



## ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DE ADUCTORAS DEL SISTEMA METROPOLITANO

### **Ing. Natalia Catarino (\*)**

Estudios y Proyectos de Agua – Gerencia de Agua Potable – OSE.  
Ingeniera Civil H/A.

### **Msg. Ing. Laura Rovira**

Estudios y Proyectos de Agua – Gerencia de Agua Potable – OSE.  
Ingeniera Civil H/A, Magister en Ingeniería (Mecánica de los Fluidos Aplicada).

### **Ing. Alejandro Capeluto**

Staff de Apoyo Técnico – Gerencia Técnica Metropolitana – OSE.  
Ingeniero Civil H/A.

### **TEMA: 2**



Dirección del autor principal (\*): Obras Sanitarias del Estado (OSE) – e-mail: [ncatarino@ose.com.uy](mailto:ncatarino@ose.com.uy)

### **RESUMEN**

En este trabajo se presenta el funcionamiento del Sistema de Abastecimiento de Agua potable de la Región Metropolitana, compartiéndose la experiencia adquirida en la simulación hidráulica en período extendido de este sistema de gran porte, así como las ventajas de contar con un modelo hidráulico que permite evaluar diferentes alternativas de operación y escenarios, siendo una herramienta primordial para la toma de decisiones. Se presentan algunos ejemplos de su aplicación y se plantean las siguientes etapas del trabajo iterativo y continuo que implica mantener vigente el modelo hidráulico de este complejo sistema.

**Palabras Clave:** agua potable, gestión del agua potable, modelo hidráulico, sistema metropolitano.

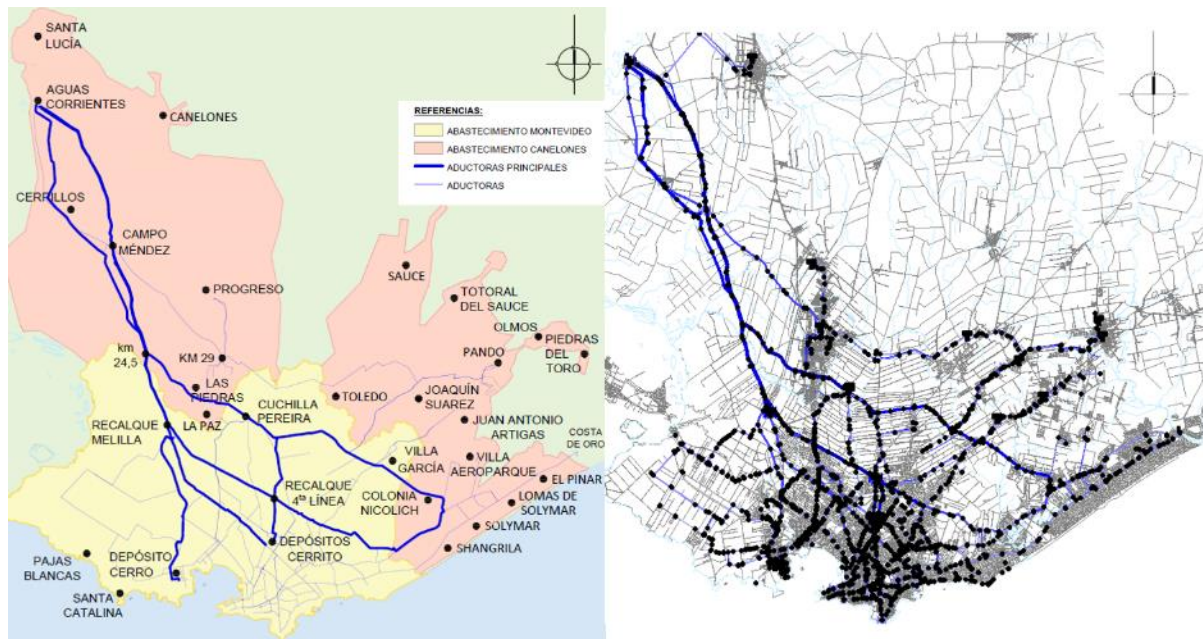
### **OBJETIVO**

El objetivo de este trabajo es disponer una herramienta de modelación hidráulica actualizada del Sistema de Abastecimiento de Agua Potable de la Región Metropolitana, con la versatilidad necesaria para permitir analizar diferentes escenarios de operación, en relación a estudios de cantidad o calidad de agua.

