



# APLICACIÓN DE SERVICIOS DIGITALES DEL AGUA EN SISTEMAS REALES

**Andrés Ariza<sup>1</sup>, Laura Enríquez<sup>2</sup>, Orazio Giustolisi<sup>3</sup>, Antonietta Simone<sup>4</sup>,  
Francesco G. Ciliberti<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Ambiental, del Territorio, Construcción y Química,  
Politecnico de Bari, Via Edoardo Orabona, 4, Bari, Italia

<sup>4,5</sup>Departamento de Ingeniería y Geología, Universidad “G. D’Annunzio” de Chieti  
Pescara, Viale Pindaro, 42, Pescara, Italia

<sup>3</sup>*orazio.giustolisi@poliba.it*

## RESUMEN

Actualmente, la transición digital busca mejorar la resolución de problemas en la industria mediante la combinación de modelos computacionales, tecnologías de la información y conectividad. Con base en esto, en el sector de la gestión de Redes de Distribución de Agua Potable (RDAPs) se contemplan innovaciones en las áreas de TIC/IoT, la representación virtual de elementos de infraestructura en plataformas SIG/BIM y la modelación hidráulica, para generar adelantos tecnológicos. En el presente artículo se aborda la aplicación del concepto de Gemelo Digital (DT por sus siglas en inglés) por medio de la transformación digital de RDAPs que facilite y mejore su gestión. Esto comprende la representación virtual de características y dispositivos de la red integrada con modelación hidráulica avanzada e inteligencia artificial, para respaldar las labores operativas en el sistema. En este caso, el DT de RDAPs se utiliza en conjunto con Servicios Digitales del Agua (DWSs por sus siglas en inglés), que son herramientas que trabajan en plataformas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y respaldan distintas fases de la gestión de sistemas. Este artículo presenta algunos DWSs previamente adoptados para la gestión y planificación de RDAPs, y establece ventajas en el proceso de toma de decisión.

### Palabras clave

Modelación Hidráulica Avanzada, Servicios Digitales del Agua, Gestión de Sistemas de Distribución de Agua.

## 1. INTRODUCCIÓN

El concepto de transformación digital ha ganado mucha relevancia en las últimas décadas. De hecho, en los años recientes han ocurrido cambios profundos en la sociedad y las industrias que utilizan las nuevas tecnologías digitales, dada su alta difusión y la revolución que se ha generado por la integración y entrega de productos y servicios en todos los niveles, tanto funcionales como organizacionales [1]. A través de la utilización de dispositivos digitales, de la conexión que permite el Internet de las cosas (IoT por sus siglas en inglés) y a la recopilación y análisis de datos, se ha hecho posible crear sistemas que soporten la toma de decisiones y el monitoreo en tiempo real [2].

Adicionalmente, hoy en día se cuenta con estructuras digitales, como el análisis de datos y la computación en la nube, que ofrecen herramientas novedosas para obtener rápido acceso y

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

extracción de información cada vez más valiosa de un grupo de datos [3]. Como resultado, la digitalización comprende ámbitos de la tecnología y la gestión, introduciendo nuevas herramientas y marcos conceptuales dentro del entorno digital que reestablecen la forma en que las organizaciones abordan los desafíos técnicos, fomentan la innovación y formulan nuevas estrategias. En dicho contexto, los términos "transición digital" o "digitalización" pueden definirse como la utilización de la tecnología para mejorar significativamente el rendimiento empresarial y ampliar el alcance [4], o como un proceso destinado a promover cambios e innovaciones sustanciales dentro de un sistema a través de la integración de tecnologías de la información, computación, comunicación y conectividad [5].

Por otro lado, en el campo de las Redes de Distribución de Agua Potable (RDAPs) los pasos iniciales para adoptar el concepto de transformación digital se han dado recientemente. Como ejemplo de esto, autores como [6] han identificado los factores clave que impulsan la "transformación digital", incluidos los avances en las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y el IoT. Estos avances abarcan redes de comunicación rápida como Narrowband-IoT, protocolos LPWAN y redes 5G, así como la implementación de sensores y la recopilación y análisis de datos a gran escala, lo cual se ha introducido al manejo de RDAPs en las últimas dos décadas. Además, la utilización de representaciones digitales de redes en plataformas como SIG, BIM y WEBGIS se está convirtiendo rápidamente en el estándar de la industria para los operadores de estos sistemas.

