



MODELACIÓN HIDRÁULICA AVANZADA APLICADA A LA RED MATRIZ DE BOGOTÁ, COLOMBIA

Laura Enríquez¹, Andrés Ariza², Orazio Giustolisi³

^{1,2,3}Departamento de Ingeniería Civil, Ambiental, del Territorio, Construcción y Química,
Politecnico de Bari, Via Edoardo Orabona, 4, Bari, Italia

³orazio.giustolisi@poliba.it

RESUMEN

La red matriz de Bogotá es un sistema de alta complejidad que suministra agua a cerca de nueve millones de habitantes. Lo anterior dificulta el desarrollo de un modelo hidráulico adecuado, lo cual causa un alto nivel de incertidumbre en la operación y control de la red. Por lo tanto, este trabajo demuestra la aplicación de un método de análisis hidráulico avanzado, con cálculo de la demanda en función de la presión, modelación de fugas para cada tubería, análisis topológico y un esquema innovador de alimentación de tanques desde arriba para una representación más realista de la red. De igual forma, se demuestra la integración del gemelo digital de la red dentro de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el análisis hidráulico mediante Servicios Digitales del Agua (denominados *Digital Water Services – DWSs* en inglés). Así, este trabajo evidencia las ventajas de la implementación de herramientas de análisis hidráulico avanzado junto con SIG como un sistema de apoyo a la decisión de alta confiabilidad.

Palabras clave

Análisis Hidráulico Avanzado, Red de Distribución de Agua, Gemelo Digital

1. INTRODUCCIÓN

La exactitud en la modelación del comportamiento hidráulico de las Redes de Distribución de Agua Potable (RDAPs) es uno de los objetivos principales de las empresas operadoras de dichos sistemas. El análisis hidráulico en función de la demanda [1] es el método más usado, pero resulta inexacto ante condiciones de déficit de presión o fugas [2]. Por este motivo, se ha propuesto el análisis hidráulico en función de la presión, en el cual las demandas se determinan a partir de la presión de cada nodo [3]. Lo anterior permite incluir las demandas asociadas al consumo humano y las fugas de fondo [4]. Adicionalmente, los métodos de modelación hidráulica tradicionales asumen que los tanques se alimentan con una tubería sumergida (i.e. desde abajo), pero en la realidad la mayoría de los tanques de RDAPs funcionan con una descarga libre, es decir, se alimentan desde arriba.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Igualmente, la representación física de los componentes de las RDAPs resulta fundamental para lograr una gestión adecuada de estos sistemas. La solución a esta necesidad se ha alcanzado a través de gemelos digitales (*Digital Twins* en inglés), que incluyen las tuberías, las fuentes, las demandas de los consumidores, los dispositivos y el estado hidráulico de cada elemento dentro de Sistemas de Información Geográfica (SIG).

De este modo, este trabajo tiene como objetivo demostrar que la aplicación de un método de análisis hidráulico avanzado en la red matriz de Bogotá, Colombia, produce resultados consistentes con el comportamiento hidráulico real del sistema. En este sentido, fue implementado un análisis de dominio topológico, un análisis hidráulico en función de la presión con modelación de fugas de fondo distribuidas para cada tubería y un esquema innovador de alimentación de tanques desde arriba para garantizar la exactitud del modelo. Adicionalmente, este trabajo muestra la integración entre el gemelo digital de la red y el análisis hidráulico avanzado en SIG a través de la aplicación de Servicios Digitales del Agua (denominados *Digital Water Services* – DWSs en inglés) [5].

2. METODOLOGÍA

2.1 CASO DE ESTUDIO

La red matriz de Bogotá, Colombia, es un sistema con alrededor de 656 km de tuberías que proporciona agua a cerca de nueve millones de habitantes. El suministro de la red está conformado principalmente por tres Plantas de Tratamiento de Agua Potable (PTAP): Wiesner, Tibitoc y El Dorado. El modelo hidráulico de la red fue proporcionado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB), a partir del cual la herramienta de análisis hidráulico avanzado WNetXL generó un modelo simplificado removiendo los nodos sin una demanda asociada. El modelo simplificado consta de 2296 tuberías, 2102 nodos, 66 tanques, 30 estaciones de bombeo con 73 bombas y 58 válvulas, de las cuales 41 válvulas corresponden a válvulas de control de flujo, 15 son válvulas reductoras de presión y 2 son válvulas reguladoras por estrangulación. La demanda promedio del escenario analizado corresponde a 15.46 m³/s.