Este modelo hidráulico cuenta con más de 700km de red, tanques y recalques en un sistema con una operación integrada y compleja, siendo el modelo hidráulico de mayor alcance desarrollado dentro de la Administración de las Obras Sanitarias del Estado.

### **INTRODUCCIÓN**

El sistema de estudio abastece de agua potable a la Región Metropolitana (ciudad de Montevideo y zonas aledañas de Canelones) desde la planta potabilizadora localizada en Aguas Corrientes (AACC), con una demanda máxima actual de 700 mil m<sup>3</sup>/d, correspondiente al 50% (aprox.) de la población del país (ver Figura 1).



**Figura 1. Izquierda: mapa zonas abastecidas por el sistema. Derecha: esquema modelo hidráulico.**

El modelo hidráulico de simulación del sistema fue desarrollado en el software Epanet (Rosman, 2002) (ver esquema en Figura 1). Consiste en un modelo de período extendido en donde se representan los diferentes componentes del sistema y su interacción.

## DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de estudio se conforma por un conjunto de diferentes elementos: líneas aductoras, estaciones de bombeo, tanques, válvulas de cierre y reguladoras, entre otros.

Las líneas aductoras son aquellas de diámetros entre 250mm y 1500mm, alcanzando un total de aproximadamente 2200 líneas de diferentes materiales y 727km de longitud aproximada de red. Además de la estación de bombeo de alta en AACC, el sistema cuenta con varias estaciones de re-bombeo y reservorios de agua de gran porte (30 reservorios de entre 600m<sup>3</sup> y 28000m<sup>3</sup>), ubicados en puntos estratégicos.

Las características y operación de las principales aductoras del sistema se describen a continuación:

- **Cuarta Línea de Bombeo (4LB):** abastece principalmente la zona centro del sistema (ver Figura 2), es de hormigón pretensado (HP) DN 1500mm, data de los años 60 y tiene 42km de longitud (L) en su tramo principal desde AACC hasta el recalque 4LB (R4LB). Opera según los niveles de los depósitos de Cerrito (+ 5.5m), con caudales de aprox. 8600m<sup>3</sup>/h con recalque OFF y 11600m<sup>3</sup>/h con recalque ON, y presión máxima de salida en AACC de 132 mca. Se divide en 2 sub tramos: 1<sup>ra</sup> derivación de la 4LB (1D4LB), desde el R4LB a los depósitos del Cerrito en HP DN 1200mm L=4.2km, y la 2<sup>da</sup> derivación de la 4LB (2D4LB) desde el R4LB hacia el Este de Montevideo en HP DN 1200 L=4.5km (línea abastecida actualmente desde la 5LB).
- **Quinta Línea de Bombeo (5LB):** abastece principalmente a la zona Este del sistema (ver Figura 2), en fundición dúctil (FD) DN 1500mm, data de los años 90 y cuenta con 38km de longitud en su tramo principal desde AACC a Mendoza y Aldebarán. Opera en el horario diurno manteniendo un valor de piezométrica establecido en Washington y Ruta. 101, con un caudal entre 9500 y 11500m<sup>3</sup>/h y una presión máxima de salida desde AACC 160mca. En la noche se abre el abastecimiento hacia los

tanques de Cuchilla Pereira, con un caudal de aproximadamente 8500m<sup>3</sup>/h y una presión de salida de AACC de 110 mca. En las inmediaciones de Mendoza y Aldebarán esta tubería se divide en 2 sub tramos: 1<sup>ra</sup> derivación de la 5LB (1D5LB) que se dirige hacia el R4LB en FD DN 900mm L= 5.5km y abastece a la 2D4LB (zona Este de Montevideo), y la 2<sup>da</sup> derivación de la 5LB (2D5LB) en FD DN 1000mm L=16km, que finaliza en el cruce de las calles Washington y la Ruta 101.

La 5LB es la línea que actualmente se encuentra operando al límite de su capacidad, y se prevé que la demanda se siga incrementando según los Planes de Ordenamiento Territorial de la Intendencia de Canelones (zona Ruta 8, Ciudad de la Costa, zona de Camino de los Horneros, entre otras).