Sin embargo, la gestión de RDAPs comprende características distintas que las diferencian de otros sectores industriales y comerciales. Una de ellas es que las RDAPs están influenciadas por el entorno que las rodea, las actividades socioeconómicas y las interacciones con otras infraestructuras. Además, estas varían en escala desde zonas urbanas que abarcan kilómetros de tuberías, hasta regiones rurales que pueden tener menor cantidad de bifurcaciones. Por otro lado, el control de las RDAPs implica la maniobra de dispositivos cuyos efectos en los sistemas se sienten pocos segundos o minutos después, haciendo que el concepto de "control en tiempo real" sea significativamente diferente en comparación con otras infraestructuras (p. ej., redes eléctricas) donde la información viaja a la velocidad de la luz. Por lo tanto, una aplicación directa de los conceptos de transformación digital es inadecuada para abordar las características únicas de las RDAPs, lo cual implica retos de alta complejidad.

En los últimos años, se han alcanzado avances significativos en la modelación hidráulica para mejorar el análisis y la gestión de activos de las RDAPs. Estos avances han resultado en representaciones cada vez más precisas y físicamente fundamentadas de los complejos fenómenos observados dentro de dichas infraestructuras. Un modelo hidráulico sirve como medio principal para representar el funcionamiento de las redes y forma la base de múltiples metodologías destinadas a abordar diversas tareas técnicas. Por ejemplo, apoya la predicción del sistema bajo escenarios anormales, el diseño de áreas de monitoreo por distritos (DMA por sus siglas en inglés), la planificación de obras de rehabilitación y permite la detección temprana de anomalías a través de sistemas de alerta. Además, la incorporación de métricas y algoritmos derivados de la Teoría de Redes Complejas (CNT por sus siglas en inglés) y la Inteligencia Artificial (IA por sus siglas en inglés) ha introducido nuevos enfoques para el análisis hidráulico de las RDAPs. Estos métodos permiten la detección de características topológicas inherentes dentro de las redes y ofrecen soluciones para numerosos desafíos asociados con su planificación y diseño.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

En síntesis, este artículo propone un marco conceptual para la transformación digital en RDAPs que abarca logros técnico-científicos actuales y avances tecnológicos, para proporcionar innovación en casos del mundo real. El paradigma de la transición digital en la gestión de RDAPs implica la integración de DT [7] con manejo de datos, técnicas de AI y metodologías para análisis topológicos e hidráulicos dentro de los enmarcados DWSs. Dichos servicios se conciben como "aplicaciones de ingeniería" que apoyan la resolución de problemas en tareas técnicas específicas, haciendo que la transición digital sea cada vez más adecuada para los operadores. En este caso, para ser aceptados en la comunidad técnica, los DWSs deben cumplir tres requisitos específicos: (i) deben ser interoperables y ejecutarse en plataformas ampliamente utilizadas para la gestión y visualización de datos; (ii) deben preservar el papel central de las habilidades y conocimientos técnicos de los usuarios; y (iii) deben proporcionar soporte y resultados explícitos para ser aplicados en actividades técnicas (p. ej., informes, cálculos métricos, etc.).

El paradigma propuesto para la transformación digital en la gestión de RDAPs se demuestra con la implementación de varios DWSs como complementos en el entorno QGIS. Dichos DWSs comparten la misma estructura de datos del DT que busca la interoperabilidad entre las plataformas de gestión de datos más utilizadas, es decir, Microsoft Excel y el software QGIS.

## **2. METODOLOGÍA**

La transformación digital en las RDAPs implica la integración de diversas metodologías y algoritmos. Estos deben abarcan tanto enfoques basados en la física como técnicas basadas en datos, lo que arroja resultados que tienen un significado técnico directo. El paradigma propuesto en este documento tiene como objetivo proporcionar productos tangibles para apoyar a los técnicos que no se supone que sean expertos en los avances tecnológicos y metodológicos mencionados anteriormente, pero que tienen una visión de ingeniería y un conocimiento profundo de los sistemas específicos. La idea es replicar la experiencia del usuario que se encuentra comúnmente en las aplicaciones de teléfonos móviles donde no se requiere que el usuario tenga experiencia en cada proceso involucrado, pero que esté familiarizado con su propósito final. Esto ha sido explotado por un conjunto de DWSs que son completamente actualizables, personalizables según las necesidades de los técnicos y las empresas de servicios públicos de agua, lo que facilita un intercambio fluido de conocimientos entre investigadores y técnicos en el sector de las RDAPs.