2.2 MODELACIÓN HIDRÁULICA AVANZADA

La modelación y análisis hidráulico de la red matriz de Bogotá se realizó con la plataforma WNetXL, la cual incorpora elementos innovadores que generan resultados más realistas y consistentes con el comportamiento real de las RDAPs en comparación con métodos tradicionales de modelación. Se implementó el análisis hidráulico en función de la presión (*pressure-driven analysis*) debido a que describe el funcionamiento de RDAPs en distintas condiciones de operación, particularmente cuando existe déficit de presión, con un alto grado de exactitud [3]. Lo anterior permite evaluar el volumen real de agua proporcionado a cada consumidor y las pérdidas volumétricas de agua en cada tubería.

Las pérdidas volumétricas de agua, también denominadas fugas de fondo, se modelaron como flujos de salida distribuidos uniformemente para cada tubería, de acuerdo con la formulación de Germanopoulos [6]. La Ecuación 1 muestra que en la tubería k el caudal de fuga d_k es función de los parámetros del modelo β_k y α_k , la longitud de la tubería L_k y la presión promedio a lo largo de la tubería P_k .

$$d_k = \beta_k L_k P_k^{\alpha_k} \quad (1)$$

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Por otro lado, en el método implementado las ecuaciones de balance de masa de los tanques se acoplan con las ecuaciones hidráulicas del modelo, es decir, el nivel de los tanques se incluye como una variable independiente [7]. Lo anterior genera resultados más estables y realistas del proceso de llenado y vaciado de los tanques en comparación con la formulación tradicional.

Adicionalmente, para este caso de estudio en específico y para la red correspondiente al Altiplano de Asiago ubicada en Véneto, Italia, se desarrolló una estrategia innovadora que permite la alimentación de los tanques desde arriba. Lo anterior garantiza la consistencia entre la representación del modelo y la configuración real de los tanques.

El modelo incluye controles de llenado de los tanques de acuerdo con tres criterios: on/off, proporcional o raíz cuadrada. El control on/off cierra la tubería de ingreso a los tanques justo en el momento en el que se alcanza el nivel máximo. El control proporcional simula el comportamiento de un flotador, que disminuye el caudal de entrada a medida que el nivel aumenta. El control con raíz cuadrada tiene un comportamiento similar, pero su curva es más suavizada. La Figura 1 ilustra los tipos de control de llenado de los tanques y los compara con la alimentación desde abajo. De este modo, no es necesario definir reglas empíricas que controlen la dinámica de llenado.