- Sexta Línea de Bombeo (6LB): abastece principalmente a la zona Oeste del sistema (ver Figura 2), es de FD DN 1200mm y 32km de longitud en su tramo principal desde AACC a Recalque de Melilla (RM), data del año 2010. Opera según los niveles del tanque de Cerro (+3m), con caudal de aprox. 5500-7000m<sup>3</sup>/h (RM OFF/ON) y una presión máxima de salida en AACC de 160 mca. Desde el RM se divide en 2 sub tramos: Tramo 4 en FD DN 900mm L= 7.7km, se desarrolla hasta el cruce de las calles Boulevard Battle y Ordoñez y Av. Garzón, y Tramo 5 en FD DN 800 mm L= 7.7 km hacia los tanques del Cerro. Desde la 6LB se abastece además a la Línea de Emergencia (LE- 800mm) y parte de la 1<sup>ra</sup> Línea de Bombeo (1LB-610mm-data 1870).

La 4LB, 5LB y 6LB cuentan con la posibilidad de interconectarse en Aguas Corrientes, en Campo Méndez y en camino Melilla y Perugorria (denominado km 24.5).

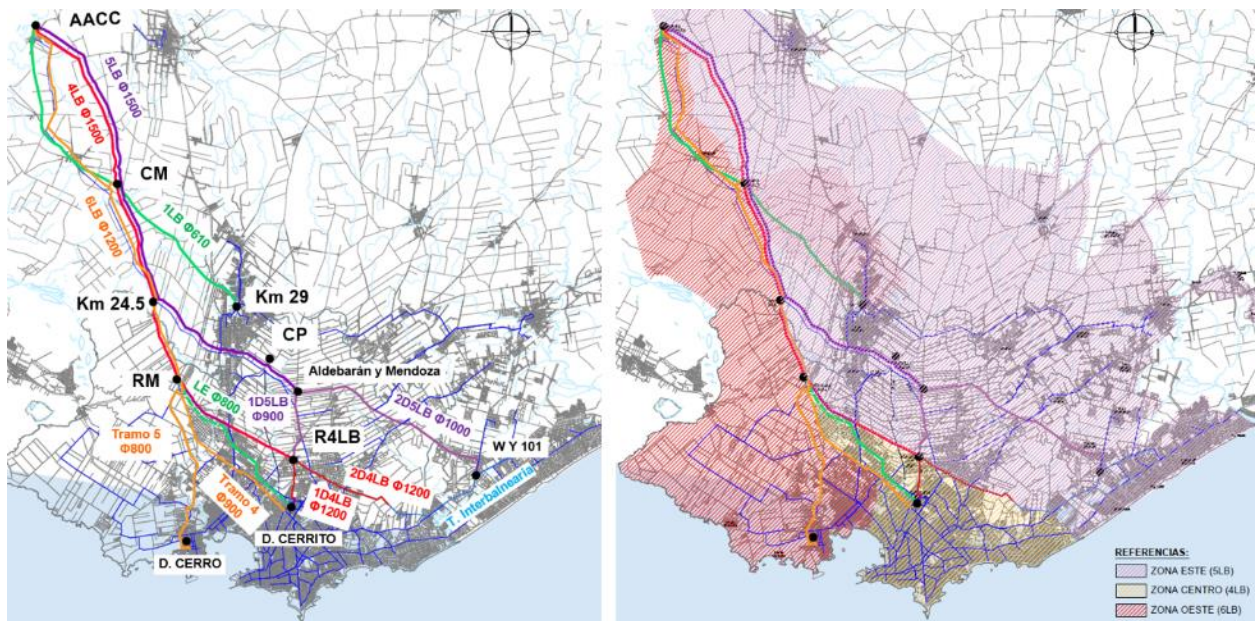


Figura 2: Izquierda: infraestructura principal del sistema. Derecha: zona de influencia por aductora.

## CONFORMACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO

### Antecedentes

La primera versión del modelo hidráulico en EPANET fue desarrollada en el 2007 en el marco de la evaluación de las obras propuestas por el Plan Director de Agua Potable de Montevideo (PDAPM).