Cada DWS dentro de este marco permite a los usuarios importar la capa digital de la red, incluido el modelo y los datos hidráulicos recopilados de los sensores. Con esta información, los usuarios pueden realizar análisis específicos que fusionan el análisis hidráulico con algoritmos de IA y CNT. Los resultados se generan y visualizan como capas en QGIS, mientras que también se almacenan en formato ESRI® y archivos de Excel. Los DWSs están diseñados para respaldar y validar cada fase del flujo de trabajo de gestión de RDAPs. Por lo tanto, se realizó la aplicación metodológica de algunos de estos servicios en casos de estudio reales de las RDAPs de Bogotá, Colombia y el Altiplano de Asiago, Italia.

### **2.1 MODELACIÓN HIDRÁULICA AVANZADA**

La modelación y análisis hidráulico se realiza por medio de la plataforma WNetXL, la cual incorpora elementos innovadores que generan resultados más realistas y consistentes con el

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

comportamiento real de las RDAPs en comparación con métodos tradicionales de modelación. Este software implementa un análisis hidráulico en función de la presión (*pressure-driven analysis*), que permite describir distintas condiciones de operación de la red, particularmente cuando existe déficit de presión. Lo anterior posibilita la evaluación del volumen real de agua proporcionado a cada consumidor y las pérdidas volumétricas de agua en cada tubería modeladas como flujos de salida distribuidos uniformemente.

**2.1 CASOS DE ESTUDIO**

El primer caso de estudio corresponde a la red de abastecimiento de agua potable de Bogotá, que es un sistema de alta complejidad con alrededor de 656 km de tuberías que proporcionan agua a cerca de nueve millones de habitantes. La red cuenta con tres plantas de tratamiento, 2,296 tuberías, 2,102 nodos, 66 tanques, 30 estaciones de bombeo con 73 bombas y 58 válvulas, de las cuales 41 válvulas son de control de flujo, 15 son reductoras de presión y 2 son reguladoras por estrangulación. A su vez, se registra una demanda promedio de 15.46 m<sup>3</sup>/s. Este modelo hidráulico fue suministrado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

Por otro lado, el Altiplano de Asiago es una zona montañosa ubicada en el norte de Italia, en la región de Véneto, conformada por 7 centros poblados. Su red de distribución se compone específicamente por 10,565 tuberías a lo largo de 700 km, 103 tanques, 55 reservorios, 114 válvulas de reducción de la presión, 1,849 válvulas de aislamiento y 29 bombas. La demanda hídrica media anual es de 46.85 L/s.

**2.3 SERVICIOS DIGITALES DEL AGUA**

A continuación, se realizará una descripción de algunos de los DWSs aplicados a los casos de estudio según su funcionalidad y alcance.

Inicialmente, el servicio *DigitalWater\_GIS\_to\_WDNetXL* permite la importación y gestión de datos SIG gracias a que el formato de datos es el mismo que el manejado en el sistema MS-Excel, como se puede ver en la Figura 1 correspondiente al caso de estudio del Altiplano de Asiago. Es decir, las tablas de WDNetGIS-XL son equivalentes a los datos de Excel incluyendo adicionalmente una georreferenciación con el sistema ESRI.

