

**XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento  
y drenaje**  
**“MODELACIÓN FÍSICA DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA  
POTABLE COMO APOYO A PROCESOS DE DOCENCIA E  
INVESTIGACIÓN”**

*Juan David Uribe (1), Juan Saldarriaga (2)*

**(1) Investigador, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA), Carrera 1 No. 18A-10, Bogotá, Colombia. Email: jduribe243@uniandes.edu.co, Teléfono: 3394949 Ext: 1764**

**(2) Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA), Carrera 1 No. 18A-10, Bogotá, Colombia. Email: jsaldarr@uniandes.edu.co. Teléfono: 3394949 Ext: 2810**

**RESUMEN**

El modelo físico de la red elevada es una red real construida en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes Bogotá, Colombia, con el fin de estudiar el comportamiento de redes de distribución de agua potable y como una herramienta para apoyar los procesos docentes e investigativos. El uso primordial de la red es el estudio de presiones y comportamiento de sustancias dentro de las redes de distribución y para usos pedagógicos dentro de la universidad. En este artículo se describirán las principales características y aplicaciones a las que a sido sometida la red Elevada.

**Palabras claves:** Redes de distribución, calibración, modelo, laboratorio, cloro residual.

**ABSTRACT**

The physical model know as Red Elevada is a network constructed at the Laboratorio de Hidráulica of the Universidad de los Andes with the purpose of studying the behavior of real water distribution networks and as a tool to support the teaching and research processes. The main uses of the network consist in studying pressures and substances inside the networks, and the pedagogical uses within the university. In this article the main characteristics will be described as well as the applications to which has been subjected.

**Key words:** Water Distribution Network, calibration, model, laboratory, residual chlorine.

**SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL**

**Juan David Uribe:** Ingeniero Ambiental de la Universidad de los Andes de Colombia. Realizando una maestría en Ingeniería Civil, en el área de recursos hídricos. Trabaja en el Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) de la Universidad de los Andes.

## INTRODUCCIÓN

El presente artículo busca mostrar el modelo físico construido en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de los Andes Bogotá, Colombia. La motivación detrás de este modelo fue el estudio del comportamiento de las redes de distribución de agua potable bajo diferentes condiciones de operación. Este modelo cuenta con 6 circuitos de 110 metros de longitud con diámetros de 50.8, 76.2 y 101.6 mm, 18 nudos de demanda, con un rango de caudales que oscila entre 1 y 10 L/s, un nudo de entrada con capacidad de entregas hasta 100 L/s con una columna de agua de 6 metros, 10 puntos de medición de presiones, 5 puntos de medición de caudales y 3 puntos de medición de la calidad del agua. La red a su vez se encuentra instrumentada en su totalidad permitiendo realizar mediciones en tiempo real y la transmisión de datos a través de la red electrónica de datos de la universidad.

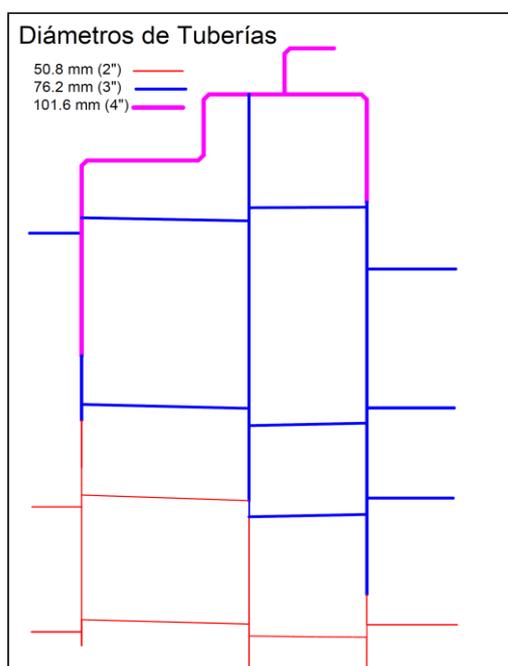


Figura 1 Esquema de los diámetros de la red elevada (Prieto, 2011).

Los parámetros trabajados dentro de esta red incluyen la medición de caudales y presiones y puntos para medir la mezcla y comportamiento de diferentes sustancias como cloruro de sodio y cloro.

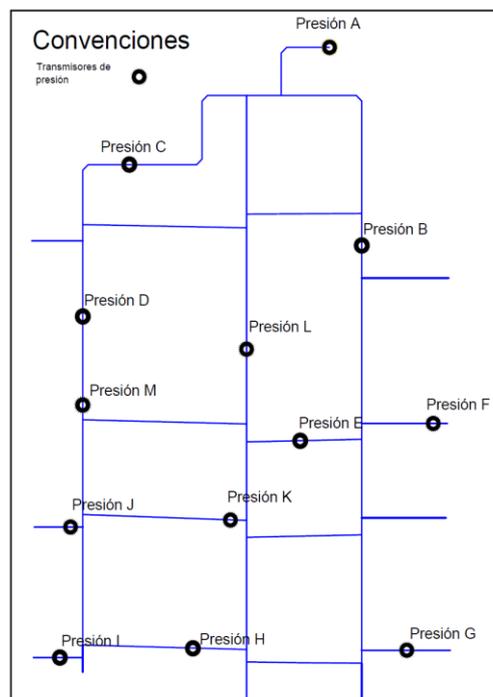


Figura 2 Esquema de sensores de presión de la red elevada (Prieto, 2011).

Dicho modelo ha sido utilizado en diversas investigaciones tanto para calibración y validación de modelos computacionales como para el estudio de sustancias. Adicionalmente el modelo es utilizado en cursos de postgrado de la Universidad de los Andes para ilustrar a los estudiantes en los fenómenos hidráulicos que ocurren en tuberías presurizadas.