En el 2018 debido a una Consultoría realizada por el consorcio Seinco&Hazen en el marco del proyecto denominado "Estudio para el tratamiento y optimización de la gestión eficiente de Subproductos de



## XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país



Desinfección (DBP)", se requirió contar con un modelo hidráulico actualizado del sistema para un día medio de verano, el cual sería la base para la ejecución del modelo de calidad.

### Fuentes de Información

Se dispone de información y registros de datos medidos de una gran variedad de fuentes, destacándose: registros continuos de presiones, niveles de agua y caudales en decenas de sitios del sistema (sistema SCADA de OSE), partes de bombeo, bases de datos pitométricos, balances de agua sectorizados, sistema de información geográfica de OSE, planos conforme a obra, manuales y catálogos de equipos electromecánicos y tuberías, datos topográficos de Ideuy, datos demográficos del INE, entre otros.

### Metodología

La herramienta de modelación del Sistema Metropolitano fue desarrollada en diversas etapas hasta conformarse en un modelo hidráulico con la versatilidad necesaria para permitir analizar escenarios actuales o proyectados de operación. A continuación se describe brevemente las etapas de este proceso de desarrollo y actualización del modelo.

#### Calibración 1era Etapa

La primera etapa, desarrollada en el 2018, tuvo como objetivo la calibración global de los principales componentes del sistema considerando la producción de agua y demandas correspondiente a un día promedio de verano para el año 2018 (650 mil m<sup>3</sup>/d).

En base al modelo hidráulico desarrollado en el 2007 se procedió a incluir los nuevos componentes del sistema, según la información disponible de los planos conforme a obra. Se revisó y ajustó la información de los elementos existentes (troncales, tanques, interconexiones, etc). Se analizaron las demandas y se procedió a asignar el coeficiente de rugosidad en función del material y la edad de la tubería según recomendaciones de bibliografía (Azevedo Neto, 1998).

A continuación se subdividió el sistema, tomando como base las principales líneas aductoras (6LB, 5LB y 4LB) para realizar el estudio de calibración a cada línea principal de la siguiente forma:

- Cada línea se subdividió en tramos (prefijados según la información disponible de datos medidos) y se fijaron en cada extremo patrones de piezométrica con la curva horaria de variación. Se calibró el coeficiente de rugosidad de Hazen- Williams (C) hasta obtener un valor de caudal circulante por la tubería "similar" al valor medido. Se asumió válido un error admisible global del 5%.
- Una vez calibrados los tramos independientemente, se recompone la situación real (se modifica el patrón de piezométrica por el elemento correspondiente: equipo de bombeo, tanque, interconexión) y se verifica su funcionamiento. En caso de requerirse se realiza ajuste del C.

Una vez calibradas las aductoras principales del sistema, se procedió a calibrar el resto de las troncales:

- Se distribuyen las demandas de los diferentes puntos de salida de las troncales, según la información disponible: troncal con registro en línea, dato pitométrico o sin información.
- Se calibra el coeficiente de rugosidad de modo de obtener las piezométricas correspondientes con las zonas abastecidas desde cada una de ellas (el sistema cuenta con una buena base de datos de presión medidos en líneas, los cuales fueron utilizados en esta etapa de la calibración). Cuando no se dispuso de esta información, se utilizó el dato topográfico e información del área operativa.

Por último, en esta etapa, se definieron las reglas de control utilizando "reglas simples" de Epanet con consignas horarias en lo que refiere al funcionamiento de equipos de bombeo, apertura y cierre de interconexiones, con el fin de replicar el día modelado.

Los rangos del coeficiente de rugosidad obtenidos (valores de C entre 60 -150), fueron validados por la consultora internacional Hazen, dado que el modelo hidráulico obtenido en esta etapa fue el utilizado por Seinco&Hazen para el estudio de calidad antes mencionado, con buenos resultados.



## XI Congreso Nacional de AIDIS

Cambios, desafíos y soluciones:

El rol de la Ingeniería Ambiental en el desarrollo sostenible

25 al 27 de octubre de 2022

Cámara Mercantil de productos del país



Al finalizar esta primera etapa, se obtuvo un modelo que cumplió con el objetivo de representar el sistema en un día medio de verano, pero debido al tipo de reglas de control utilizadas (controles simples) tiene como desventaja que limita la posibilidad de análisis de algunas modificaciones del sistema, ya que implica modificar los rangos horarios definidos en los controles en forma iterativa.