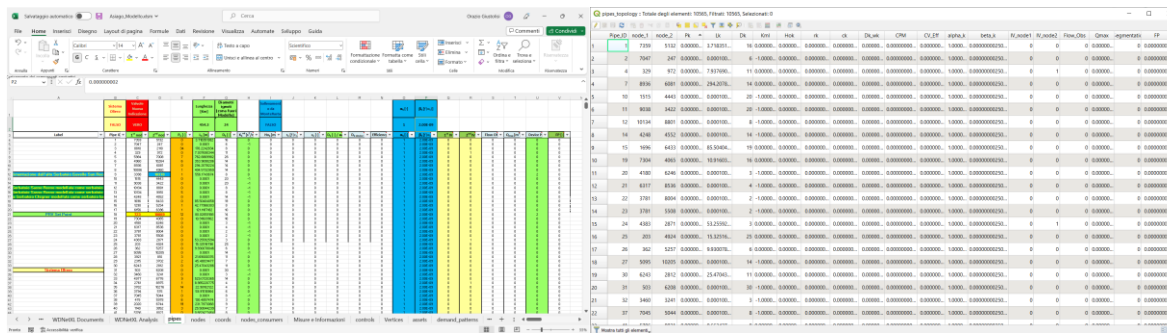


Figura 1. Formato de datos de WDNNetXL (panel izquierdo) y QGIS (panel derecho)

Por otro lado, la herramienta *DigitalWaterIVS\_Analyzer* permite detectar la porción de red que debe ser cerrada por medio de Sistemas de Válvulas Aislamiento (IVS por sus siglas en inglés) para permitir trabajos en una tubería averiada. La interfaz de este servicio se puede apreciar en la Figura 2.

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

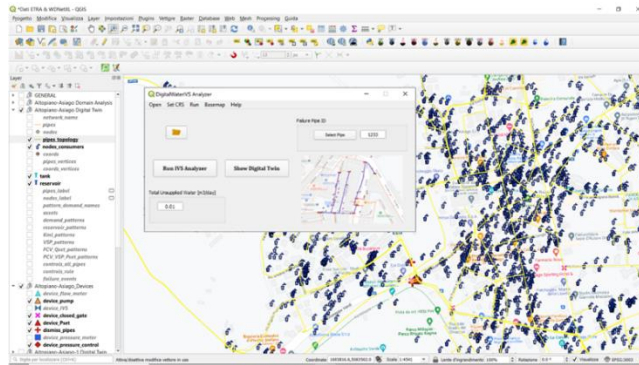


Figura 2. Interfaz de aplicación de la herramienta *DigitalWaterIVS\_Analyzer*

Adicionalmente, el servicio *DigitalWaterDomain\_Analyzer* identifica las tuberías/nodos más relevantes de la red desde el punto de vista topológico basado en métricas adaptadas a la CNT [8]. Dicho análisis permite detectar el comportamiento hidráulico de la RDAP sin realizar la simulación hidráulica, lo que brinda información sobre la jerarquía de transporte de agua en el sistema. En la Figura 3 se puede apreciar la interfaz de aplicación para la red de Bogotá.

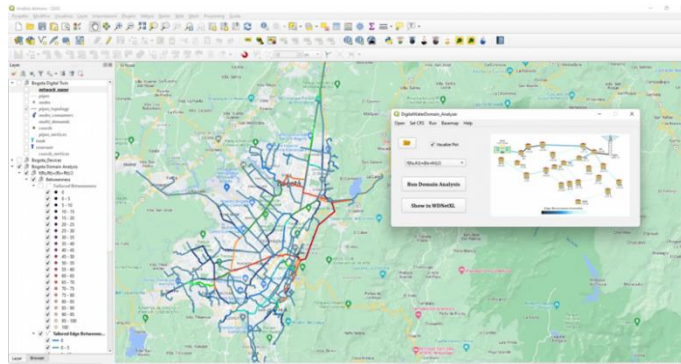


Figura 3. Interfaz del servicio *DigitalWaterDomain\_Analyzer*

El servicio *DigitalWater\_Analyzer* realiza un análisis hidráulico avanzado de la RDAP y el balance de agua de cada DMA en condiciones de estudio de planificación. La herramienta genera los datos clave sobre los patrones de demanda y las fugas dependientes de la presión en cada nivel de DMA. A su vez, brinda información sobre los patrones de flujo/velocidad esperados en los medidores de flujo supuestos, lo que permite tomar decisiones basadas en evaluaciones metrológicas. El servicio integra el concepto y los datos de medición inteligente del consumo de los usuarios en términos de volúmenes diarios, lo cual permite un balance hídrico más preciso. En la Figura 4 se presenta la interfaz de este servicio para la red de Bogotá.