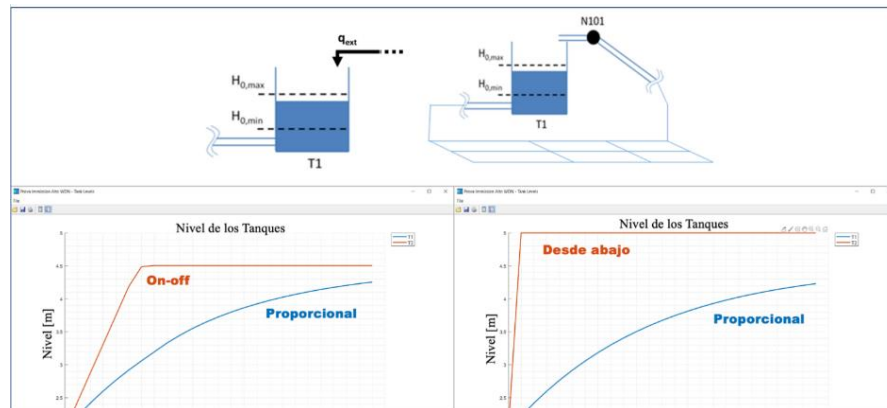


Figura 1. Comparación de los tipos de control de llenado de los tanques

2.3 GEMELO DIGITAL Y SERVICIOS DIGITALES DEL AGUA

La plataforma de análisis hidráulico es completamente interoperable con SIG. La herramienta permite generar el gemelo digital de la red, que corresponde a la representación digital del sistema en SIG, junto con la información geométrica e hidráulica asociada. En este sentido, la modelación hidráulica avanzada considera la ubicación georreferenciada de los consumidores, es decir, incluye su elevación real y el tipo de conexión a la red: directa con un único piso, directa con múltiples pisos o a través de un tanque de almacenamiento. La Figura 2 muestra el gemelo digital de la red matriz generado a partir de WDNNetXL.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

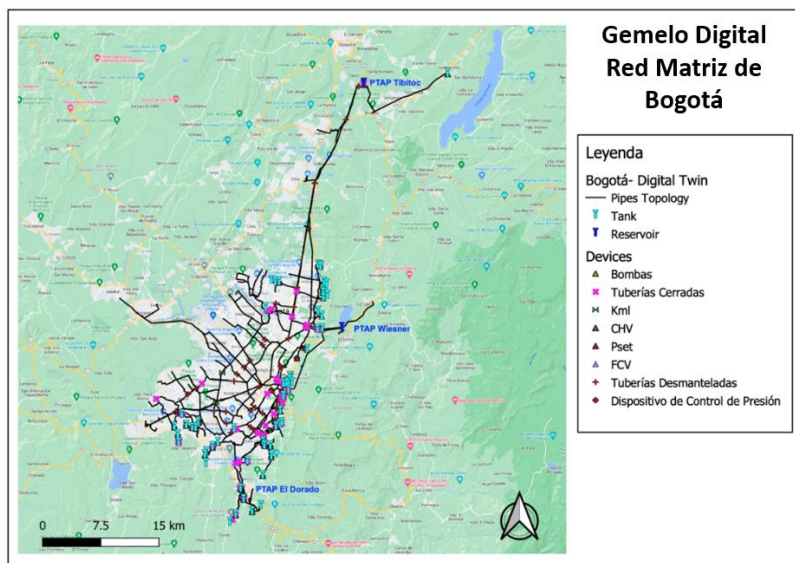


Figura 2. Gemelo Digital de la Red Matriz de Bogotá

El gemelo digital de la red en SIG se integra con el análisis hidráulico avanzado a través de Servicios Digitales del Agua, que se definen como aplicaciones de ingeniería, cuyo fin es apoyar la ejecución de tareas técnicas [5]. Este estudio aplica dos DWSs: análisis de dominio y análisis hidráulico, que se presentan en la sección 2.4 y en la sección 2.5, respectivamente.

2.4 ANÁLISIS DE DOMINIO TOPOLÓGICO

El análisis del dominio topológico de una RDAPs permite identificar los elementos que determinan el comportamiento hidráulico del sistema. Se consideran las propiedades específicas de los nodos, es decir, si corresponden a un tanque, un nodo con demanda o un nodo de conexión, y de las tuberías, cuyos atributos principales corresponden a longitud, diámetro y resistencia hidráulica [8]. Por lo tanto, el análisis de dominio topológico no requiere de la ejecución de un análisis hidráulico a priori.

La red matriz de Bogotá se evaluó con el indicador denominado *Tailored Edge Betweenness*, que mide la importancia de cada tubería de acuerdo con la centralidad de intermediación (*edge betweenness*). Este indicador ha sido derivado de la Teoría de Redes Complejas (CNT por sus siglas en inglés) y se ha adaptado a la descripción de RDAPs al conceptualizarlas como grafos [8]. El análisis de dominio topológico de la red se realizó por medio del *DWS DigitalWaterDomain_Analyzer*.