### Calibración 2da Etapa

La segunda etapa de ajuste y desarrollo del modelo tuvo como objetivo contar con una herramienta con mayor eficiencia para evaluar diferentes condiciones de operación del sistema. Para esto, en base al modelo del día medio de verano del 2018, se procedió a:

- Realizar un análisis global de las demandas, modificando las curvas de demandas horarias definidas en la etapa anterior a una única curva, con el fin de poder ajustar la demanda global utilizando un único coeficiente global a todo el sistema.
- Modificar las consignas de control definidas como “simples” a “basada en reglas”, con el fin de que el sistema se ajuste automáticamente a diferentes condiciones, de acuerdo con su operación real. Se analizaron las diferentes posibilidades de operación del sistema (ver Capítulo Descripción del Sistema), y se programaron las reglas condicionales para abarcar todas las situaciones posibles.
- Utilizando un coeficiente global de 1.089 que corresponde a una demanda global del sistema de 700 mil m<sup>3</sup>/d (día máximo de verano registrado 2020, verificado para 2022) se procedió a validar la performance del modelo contrastando los resultados con los datos medidos del sistema.

Como resultado de esta etapa, se obtuvo una versión del modelo hidráulico con curvas de demandas unificadas, que se ajusta de forma adecuada a diferentes escenarios de demanda global. Asimismo esta herramienta cuenta con gran versatilidad para responder frente a cambios operacionales, maniobras y/o modificaciones de demandas, sin necesidad de modificar las consignas de control ya que esto se realiza de manera automática.

### **APLICACIONES**

El modelo hidráulico ha sido utilizado para la realización de diversos estudios. Se presenta a continuación 2 aplicaciones, a modo de ejemplificar la versatilidad y utilidad del mismo.

#### **Evento de Rotura de la 4LB**

Durante un evento de rotura de la 4LB se debió detener la operación de la misma durante el tiempo de su reparación. El modelo permitió estimar el tiempo disponible para la reparación en base al nivel de reserva de agua en los tanques de Cerrito, abastecidos por la 4LB. Posteriormente, estas variaciones de nivel en el tiempo que resultaron del modelo fueron contrastadas con las variaciones de nivel medidas, de forma de verificar y validar los resultados del modelo.

Fecha: 23 de junio de 2021.

Rotura: 4LB en Campo Méndez (en salida interconexión con la 5LB).

Acciones sobre el sistema: apertura de comunicación 4LB y 5LB en km 24.5, elevar piezométrica de 5LB, elevar piezométrica de 6LB para contener “bajada del Cerrito” por Tramo 4 y LE, apagar recalque Unión con menos de 2 m de nivel de tanques de Cerrito.

Modelación: se ajusta el coeficiente global de demanda para obtener una demanda del sistema de 600mil m<sup>3</sup>/d (correspondiente al momento de la reparación), se simulan las acciones sobre el sistema indicadas anteriormente, deteniendo el suministro de la 4LB y evaluando el tiempo disponible para la reparación según el nivel de los tanques de Cerrito. Como resultado se obtuvo una tabla de “tiempos de corte” en función del nivel de agua inicial en estos tanques (ver Tabla 1).

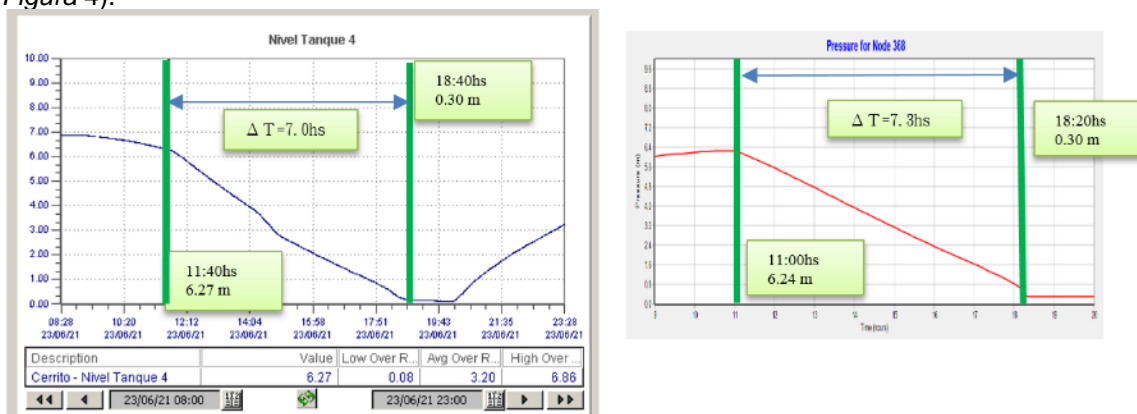
**Tabla 1: Resultados modelo corte 4LB**