Por ende, este artículo se enfocará en mostrar los resultados más relevantes de la investigación realizada con su respectiva metodología.

## BASE CIENTÍFICO-TEÓRICA

### Principios Hidráulicos

Al ser un modelo físico de una red de distribución de agua potable cerrada, este debe cumplir con los principios de la conservación de la masa y conservación de la energía. Las pérdidas por fricción son representadas con la ecuación físicamente basada de Darcy-Weisbach en conjunto con la ecuación de Colebrook-White en caso de ser flujo turbulento o la ecuación de Hagen-Poiseuille si es flujo laminar (Saldarriaga, 2009). A continuación se muestra este conjunto de ecuaciones:

Ecuación de conservación de la masa:

$$\sum_{j \in J} Q_{IN} = \sum_{i \in I} Q_{out} + Q_d \quad (1)$$

donde  $Q_{IN}$  es el caudal que entra a la unión,  $Q_{out}$  es el caudal que sale de la unión y  $Q_d$  es el caudal demandado en la unión.

Ecuación de la conservación de la energía:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Hf + Hm \quad (2)$$

donde  $z_1$  es la cota del nudo de salida,  $z_2$  es la cota del nudo de llegada,  $p_1$  y  $p_2$  representan las presiones del nudo de salida y de llegada respectivamente,  $\frac{v_1^2}{2g}$  y  $\frac{v_2^2}{2g}$  representan las energías cinéticas en los nudos respectivamente,  $Hf$  representan las pérdidas de energía causadas por fricción y  $Hm$  las pérdidas menores causadas por accesorios.

La ecuación de Darcy-Weisbach es:

$$Hf = \frac{l}{d} * f * \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

donde  $l$  es la longitud del tramo,  $d$  es el diámetro real interno de la tubería,  $f$  es el factor de fricción adimensional y  $v$  es la velocidad del flujo.

### Principios de la Modelación de la Calidad del Agua

El modelo en sí mismo presenta una base para la modelación de la calidad del agua debido a que este montaje es usado para estudiar el comportamiento de las sustancias en redes de distribución de agua potable. Dentro de los principales conceptos se encuentran ecuaciones para modelar la variación de las concentraciones tanto espacial como temporalmente, incluyendo el concepto de conservación de la masa y las ecuaciones que representan la cinética de las reacciones en la red.

### Ecuación de Mezcla en los Nudos

$$C_{ix=0} = (\sum_{j \in I_k} (Q_j C_{jx=L_j} + Q_{k,ext} C_{k,ext})) / (Q_j + Q_{k,ext}) + C_{iny,k} \quad (4)$$

donde  $i$  es el índice de tubos que salen del nudo  $k$ ,  $I_k$  son las tuberías que llegan al nudo  $k$ ,  $L_j$  representa la longitud del tubo  $j$ ,  $Q_j$  es el caudal que circula en el tubo  $j$ ,  $C_{jx=L_j}$  es la concentración en el tubo  $j$ ,  $Q_{k,ext}$  es el caudal externo que entra en el nudo  $k$ ,  $C_{k,ext}$  Es la concentración del caudal externo del nudo  $k$  y  $C_{iny,k}$  es la concentración en caso de que haya inyección en el nudo  $k$  (Mays, 2002).

### Ecuación de Transporte Adectivo en Tuberías

$$\frac{\delta C_i}{\delta t} = -u_i \frac{\delta C_i}{\delta x} + r(C_i) \quad (5)$$

### Mezcla entre Tanques

Ya que es necesario analizar el comportamiento de las sustancias tanques con un solo compartimiento (mezcla completa), dos compartimientos (zonas muertas) y varios compartimientos, la ecuación que representa este fenómeno se muestra a continuación:

$$V_t \frac{d(C_T)}{dt} + C_T \frac{d(V_T)}{dt} = F * C \quad (6)$$

donde  $F$  es el flujo de agua y  $C$  es la concentración.

$$\frac{d(V_T)}{dt} = F \quad (7)$$

donde  $\frac{d(V_T)}{dt}$  representa el cambio del volumen de agua al interior del tanque.

### Cinética de las Reacciones

Finalmente se muestran la cinética de las reacciones. Las principales ecuaciones que rigen este comportamiento se muestran a continuación:

$$r(C) = k(C - C_L) * C^{n-1} \quad (8)$$

$$r(C) = k(C_L - C) * C^{n-1} \quad (9)$$

donde  $C_L$  es la concentración límite,  $k$  es la constante de reacción y  $n$  es el orden de la reacción.

Las reacciones de primer orden son utilizadas para describir el cloro y demás sustancias desinfectantes. Las reacciones de segundo orden ayudan a representar el comportamiento altas pérdidas iniciales, como en los procesos de desinfección que se presentan en las plantas de tratamiento de agua.

Así mismo se tienen las reacciones que ocurren en el agua representada en la Ecuación 10 y en las paredes de la tubería representada en la Ecuación 11.

$$r = kC^n \quad (10)$$

donde  $k$  es la constante de reacción y  $n$  es el orden.

$$r = \frac{4k_w k_f}{d(k_w k_f)} \quad (11)$$

donde  $k_w$  representa el coeficiente de reacción con la pared,  $k_f$  es el coeficiente de transferencia de masa y  $d$  es el radio de la tubería.