2.5 CONFIGURACIÓN DEL MODELO Y EJECUCIÓN DEL ANÁLISIS HIDRÁULICO

El modelo hidráulico de la red matriz de Bogotá fue proporcionado por la EAAB en EPANET 2.2. La información del modelo fue exportada a la plataforma WDNXL. La consistencia hidráulica de los datos topológicos, geométricos y de consumo de la red se evaluó con base en la información suministrada por la EAAB. En específico, se verificaron tres aspectos principales: a) la elevación de los embalses de las PTAP; b) las resistencias hidráulicas de las tuberías que conforman las rutas principales de alimentación de acuerdo con el análisis de dominio topológico; c) las características de los sistemas de bombeo.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

Las válvulas de control de flujo y las válvulas de cheque ubicadas inmediatamente aguas arriba de los tanques fueron eliminadas debido a que resultan redundantes teniendo en cuenta que el modelo incorpora controles de vaciado y llenado. Así, el modelo permite mayor flexibilidad ya que evita la definición del caudal máximo de las válvulas con base en criterios empíricos y se adapta a cualquier patrón de consumo.

El valor de β_k se estableció como 1×10^{-9} para todas las tuberías, y fue tomado de la literatura disponible teniendo en cuenta que los operadores de la red reportan pérdidas reales de baja magnitud. La alimentación de los tanques del modelo se configuró desde arriba, con excepción de cuatro tanques en los que se implementó la alimentación desde abajo teniendo en cuenta la información dada por la EAAB. El tipo de control escogido fue la raíz cuadrada ya que generaba menores errores de convergencia y se ajustaba a los niveles mínimos y máximos requeridos por la EAAB.

La simulación hidráulica de periodo extendido se ejecutó estableciendo una duración de 24 horas con un tamaño de paso (Δt) de 30 minutos y una presión de servicio de 5 metros. El análisis hidráulico avanzado se llevó a cabo con el DWS denominado *DigitalWater_Analyzer*.

3. RESULTADOS

La Figura 3 muestra los resultados del indicador Tailored Edge Betweenness para las tuberías con un valor mayor o igual a cinco, es decir, las tuberías principales del sistema. Se evidencia que las tuberías con mayor relevancia son aquellas que conectan los embalses con la red, particularmente las líneas provenientes de la PTAP Wiesner. Las rutas más relevantes se ubican en los cerros orientales hacia el suroccidente y noroccidente de la ciudad.

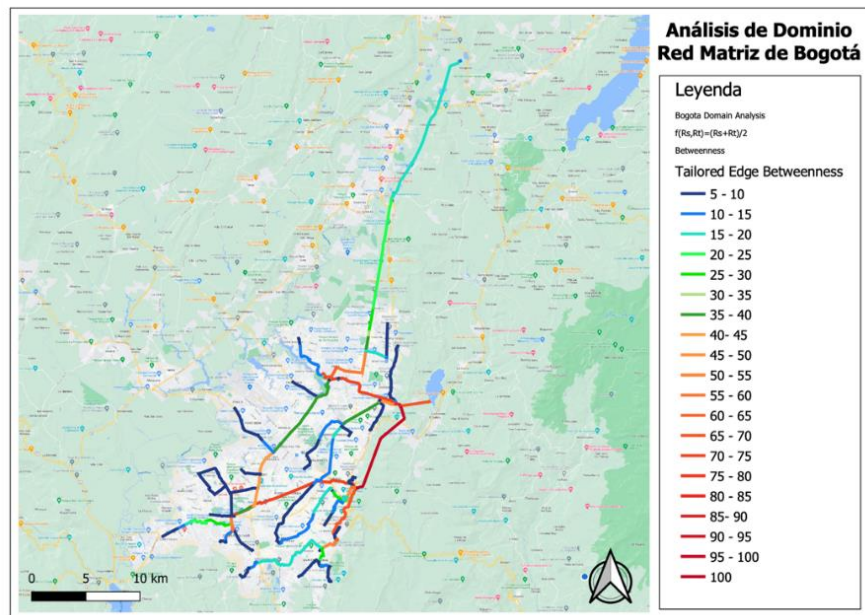


Figura 3. Resultados del análisis de dominio topológico en la red matriz de Bogotá