Nivel inicial T4 Cerrito (m)	$\Delta t$ (hs) hasta Nivel mínimo T4 Cerrito
7.8	9.5
7.4	9.0
7.1	8.6
6.3	7.5
6.0	7.1
5.6	5.3
5.2	4.8
4.8	4.3



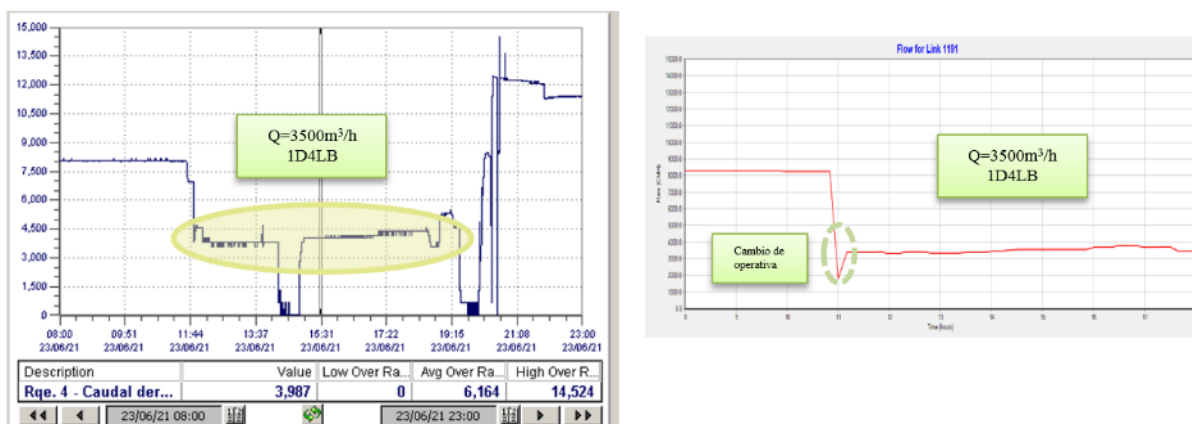
**Figura 3. Zona de rotura 4LB – Campo Méndez**

En la práctica, la maniobra de reparación de la 4LB inició a las 11:40hs siendo el nivel de agua en los tanques de Cerrito de 6.25m, alcanzando el nivel mínimo luego de 7 hs desde el inicio del corte. Si se compara con el resultado obtenido del modelo (ajustado a nivel de tanque inicial 6.25m), se puede visualizar que el valor estimado de vaciado del tanque previsto se aproxima al valor real: 7.0hs vs 7.3hs (ve *Figura 4*).



**Figura 4: Nivel tanque 4 Cerrito, corte 4LB. Izquierda: registro Scada. Derecha: resultado modelo.**

Se verifica también que el caudal que abastece a los tanques del Cerrito en el modelo se ajusta correctamente con el registro medido (ver *Figura 5*).