## METODOLOGÍA

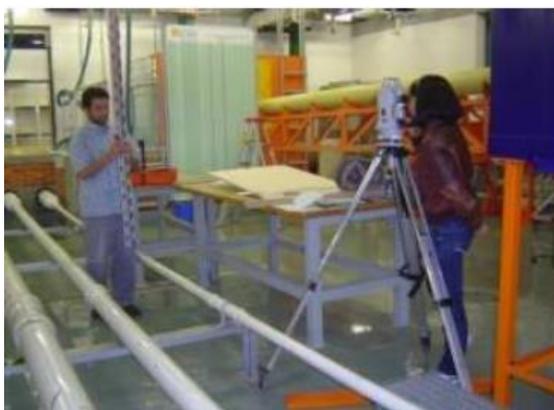
### Mediciones Topológicas y Topográficas

Una vez montado el modelo físico se realizaron mediciones topográficas y topológicas de tal forma que se conociera la estructura física de la red a la perfección.

Las mediciones topográficas de la red consistieron en medir las diferencias de nivel de los diferentes accesorios de la red utilizando dispositivos de alta precisión como el teodolito electrónico y la mira de 5 metros de longitud. Las mediciones consistieron en realizar de 2 a 3 mediciones de tal forma que la lectura obtenida tuviera un error máximo de 1 mm (precisión máxima de la mira).

Debido a la amplitud de la red y la cantidad de montajes que se tienen en el laboratorio, fue necesario realizar 4 diferentes montajes del teodolito de tal forma que se cubriera la totalidad de los puntos de esta.

Las mediciones topológicas de la red incluyeron la medición de las tuberías del sistema y las tuberías de descarga de los diferentes componentes hidráulicos de la red. La medición se realizó utilizando la cinta métrica, midiendo 2 veces cada uno de los elementos de la red de tal forma que se obtuviera una mejor precisión, con un error permitido máximo de 1 mm.



**Figura 3 Mediciones topográficas de la Red Elevada (Prieto, 2011).**

### Mediciones Hidráulicas

Las mediciones hidráulicas de la red fueron la adquisición de los datos hidráulicos de la red, es decir, los datos referentes a la presión y los caudales del montaje. Debido a las características de la red, era posible obtener estos datos en tiempo real. Para las mediciones y con fines investigativos, se establecieron diversos escenarios, con el fin de calibrar un modelo computacional, estudiar el

comportamiento hidráulico bajo diferentes condiciones y finalmente para hacer un análisis sobre el estudio de sustancias.

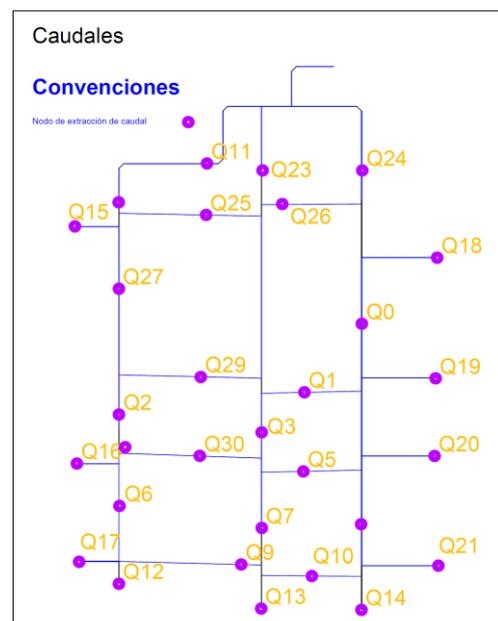
### Mediciones de Caudales

La recolección de caudales se basó en toma de caudales de forma electrónica en las tuberías con la utilización del caudalímetro electromagnético no intrusivo Ultraflux modelo UF801P. Por otro lado la medición de caudales se realizó utilizando los 31 puntos de extracción de caudales con válvula de bola de 2 pulgadas que tiene instalados la red de forma vertical. La medición de los mismos se realizó mediante aforos volumétricos utilizando baldes de 60 y 20 litros y cronómetros.



**Figura 4 Válvula de bola de la red elevada.**

El esquema de estos 31 puntos se muestra a continuación:



**Figura 5 Los 31 puntos de extracción de caudal de la Red Elevada (Prieto, 2011).**

En otras palabras, los caudales se obtuvieron midiendo los tiempos en que tardaba en llenarse el

balde. Para reducir los efectos de la altura de caída del agua y la turbulencia generada en el balde, la red acondicionó mangueras unidas a las válvulas de salida como se puede ver en la Figura 6



**Figura 6 Aforo de caudales de la Red Elevada (Prieto, 2011).**

Para que los datos tomados en la red fueran estadísticamente significativo y para tener mejor precisión en las medidas, se realizaron 10 mediciones de caudal en cada punto de extracción.

### Medición de Presiones

La medición de los puntos de presión de la red se realizó utilizando los 12 puntos ilustrados en Figura 2. En estos puntos se puede realizar la instalación de transductores. A nivel de laboratorio se contaba con 3 modelos, el MAN-SD2S B2 (Kobold), Vegabar 52 y el MAN LD3S (Kobold). Los dos primeros permitían obtener presiones de hasta 1 bar, y el último permitía medir presiones entre -1 y 5 bar.