La Figura 4 muestra la presión promedio en los nodos de la red durante la simulación, donde se evidencian valores predominantemente inferiores a 100 m. De igual modo, la Figura 5 presenta el déficit porcentual de presión en los nodos, en la cual se confirma que el sistema permite suministrar la totalidad de la demanda a los consumidores ya que la presión es superior al límite de servicio.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

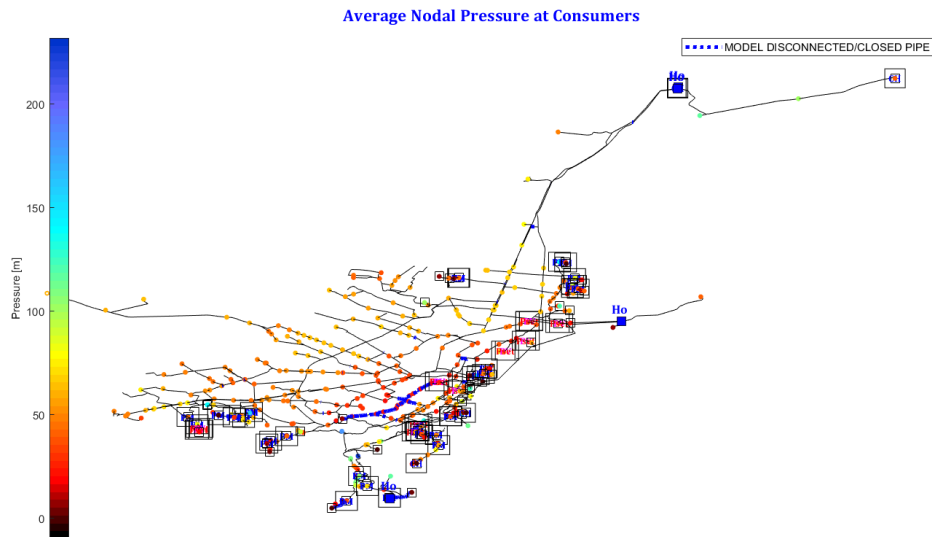


Figura 4. Representación de presión promedio en los nodos

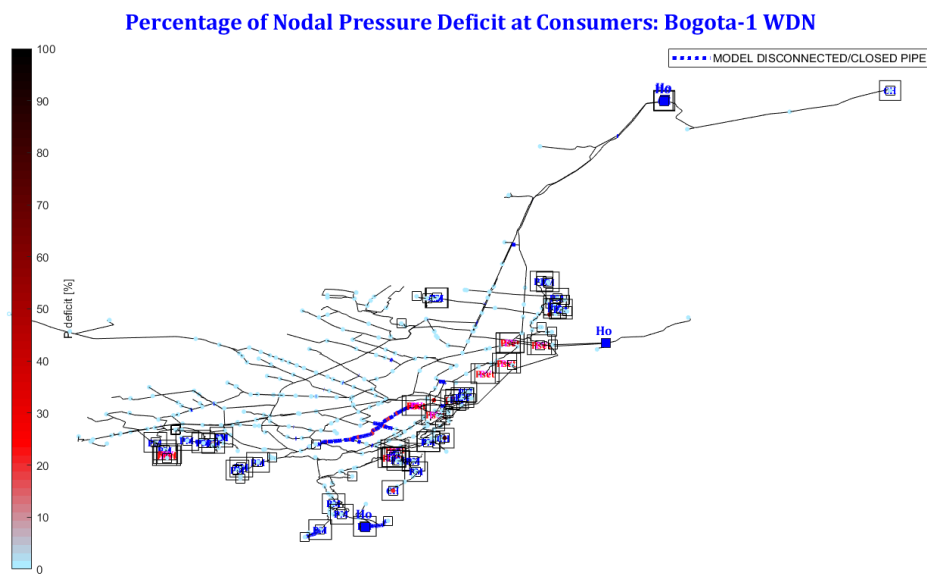


Figura 5. Representación del déficit porcentual de presión en los nodos

La Figura 6 resume la distribución de volúmenes de agua en el sistema, donde se destaca el volumen proporcionado a los consumidores en naranja, el volumen suministrado a los tanques mediante orificio libre en amarillo y el volumen asociado al rebose de los tanques en azul. El volumen de rebose es reducido en comparación el volumen total suministrado a los tanques y se debe