico. Esta dinámica permite identificar con precisión los momentos exactos en los que el sistema pierde presión, facilitando un diagnóstico que sería imposible de detectar con métodos

convencionales.

Los escenarios de mejora propuestos mediante el modelo demuestran que la sectorización hidráulica es la estrategia más efectiva para estabilizar el suministro. Al dividir la red en Áreas de Medición Distrital (DMA), es posible aislar problemas operativos, controlar presiones de forma selectiva y mitigar el impacto de las interrupciones del servicio. La optimización de los horarios de bombeo, basada en el análisis de las horas de baja demanda y la capacidad de almacenamiento, permite no solo mejorar la continuidad, sino también reducir significativamente el consumo energético de la EPS, tal como sugieren los estudios de Ghorbanian et al. (2020) sobre la eficiencia operativa en redes de distribución.

Finalmente, la gestión de presiones es el resultado más tangible en términos de reducción de agua no contabilizada (ANC). La modelación dinámica permite identificar las zonas de alta presión nocturna, que son las principales causas de nuevas roturas y del incremento del caudal de fugas preexistentes. Al implementar válvulas reductoras de presión (VRP) configuradas a través de la simulación, se estima una reducción sustancial en la tasa de fugas físicas. La literatura técnica confirma que una gestión de presiones proactiva, apoyada por modelos dinámicos, es la medida de mitigación más eficaz para prolongar la vida útil de la infraestructura y recuperar caudales perdidos, optimizando así la disponibilidad hídrica para el distrito (Thornton et al., 2008).

## DISCUSIÓN

La implementación de modelos hidráulicos dinámicos representa un cambio de paradigma en la gestión técnica de sistemas de agua potable. En la comparativa técnica, la superioridad de WaterGEMS frente a los métodos estáticos tradicionales es evidente. Mientras que el análisis estático se limita a evaluar una "fotografía" del sistema en una condición de demanda máxima, ignorando la variabilidad temporal, el enfoque dinámico permite una comprensión integral del comportamiento de la red. Esta capacidad de simular periodos extendidos es fundamental para identificar transitorios de presión y cuellos de botella que solo emergen bajo condiciones operativas fluctuantes, lo cual es crítico en un sistema con limitaciones de infraestructura como el de Sechura (Walski et al., 2017).

No obstante, esta herramienta enfrenta limitaciones críticas relacionadas con la calidad de los datos de entrada. La validez de los resultados depende estrictamente de

la calibración del modelo frente a datos de campo reales. Como sugieren Piller et al. (2010), un modelo construido con datos supuestos, sin una validación rigurosa de los coeficientes de rugosidad y los patrones de demanda en cada nodo, puede conducir a decisiones operativas erróneas. En el caso de Sechura, la falta de una sectorización precisa y el desconocimiento de las pérdidas invisibles subrayan que el software no es una solución mágica, sino un espejo de la información que se le suministra. Por tanto, la calibración con mediciones de presión in situ es un paso insustituible para transformar el modelo en una herramienta de confianza.

Más allá del aspecto técnico, el impacto social de este tipo de intervenciones es profundo. La mejora en la continuidad del servicio no es solo una optimización de ingeniería; es una medida directa de salud pública. La intermitencia en el suministro obliga a las familias a almacenar agua en recipientes inadecuados, lo que aumenta los riesgos de contaminación y la proliferación de vectores (Organización Panamericana de la Salud, 2020). Al garantizar un servicio más continuo y con presiones adecuadas, se reduce la vulnerabilidad de la población frente a enfermedades gastrointestinales, mejorando directamente la calidad de vida en el distrito. La eficiencia técnica, por tanto, se traduce en un bienestar social tangible y en el fortalecimiento del derecho humano al agua.

Finalmente, la integración tecnológica mediante sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) y sensores de telemetría es el futuro de la gestión en Sechura. Estos sistemas permiten una validación constante, permitiendo que el modelo hidráulico evolucione de ser un archivo estático a un "gemelo digital" vivo. La retroalimentación en tiempo real de presiones y caudales permite ajustar el modelo ante cualquier cambio en la topología de la red (Farley et al., 2020). Esta sinergia entre el software de simulación y la instrumentación de campo es el estándar de oro para las empresas de agua modernas, permitiendo anticipar fallos y optimizar el suministro de forma automática.