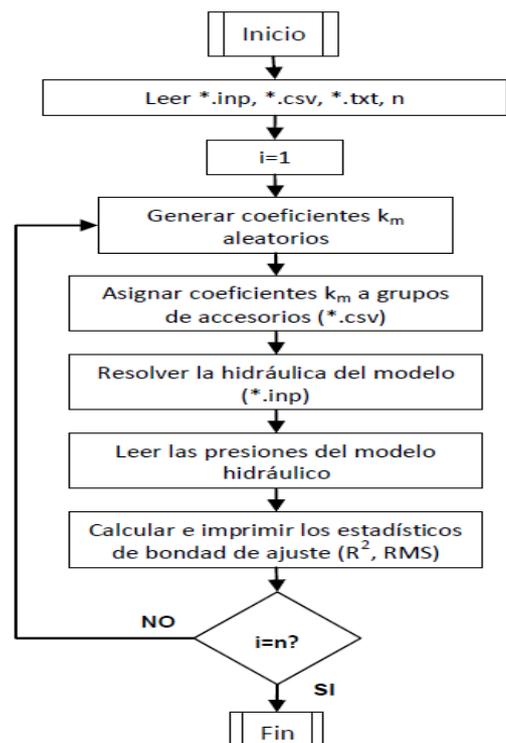
**Figura 7 Sensor de presión de la Red Elevada.**

A diferencia de las mediciones realizadas en los caudales, la medición de presiones fue por medio electrónico.

### Modelo Computacional

Se procedió a realizar un modelo de esta red usando el programa de EPANET 2.0. Este modelo sería usado posteriormente para realizar análisis de calibración hidráulica, de rugosidades y para ayudar a establecer los diferentes coeficientes de pérdidas menores asociados con los accesorios de la red. Es importante mencionar que este modelo debió ser calibrado realizando diversas pruebas en el modelo físico y verificando que los errores cuadráticos medios fueran muy bajos y la similitud entre los resultados reales y computacionales tuviera un mínimo de diferencia. Por otro lado, este modelo computacional también sirvió para establecer de forma efectiva el tiempo de medición de las sustancias en el modelo físico al correr varias ejecuciones en EPANET 2.0 y en el programa REDES.

Este último programa fue desarrollado por el CIACUA y es un programa que permite realizar cálculos hidráulicos (análisis estables y análisis en periodos extendidos), cálculos para el análisis de sustancias, crear y editar redes a presión bajo diferentes condiciones y diseñar bajo diferentes metodologías redes de distribución de agua potable. Por otro lado este programa ha sido utilizado en varias investigaciones y proyectos de grado tanto de pregrado como de maestría de la Universidad de los Andes.



**Figura 8 Esquema de calibración de coeficientes de pérdidas menores (Prieto, 2011).**

### Inyección y Medición de Sustancias

Como se mencionó previamente, la red elevada cuenta con una entrada para inyectar sustancias y ver su comportamiento en el modelo físico. La inyección de la sustancia (NaCl) se realizó diluyendo el cloruro de sodio en agua, con una concentración de 160 mg/L de tal forma que se asegurara una dilución total. La inyección se realizó utilizando simultáneamente 8 jeringas de 50 ml. Una vez inyectada la sustancia y como se mencionó anteriormente, se usó el modelo computacional calibrado para establecer los tiempos en que se debían realizar las mediciones. Con base a estos resultados se estableció que el tiempo de toma de muestras debía rondar alrededor de los 5 minutos (Prieto, 2011), y que la frecuencia de recolección debía de ser de 5 segundos en cada punto. Una vez realizada la toma de las muestras, se procedió a medir la concentración de la sustancia con el sensor de conductividad. Concluido el proceso anterior se compararon los resultados entre el modelo computacional calibrado previamente y las mediciones reales.



Figura 9 Inyección de sustancias en la red (Prieto, 2011).

### RESULTADOS

En esta sección se mostrarán los resultados de las investigaciones realizadas en el modelo físico en el año 2011. En principio se mostrarán los resultados hidráulicos y posteriormente se presentarán los resultados de análisis de sustancias.

#### Investigación del año 2011

La investigación realizada en el año 2011 por Juan Saldarriaga y César Prieto (Prieto, 2011), consistió

en calibrar un modelo matemático y en realizar un análisis del comportamiento hidráulico y de sustancias en una red de tuberías presurizadas.

### Resultados Hidráulicos

Como se mencionó previamente en la sección de metodología, se plantearon escenarios hidráulicos para probar la red. En este trabajo se crearon 6 diferentes escenarios. Dichos escenarios van a ser presentados a continuación:

#### Escenario 1

El primer escenario utiliza 7 puntos de salida de caudal (Q15, Q23, Q26, Q3, Q17, Q10, Q21) (ver Figura 5) y 4 válvulas cerradas. La presión de entrada al sistema es la máxima permitida por el montaje.

#### Escenario 2

Cuenta con las mismas características del Escenario 1, la única diferencia de este escenario es que la energía entrante al sistema es mucho menor ya que es regulada con una válvula. En la siguiente figura se muestra el esquema de los dos primeros escenarios:

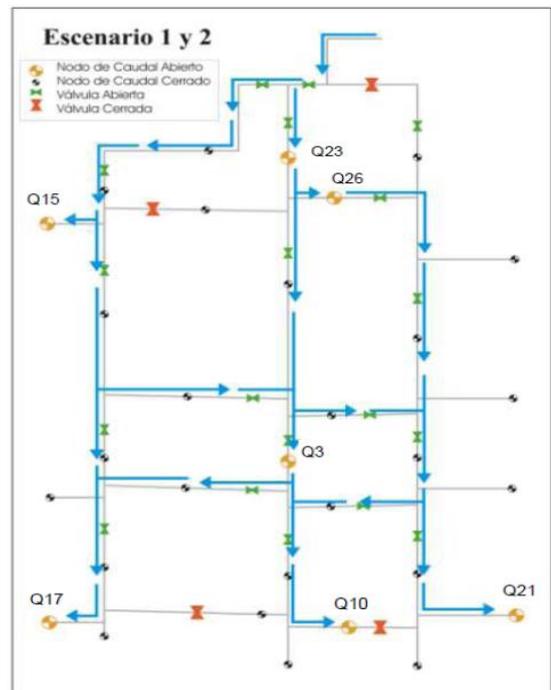
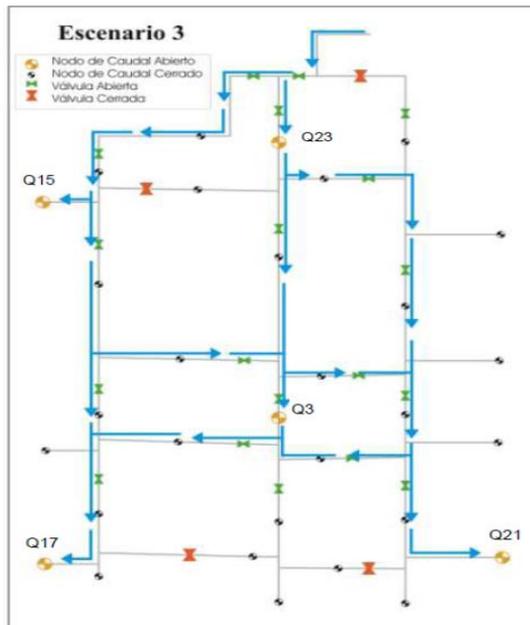