principalmente a errores de convergencia. El volumen de agua proporcionado a los tanques sigue un patrón similar a la demanda y tiene un amplio margen de diferencia. Lo anterior sumado a las condiciones adecuadas de presión demuestra que los controles de volumen para el llenado de los tanques se adaptan de forma adecuada al patrón de demanda del modelo y evitan que los tanques queden completamente vacíos.

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

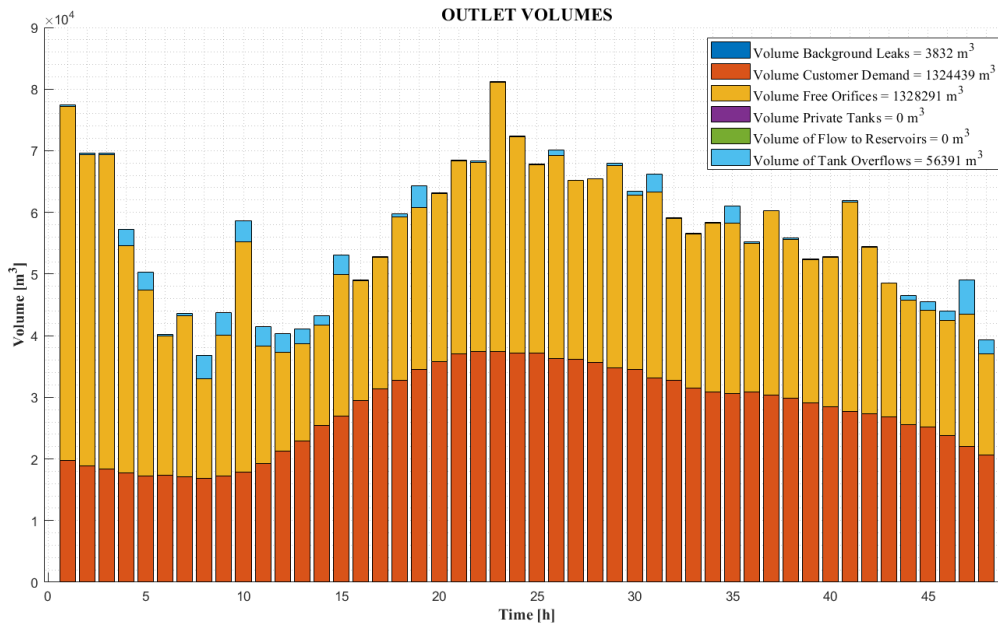


Figura 6. Gráfica de distribución de volúmenes de agua en el sistema

La Figura 7 presenta la distribución de las pérdidas volumétricas dentro de la red, donde se encuentran valores del indicador de pérdidas lineal [$m^3/día/km$] relativamente bajos con un promedio de $5.8 m^3/día/km$. Por otro lado, en las tuberías que funcionan con altas presiones se evidencian valores de hasta $20 m^3/día/km$. El conocimiento de la distribución de las fugas resulta fundamental para priorización de acciones de rehabilitación dentro del sistema.