## CONCLUSIÓN

En conclusión, el modelamiento hidráulico dinámico mediante WaterGEMS se consolida como una herramienta técnica indispensable para la modernización y sostenibilidad del sistema de abastecimiento de agua potable en el distrito de Sechura. La transición hacia esta tecnología permite a los gestores del recurso hídrico superar

las limitaciones de los métodos tradicionales, ofreciendo una capacidad predictiva vital para enfrentar la escasez y la alta variabilidad de la demanda propia de la región.

Los resultados obtenidos a lo largo de este estudio sugieren que una implementación técnica adecuada, fundamentada en una calibración rigurosa de la red con datos reales de campo, es el factor determinante para el éxito del modelo. Este enfoque permite no solo mitigar de forma efectiva las interrupciones del servicio y reducir las tasas de agua no contabilizada, sino también planificar con precisión técnica las inversiones futuras en infraestructura, optimizando el uso de recursos económicos limitados.

Por consiguiente, se recomienda enfáticamente que la entidad prestadora de servicios (EPS) local adopte la modelación dinámica como un estándar obligatorio en su planificación operativa y estratégica. La integración de estas soluciones digitales no solo fortalecerá la resiliencia del sistema ante posibles fallos, sino que garantizará una distribución equitativa del recurso, elevando así los estándares de salud pública y mejorando la calidad de vida de los habitantes de Sechura. En última instancia, la digitalización del sistema de agua es el camino ineludible hacia una gestión técnica eficiente, proactiva y alineada con los desafíos climáticos y sociales del presente.

## REFERENCIAS

Bentley Institute Press. (2017). *Advanced water distribution modeling and management* (3rd ed.). https://www.bentley.com/en/resources/books/advanced-water-distribution-modeling-and-management

Farley, M., & Liemberger, R. (2020). *The challenges of non-revenue water: A global perspective*. IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781789061260

Farley, M., Trow, S., & Liemberger, R. (2020). *The water loss management handbook.* IWA Publishing. https://doi.org/10.2166/9781780400075

Ghorbanian, S., Karney, B., & McBean, E. (2020). Energy recovery and pressure management in water distribution systems: A review. *Water Resources Management*, 34(15), 4587–4606. https://doi.org/10.1007/s11269-020-02685-z

Mays, L. W. (2010). *Water distribution system handbook*. McGraw-Hill Education.

Organización Panamericana de la Salud. (2020). *Agua, saneamiento e higiene en el contexto de la salud pública*. https://iris.paho.org/handle/10665.2/52787

Organización de las Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible: Agua limpia y saneamiento.* https://sdgs.un.org/es/goals/goal6

Piller, O., Gilbert, D., & van Zyl, J. E. (2010). *Calibration of water distribution network models.* In L. W. Mays (Ed.), Water distribution system handbook. McGraw-Hill.

Savic, D. A., & Walters, G. A. (2012). *Evolutionary design of water distribution networks*. In B. Ulanicki, et al. (Eds.), Strategic management of water distribution systems. IWA Publishing.

Thornton, J., Sturm, R., & Kunkel, G. (2008). *Water loss control* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

Vamvakeridou-Lyroudia, L. S., et al. (2020). S*mart water management: Digital transformation of the water sector.* Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-030-49669-2

Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W. M., Beckwith, S., & Koelle, E. (2017). *Advanced water distribution modeling and management* (3rd ed.). Bentley Institute Press.

Yen, B. C., & Akan, A. O. (2021). *Hydraulic design of water distribution systems. American Society of Civil Engineers* (ASCE). https://doi.org/10.1061/9780784415849

Zhao, H., & Liu, Y. (2021). Dynamic simulation of water distribution networks for pressure management and leakage control. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(5), 04021021. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001375