Figura 10 Esquema de los Escenarios 1 y 2 (Prieto, 2011).

#### Escenario 3

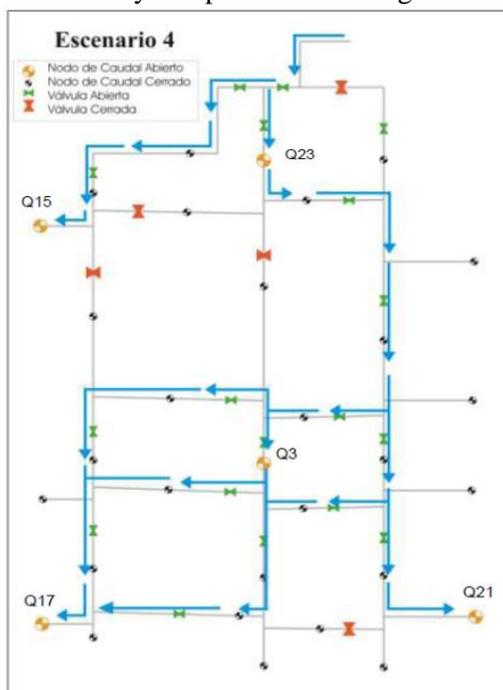
El Escenario 3 se planteó utilizando un esquema similar al utilizado en los dos primeros escenarios, con la excepción de que los nudos de salida Q10 y Q26 se cerraron.



**Figura 11 Esquema del Escenario 3 (Prieto, 2011).**

*Escenario 4*

Este escenario cuenta con los mismos puntos de salida de caudal que el Escenario 3, sin embargo, tiene cinco válvulas cerradas con el fin de estudiar caminos con mayores pérdidas de energía.

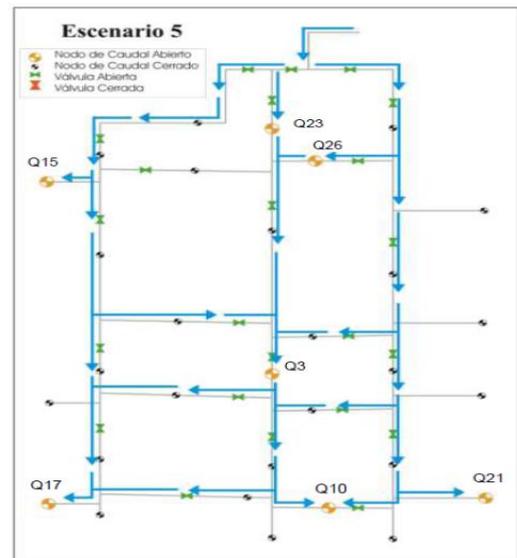


**Figura 12 Esquema del Escenario 4 (Prieto, 2011).**

*Escenario 5*

El Escenario 5 cuenta con los mismos puntos de salida que el Escenario 1, sólo que a diferencia de este escenario, ninguna de las válvulas se encontraba cerrada permitiéndole al agua seguir mucho más

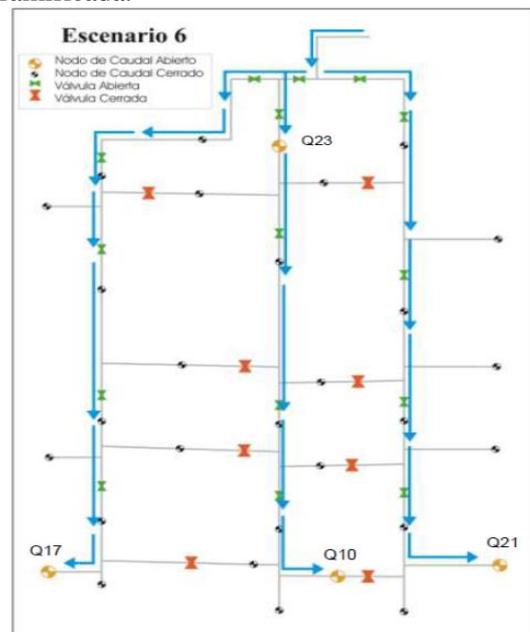
caminos. Este fue a su vez el escenario elegido para realizar la calibración del modelo matemático.



**Figura 13 Esquema del escenario 5. (Prieto, 2011).**

*Escenario 6*

Este escenario se diseño específicamente para obtener una situación controlada de transporte de sustancias (Prieto, 2011). Este escenario contaba con 4 nudos de salida de caudal (Q23, Q17, Q10, 21) y 8 válvulas cerradas de tal forma que se obtuviera una red ramificada.