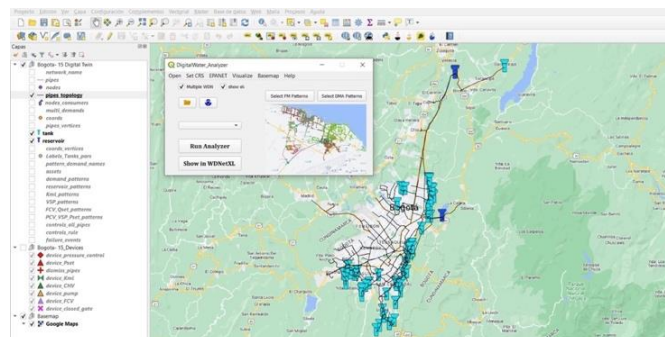


Figura 4. DMA y balances de masa del modelo en *WNetGIS-XL QGIS*

**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

**3. RESULTADOS**

En esta sección se presentan los resultados gráficos obtenidos a partir de la aplicación de los DWSs en los casos de estudio descritos previamente.

Al ejecutar el servicio de *DigitalWater\_GIS\_to\_WDNetXL* fue posible transferir los datos correspondientes a la RDAP de Asiago directamente de Excel a QGIS de *WDNetGIS-XL* y obtener el mapa de la Figura 5 que contienen las tuberías, accesorios, tanques, reservorios y demás componentes del sistema.

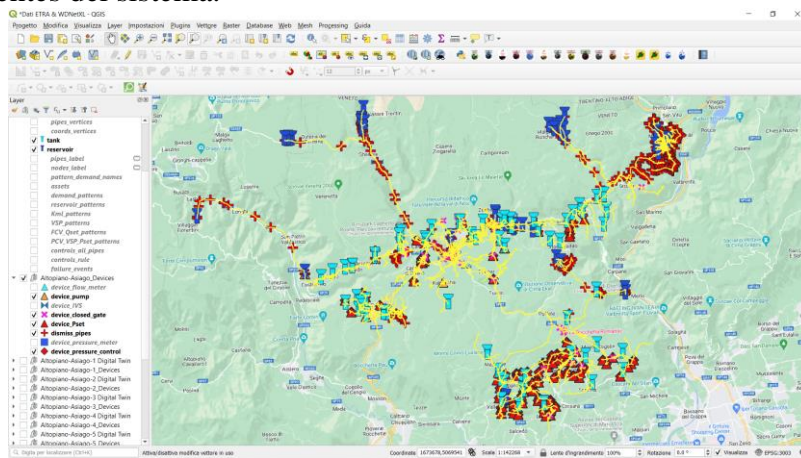


Figura 5. Representación del modelo hidráulico de Asiago en la interfaz QGIS de *WDNetGIS-XL*

Por otro lado, la Figura 6 muestra los resultados al aplicar la herramienta *DigitalWaterIVS\_Analyzer* en la red de Asiago. En este caso se identifican automáticamente las válvulas de aislamiento que se deben activar para realizar trabajos de mantenimiento en las tuberías seleccionadas, así como los usuarios que no tendrían servicio. A partir de esto es posible prever de forma directa las afectaciones que se generarían en un escenario que comprenda tales circunstancias. En consecuencia, la herramienta posibilita ejecutar de forma pertinente los debidos planes de contención, control y evaluación.

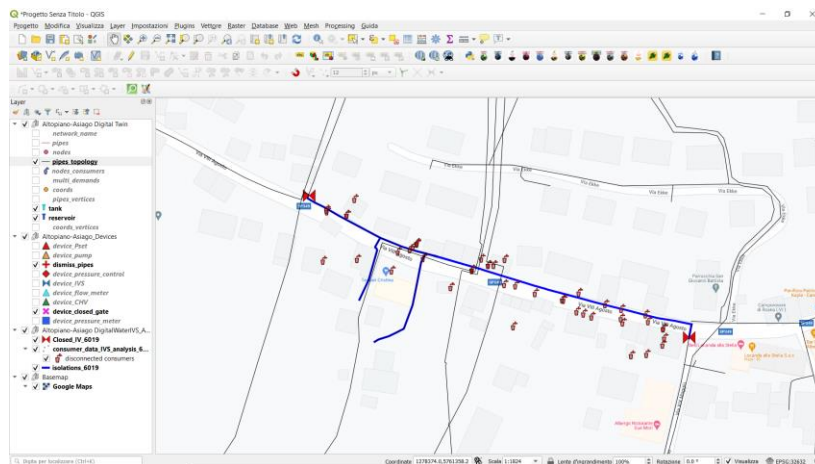


Figura 6. Identificación de válvulas de aislamiento y utilidades desconectadas para trabajos de mantenimiento