**Figura 5: Caudal hacia Cerrito, rotura 4LB. Izquierda: registro SCADA. Derecha: resultado modelo.**

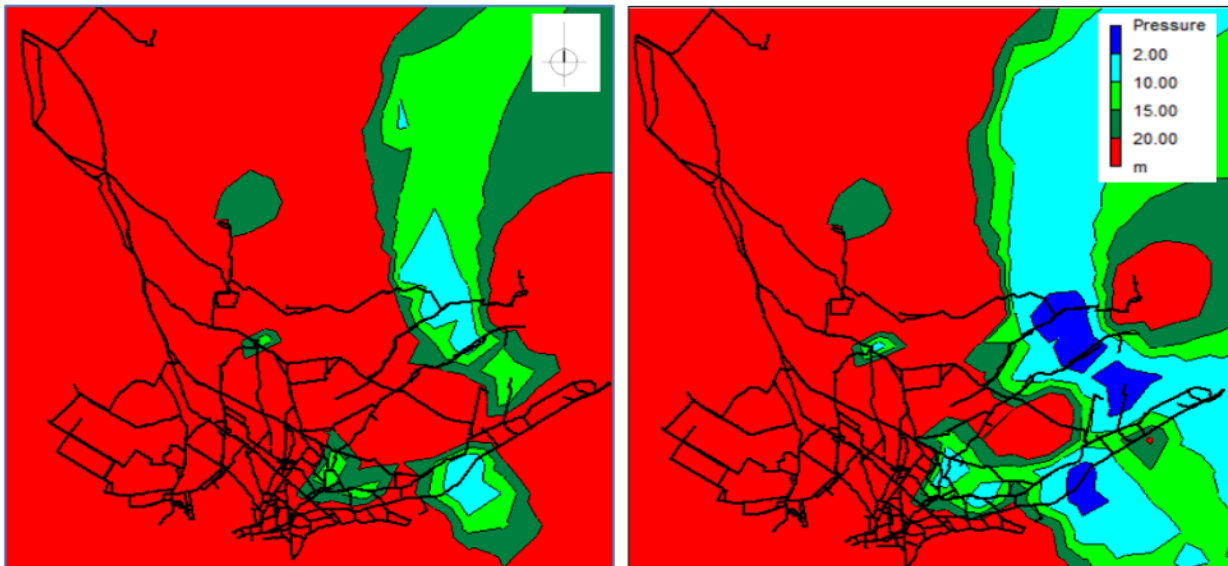
Por lo expuesto, la modelación realizada para el corte de la 4LB representa correctamente el comportamiento del sistema.

#### **Bombeo hacia Troncal 2D4LB desde recalque 4LB**

Como ejemplo de otra aplicación del modelo desarrollado, se presenta el análisis de una posible solución a los problemas previstos por incrementos de abastecimientos a la zona Este del sistema (desde la 5LB).

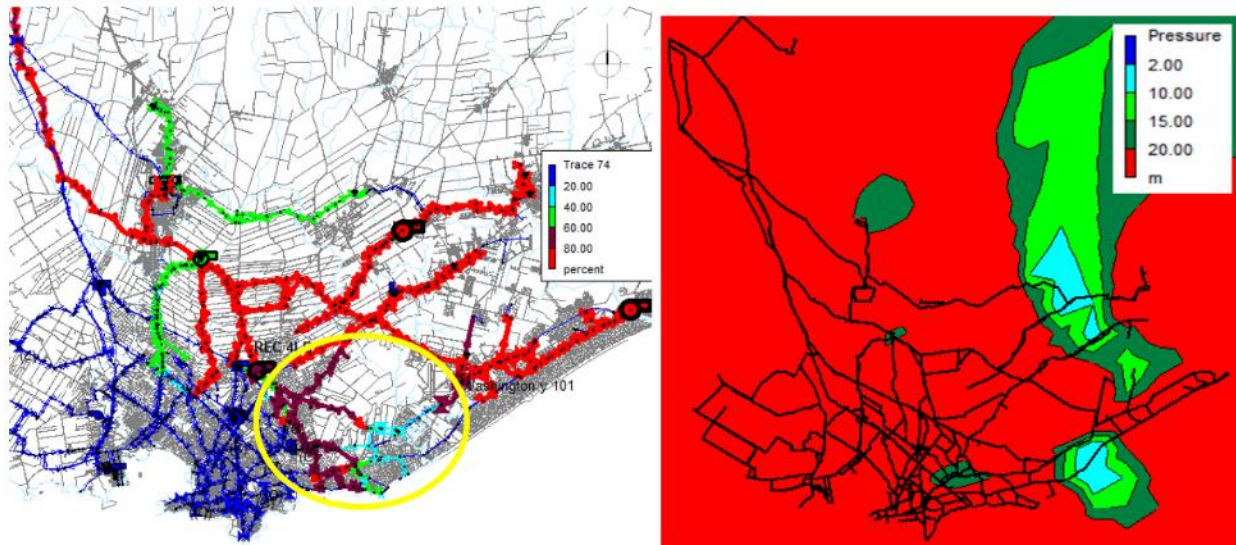
En primer lugar, se incorporan al modelo los incrementos de demanda estimados hacia la 5LB (corto plazo), resultando un consumo total del sistema de 711 mil m<sup>3</sup>/d.