**Figura 14 Esquema del Escenario 6 (Prieto, 2011).**

**Presiones y Caudales de los Diferentes Escenarios**

Las tablas y resultados que se muestran a continuación corresponden a las mediciones reales de caudales y presiones de acuerdo con lo explicado en la metodología.

**Tabla 1 Caudales medidos en los diferentes escenarios.**

[L/s]	Escenario					
	1	2	3	4	5	6
Q3	1.71	1.51	1.71	1.67	1.7	-
Q10	0.56	0.5	-	-	0.56	0.56
Q15	1.55	1.38	1.54	1.53	1.52	-
Q17	1.76	1.56	1.9	1.85	1.87	1.82
Q21	1.21	1.06	1.26	1.2	1.23	1.28
Q23	1.65	1.42	1.55	1.56	1.68	1.69
Q26	1.91	1.58	-	-	1.92	-
<b>Total</b>	<b>10.35</b>	<b>9.01</b>	<b>7.06</b>	<b>7.81</b>	<b>10.46</b>	<b>5.34</b>

Fuente: Prieto, 2011. Modificado por los Autores.

**Tabla 2 Presiones medidas en los diferentes escenarios.**

[m.c.a.]	Escenario					
	1	2	3	4	5	6
Presión A	4.16	3.27	4.30	4.31	4.15	4.41
Presión B	3.91	3.07	4.17	3.97	4.07	4.35
Presión C	4.07	3.20	4.26	4.31	4.02	4.37
Presión D	3.50	2.63	3.74	3.40	3.64	4.02
Presión E	4.00	3.07	4.16	3.85	4.08	4.41
Presión F	3.46	2.61	3.70	3.39	3.56	3.92
Presión G	3.43	2.58	3.66	3.35	3.52	3.95
Presión H	3.44	2.60	3.70	3.34	3.56	3.83
Presión I	3.29	2.46	3.51	3.20	3.42	3.71

Fuente: Prieto, 2011. Modificado por los Autores.

Una vez presentados estos datos, se procede a mostrar los resultados de la calibración del modelo matemático utilizando como base el Escenario 5.

**Tabla 3 Coeficientes de pérdidas menores después de realizar la calibración.**

Grupo Accesorios	Coefficiente $k_m$
Codo 2"	0.17763241
Codo 3"	0.0603514
Codo 4"	0.05219445
Tee 2"(Parte perpendicular)	0.17895198
Tee 3"(Parte perpendicular)	0.06919338
Tee 4"(Parte perpendicular)	0.05158503
Tee 2"(Parte recta)	0.19817837
Tee 3"(Parte recta)	0.15839834
Tee 4"(Parte recta)	0.07773844
Válvula 2"	0.01297492
Válvula 3"	0.03754198
Válvula 4"	0.06384079

Fuente: Prieto, 2011. Modificado por los Autores.

La Tabla 3, como se puede observar, presenta los resultados de los coeficientes de pérdidas menores con mejor bondad de ajuste para el cálculo hidráulico de la red. Así mismo se realizó un análisis de las rugosidades absolutas de la red.

**Tabla 4 Presiones medidas, presiones previas a la calibración y presiones posteriores a la calibración.**

[m.c.a.]	Escenario 5	MH $k_m = 0$	Calibración 5-1
Presión A	4.147	4.147	4.147
Presión B	4.071	4.099	4.082
Presión C	4.071	4.087	4.07
Presión D	3.639	3.573	3.551
Presión E	4.076	4.064	4.044
Presión F	3.557	3.619	3.594
Presión G	3.519	3.557	3.522
Presión H	3.557	3.583	3.551
Presión I	3.423	3.521	3.466

Fuente: Prieto, 2011. Modificado por los Autores.

En la tabla anterior la columna con el nombre Escenario 5, representa las presiones medidas en el modelo físico. La segunda columna con el nombre de MH (Modelo hidráulico)  $k_m = 0$  representa las presiones del modelo matemático sin calibrar, y finalmente la última columna se encuentra las presiones después de haber calibrado el modelo.

Posteriormente se realizó la validación del modelo con los diferentes escenarios. En las siguientes tablas se mostrarán los coeficientes de determinación y los errores cuadráticos medios.

**Tabla 5 Coeficientes de determinación.**

Escenario	$R^2$ MH $k_m = 0$	$R^2$ Calibración 5-1
Escenario 1	0.813	0.927
Escenario 2	0.839	0.928
Escenario 3	0.927	0.974
Escenario 4	0.524	0.782
Escenario 5	0.951	0.971
Escenario 6	0.920	0.923

Fuente: Prieto, 2011. Modificado por los Autores.

**Tabla 6 Errores cuadráticos medios.**

Escenario	RMS MH $K_m = 0$	RMS Calibración 5-1	% $\Delta$ RMS
Escenario 1	0.1232	0.0772	37.32%
Escenario 2	0.1070	0.0717	32.96%
Escenario 3	0.0723	0.0435	39.79%
Escenario 4	0.2518	0.1705	32.27%
Escenario 5	0.0569	0.0334	41.22%
Escenario 6	0.0715	0.0699	2.25%

Fuente: Prieto, 2011. Modificado por los Autores.

### Análisis de Sustancias

En esta investigación el análisis de sustancias se realizó en los Escenarios 1, 5 y 6. Como se describió anteriormente en metodología se utilizó el cloruro de sodio y los resultados de esta investigación se muestran a continuación. Los escenarios seleccionados para estas pruebas fueron escogidos por ser los escenarios que presentaron mejores coeficientes de determinación y menor error cuadrático medio, de tal forma que la prueba en el modelo computacional fuera lo más precisa posible. El modelo computacional de sustancias fue realizado utilizando el programa de EPANET 2.0 con la herramienta de MASS BOOSTER.