SMART WATER:

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

En la **Figura 7. L'origine riferimento non è stata trovata.** se pueden apreciar los resultados de la representación de la variabilidad de la métrica *Tailored Edge Betweenness* en forma de capas en el espacio comprendido por la red matriz de Bogotá, al ejecutar el servicio *DigitalWaterDomain\_Analyzer*. El comportamiento del sistema está bien identificado por la métrica topológica, con valores superiores en correspondencia con las canalizaciones que van desde los embalses hacia las zonas habitadas de la ciudad. En este caso se presentan las tuberías con valores de métrica mayores a 5 y que comprenden un mayor grado de relevancia en el presente análisis.

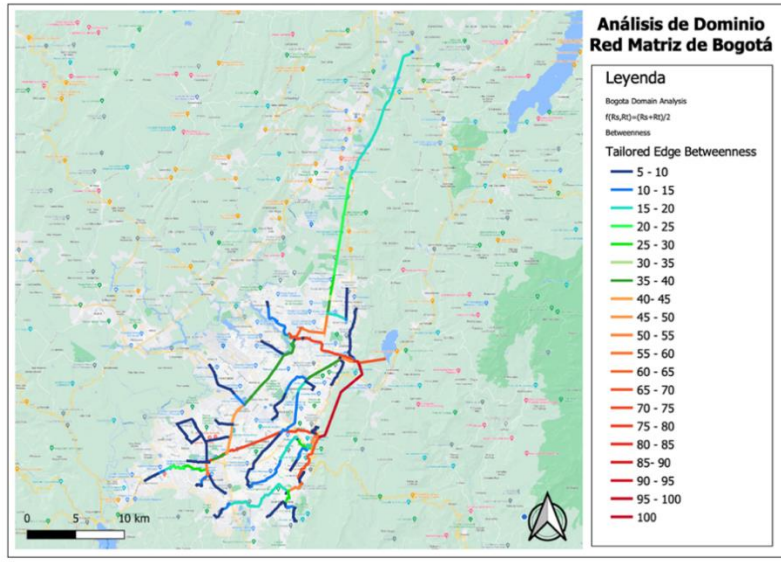
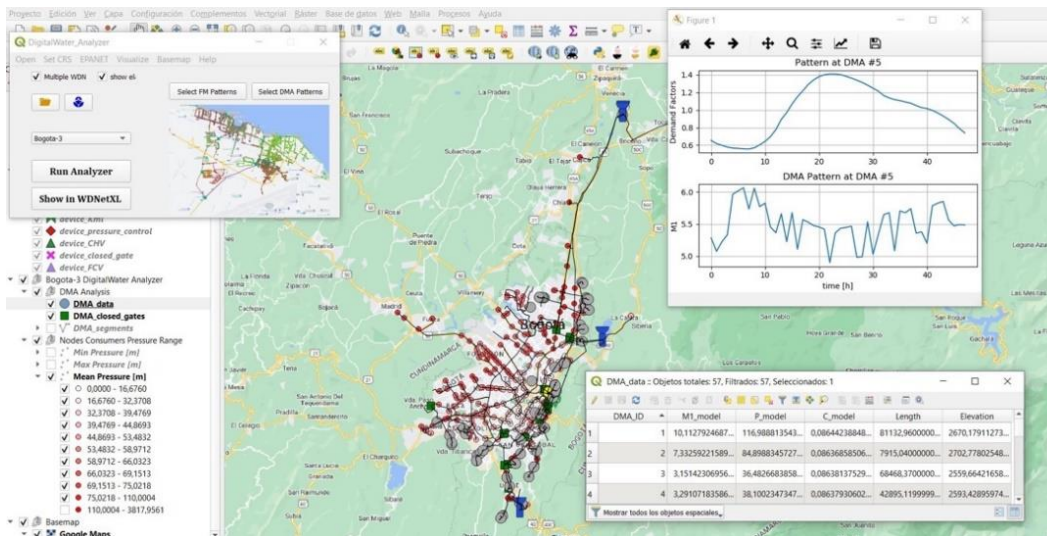