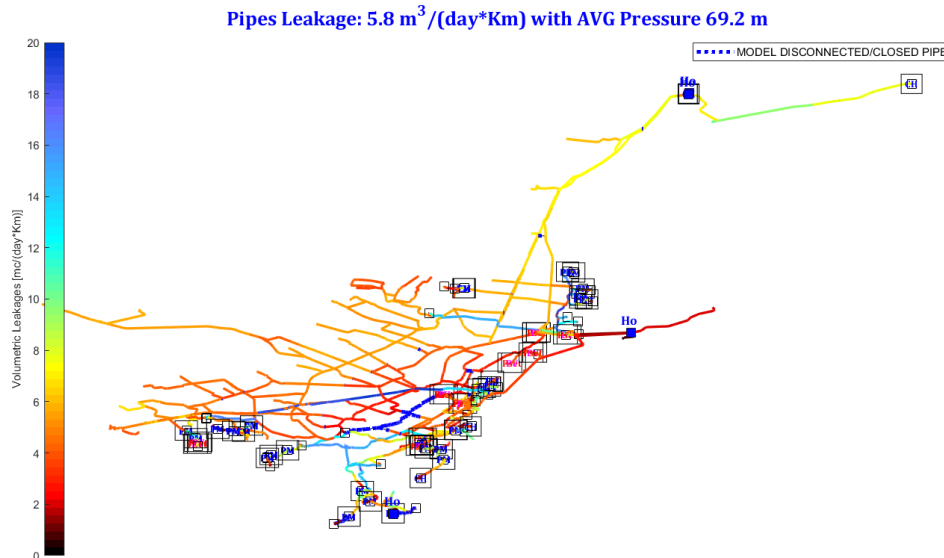


Figura 7. Representación de las pérdidas volumétricas de la red

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

4. CONCLUSIONES

Se presentó la aplicación de una estrategia de modelación hidráulica avanzada integrada con el gemelo digital del sistema usando SIG en la red matriz de Bogotá, Colombia. En este sentido, se demostró que la modelación de la demanda en función de la presión incluyendo fugas y la alimentación de los tanques desde arriba genera resultados hidráulicos que son consistentes con el comportamiento real del sistema. En específico, los controles de llenado de los tanques permiten determinar la configuración de caudal máximo que debería establecerse en las válvulas de alimentación y la modelación de las fugas permite evaluar el estado de la red con un alto nivel de confiabilidad. Adicionalmente, se mostró que los Servicios Digitales del Agua (*DWSs*) hacen posible la agregación de los datos de la red dentro de una única plataforma SIG y posibilitan la ejecución de análisis que contribuyen a la comprensión del funcionamiento del sistema, como el análisis de dominio. De este modo, el esquema implementado se convierte en un sistema de apoyo a la decisión a nivel operativo y táctico de alto interés para las empresas operadoras.

REFERENCIAS

- [1] E. Todini, y S. Pilati, “A gradient algorithm for the analysis of pipe networks”, *Computer Applications in Water Supply*, vol. 1, 1988, pp. 1-20.
- [2] Y. Setiadi, T.T. Tanyimboh, y A.B. Templeman, “Modeling errors, entropy and hydraulic reliability of water distribution systems”, *Advances in Engineering Software*, vol. 36, no. 11-12, 2005, pp. 780-788.
- [3] O. Giustolisi, D. Savic, y Z. Kapelan, “Pressure-Driven Demand and Leakage Simulation for Water Distribution Networks”, *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 134, no. 5, 2008. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9429\(2008\)134:5\(626\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9429(2008)134:5(626))
- [4] O. Giustolisi, y T.M. Walski, “Demand components in water distribution network analysis”, *J. Water Resour. Plan. Manage.*, vol. 138, no. 4, Julio 2012.
- [5] F.G. Ciliberti, L. Berardi, D.B. Laucelli, y O. Giustolisi, “Digital Water Services using Digital Twin paradigm”, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1136, no. 1, 2023.
- [6] G. Germanopoulos, “A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models”, *Civil Engineering Systems*, vol. 2, no. 3, 1985.
- [7] O. Giustolisi, L. Berardi, y D. Laucelli, “Generalizing WDN simulation models to variable tank levels”, *Journal of Hydroinformatics*, vol. 12, no. 3, 2012, pp. 562–573.
- [8] O. Giustolisi, L. Ridolfi, y A. Simone, “Tailoring Centrality Metrics for Water Distribution Networks”, *Water Resources Research*, vol. 55, no. 3, 2019.