#### Escenario 1

En esta sección se mostrarán los resultados de algunos nodos del escenario, así como la concentración en el escenario temporalmente. En la Figura 6 se puede observar los resultados de la medición en el modelo físico (puntos rojos), el cálculo del modelo computacional sin calibrar (línea azul) y finalmente el modelo computacional calibrado (línea punteada negra). Así mismo como se puede ver en la Figura 14, los colores de las líneas representan las concentraciones del cloruro de sodio en cada uno de los nodos a través del tiempo.

En la Figuras 15, 16 y 17 se puede observar que el ajuste entre las mediciones reales y las simulaciones hidráulicas se ajustan bastante bien, a pesar de que existe una pequeña desviación entre los datos. Principalmente debido a las limitaciones computacionales del programa y a factores sin control a la hora de tomar los datos.

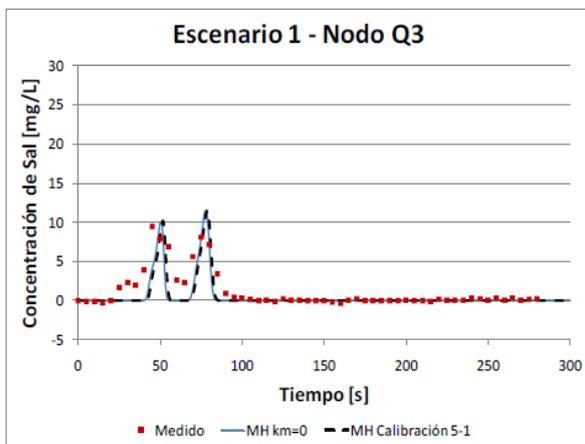


Figura 15 Concentración en el nodo Q3 del Escenario 1 (Prieto, 2011).

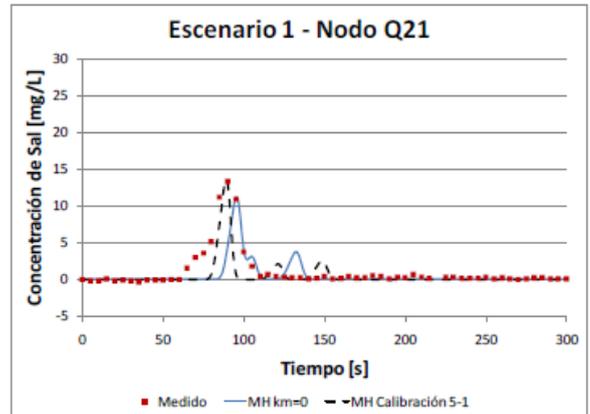


Figura 16 Concentración en el nodo Q21 del Escenario 1 (Prieto, 2011).

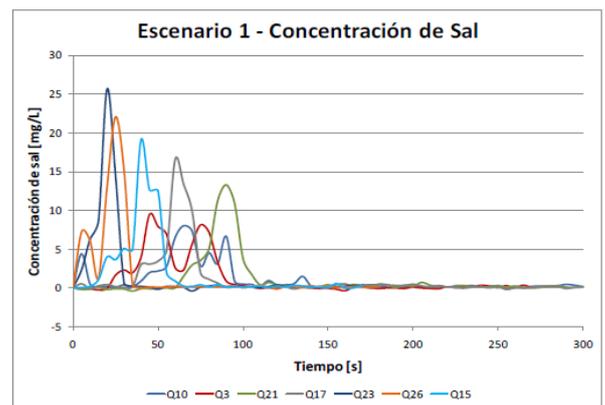


Figura 17 Concentración de la sal en los nodos del Escenario 1 (Prieto, 2011).

#### Escenario 5

Al igual que en el Escenario 1, se van a mostrar los resultados más importantes en cuanto al análisis de sustancias.

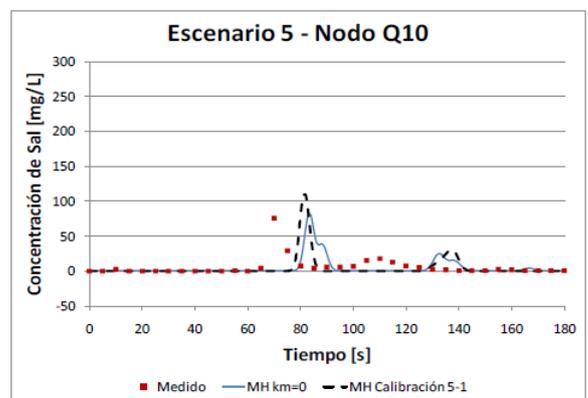


Figura 18 Concentración en el nodo Q10 del Escenario 5 (Prieto, 2011).

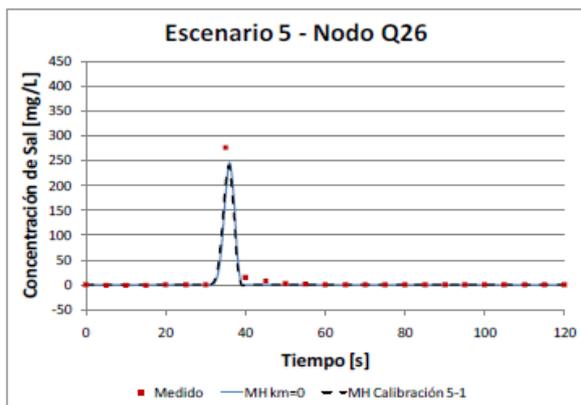


Figura 19 Concentración en el nodo Q26 del Escenario 5 (Prieto, 2011).