Figura 7. Análisis de Dominio de la Red Matriz de Bogotá

Al aplicar el servicio de *DigitalWater\_Analyzer* se generaron los gemelos digitales para cada distrito junto con los respectivos valores del indicador lineal de pérdidas (M1a), la presión media, la longitud, etc. De esta forma es posible analizar el sistema de acueducto evaluando el statu quo en las distintas escalas a través del valor del indicador M1a y realizar una evaluación desde el punto de vista de las pérdidas de agua y su causa (presión o deterioro). La Figura 8 muestra una sección de los DMA del sistema de Asiago generados por las mediciones y cierres de flujo existentes.



**SMART WATER:**

Transición hacia sistemas inteligentes, sostenibles y resilientes

*Figura 8. Resultados de la ejecución de la herramienta DigitalWater\_Analyzer***4. CONCLUSIONES**

Hoy en día, desde la academia y la industria existe un compromiso con el desarrollo de paradigmas y estrategias para la transición digital en RDAPs, donde el objetivo principal es establecer metodologías estandarizadas y robustas para el desarrollo de DTs adaptados a las características únicas de estas infraestructuras. Asimismo, se ha venido desarrollando un enfoque en la integración de la modelación hidráulica físicamente basada junto con las capacidades que ofrecen las técnicas avanzadas de análisis datos como inteligencia artificial, Machine Learning y Deep Learning.

Este artículo, a partir de una descripción general de los avances significativos que conducen a la transición digital, destaca la potencialidad de proporcionar DWSs interoperables para respaldar cada tarea de gestión, planificación y diseño de las redes de agua potable. Al adoptar este paradigma, se pueden aprovechar los procedimientos estandarizados para la actualización continua de las capas digitales de las RDAPs y apoyar a los técnicos a través del desarrollo de DWSs, por medio de complementos en el software QGIS. Dichos servicios tienen como objetivo suministrar información útil que influya en la toma de decisiones técnicas para mejorar la racionalidad, la replicabilidad, la escalabilidad, la eficiencia, la eficacia y la flexibilidad de las tareas de gestión de RDAPs a corto y largo plazo.

**REFERENCIAS**

- [1] I. Sebastian, J. Ross, C. Beath, M. Mocker, K. Moloney, y N. Fonstad, “How big old companies navigate digital transformation”, MIS quarterly executive, vol. 16, no. 3, 2017, pp. 197-213.
- [2] D. Soto Setzke, T. Riasanow, M. Böhm, y H. Krcmar, “Pathways to digital service innovation: The role of digital transformation strategies in established organizations”, Information Systems Frontiers, 2021, pp. 1-21.
- [3] K. Hwang, y M. Chen, “Big-data analytics for cloud, IoT and cognitive computing”, John Wiley & Sons, 2017.
- [4] G. Westerman, C. Calmédjane, D. Bonnet, P. Ferraris, y A. McAfee, “Digital Transformation: A roadmap for billion-dollar organizations”, MIT Center for digital business and capgemini consulting, 2011, vol. 1, pp. 1-68.
- [5] G. Vial, “Understanding digital transformation: A review and a research agenda”, The Journal of Strategic Information Systems, vol. 28, no. 2, 2019, pp. 118-144.
- [6] P. Conejos Fuertes, F. Martínez Alzamora, M. Hervás Carot, y J. Alonso Campos, “Building and exploiting a Digital Twin for the management of drinking water distribution networks”, Urban Water Journal, vol. 17, no. 8, 2020, pp. 704-713.
- [7] 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, 012002, 2023, IOP Publishing.
- [8] O. Giustolisi, L. Ridolfi, y A. Simone, “Embedding the intrinsic relevance of vertices in network analysis: the case of centrality metrics”, Scientific Reports, vol. 10, no. 1, 2020, pp. 3297.