En la Figura 6 se muestran los mapas de presiones sobre el Sistema Metropolitano que resultan del modelo hidráulico a las 12:00 pm del día modelado, en las condiciones de operación actuales y considerando dos escenarios de demandas: escenario de consumo máximo actual y el escenario con los nuevos incrementos de demanda previstos hacia el Este. Se puede observar que el Sistema Metropolitano en las condiciones de operación actuales no logra abastecer en forma adecuada a la zona Este si se incorporan los incrementos de demanda previstos hacia esta zona.



**Figura 6: Mapas de presiones resultantes del modelo en condiciones de operación actuales. Izquierda: consumo máximo actual. Derecha: con incrementos de demandas previstos al Este.**

De forma de paliar este déficit de abastecimiento previsto para la zona Este, se analiza modificar en el modelo hidráulico la operación del sistema bombeando la 2D4LB desde el recalque 4LB y manteniendo abierta 1D5LB en su conexión con 2D4LB. Se consideran diferentes configuraciones de operación (según apertura interconexión 1D5LB, tiempo R4LB ON, niveles de tanques Cerrito, entre otros), obteniéndose escenarios posibles de bombeo hacia la 2D4LB que logran adecuar el abastecimiento al Este del sistema. A modo de ejemplo, en la Figura 7 se muestra la zona de influencia abastecida por la 5LB y los mapas de presiones que resultan del modelo para las 12:00pm del día modelado y en la configuración de operación en que: se mantiene siempre abierta la conexión de la 1D5LB con 2D4LB, se pone en servicio el recalque de la 4LB hacia 1D4LB y 2D4LB cuando los tanques de CP están cerrados a su conexión con la 5LB y se interrumpe este bombeo cuando los tanques de CP abren a su conexión con 5LB.



**Figura 7: Resultados configuración bombeo 2D4LB a las 12:00 hs. Izquierda: mapa de zonas de influencia 5LB. Derecha: Mapa de presiones Sistema Metropolitano.**

Se obtiene que el recalque de la 4LB debe operar aproximadamente 17hs del día (hoy, en días de consumo pico opera del orden de 9hs), y se debe admitir variaciones de nivel en los tanques de Cerrito entre 5 y 7 m (actualmente es de entre 6 y 7m aprox.). La zona abastecida por la 2D4LB pasa a ser una zona de mezcla de agua entre la 4LB y 5LB (zona indicada con un círculo amarillo en la Figura 7), mientras que hoy es abastecida exclusivamente por la 5LB. Los mapas de presiones para la hora de consumo pico muestran condiciones de funcionamiento incluso mejores que las actuales en que no se tienen los incrementos de demanda considerados al Este (ver Figura 6).

## CONCLUSIONES Y ACCIONES A SEGUIR

Se presenta una herramienta que ha sido sumamente útil para evaluaciones de diferentes escenarios de operación y estudios de calidad, análisis de nuevas obras de infraestructura a realizar, así como para detectar mejoras en el abastecimiento al Sistema Metropolitano con simples maniobras como las de aperturas o cierres de válvulas, asistiendo en la toma de decisiones frente a diferentes alternativas.

Además de continuar con la actualización continua del modelo, se pretende:

- resolver incongruencias en datos de balance de agua y mediciones en línea
- mejorar la modelación de fugas de agua en el sistema
- continuar con los ajustes de modelación en zonas específicas.

## AGRADECIMIENTOS

*Ing. Martín Delgado de Líneas de Aducción, por su constante colaboración con los datos de operación.*

*Ing. Alberto Bracho, por su colaboración en las mejoras al modelo, en especial en relación a las reglas de control y curvas de demanda.*

*En especial a la Ing. Mercedes Visca por ser parte del equipo de trabajo durante las primeras etapas.*

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Azevedo Neto, 1998, *Manual de Hidráulica*.
2. Rossman, L. (2002) *EPANET, Users Manual*.