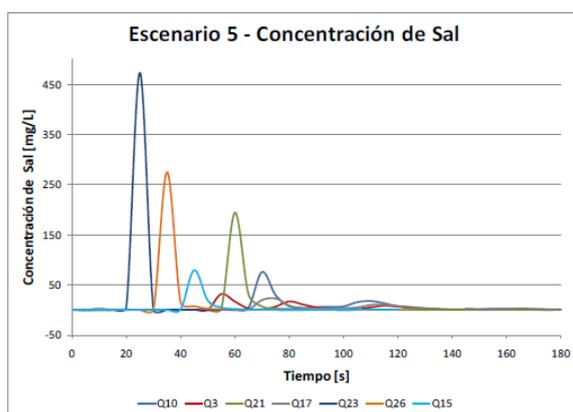


Figura 20 Concentración de la sal en los nodos del Escenario 5 (Prieto, 2011).

*Escenario 6*

Los resultados del Escenario 6 fueron:

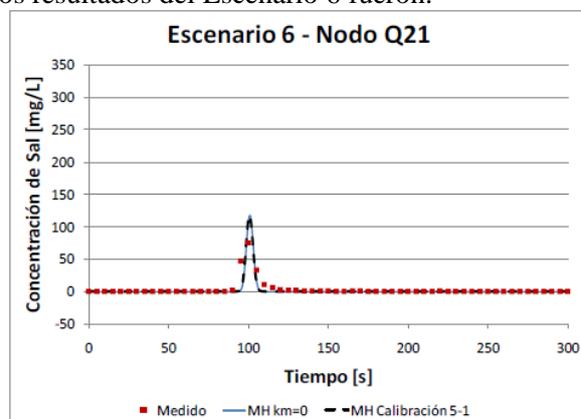


Figura 21 Concentración en el nodo Q21 del Escenario 6 (Prieto, 2011).

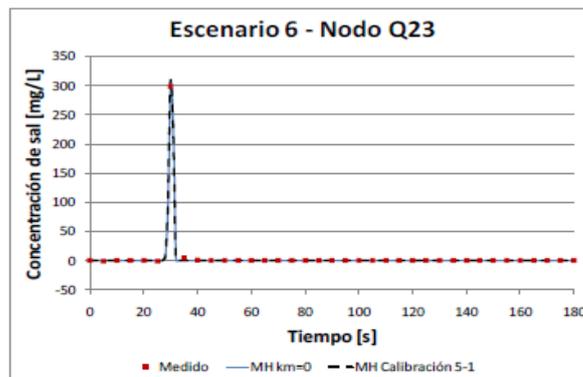


Figura 22 Concentración en el nodo Q23 del Escenario 6 (Prieto, 2011).

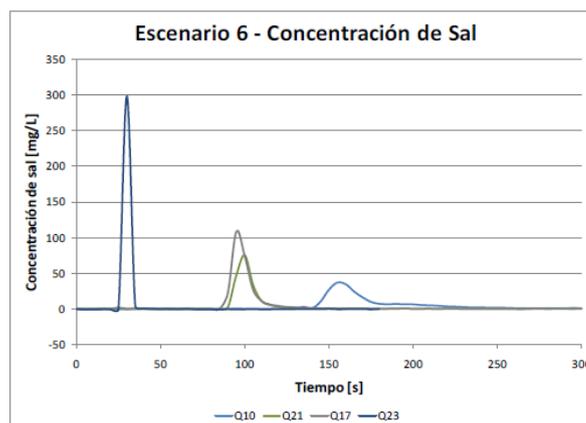


Figura 23 Concentración de la sal en los nodos del Escenario 6 (Prieto, 2011).

**ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Los resultados de las investigaciones muestran la utilidad del modelo físico como apoyo a la calibración de modelos hidráulicos computacionales, no solo por los coeficientes de determinación obtenidos sino por lo bajo de los errores cuadráticos medios. Esto se puede observar claramente en la Fuente : Prieto, 2011. Modificado por los Autores.

Tabla 6 y en la Tabla 5, donde se puede ver que los coeficientes de determinación se encuentran en su mayoría por encima de 0.92 salvo un escenario que se encuentra alrededor de 0.78 y al observar los errores cuadráticos medios estos no superan un error de 0.11.

Así mismo es importante resaltar la utilidad del modelo para estudiar el comportamiento de las sustancias en redes de distribución de agua potable, así como su utilidad para verificar la veracidad de modelos computacionales. Como se puede ver en los resultados de análisis de sustancia, es posible observar que al tener un modelo físico que ayude a calibrar un modelo computacional, se pueden obtener excelentes resultados de calidad del agua.

Cuando se observa la Figura 16 alrededor del tiempo 150 se puede ver una desviación entre los

datos simulados y los datos medidos en el modelo físico. Las razones de esta desviación son las mismas a las que se presentaron posteriormente en la Figura 20. Pese a esto, y como se analizara más adelante, el ajuste que se presenta es bastante satisfactorio con respecto a los datos medidos en el modelo.

Analizando los resultados de la Figura 20, se puede observar que aún el modelo no calibrado representa muy bien el comportamiento del cloruro de sodio en la red. Si bien existen puntos donde no coinciden de forma exacta, en términos generales los resultados son bastante precisos y las pocas desviaciones se debieron principalmente a la toma de datos en el modelo físico, que al requerir un intervalo de tiempo tan corto, generó un error sistemático.

Por otro lado al ver los resultados de las Figuras 15, 19, 21,22 se puede ver que la desviación encontrada entre las mediciones reales y las simulaciones con el modelo computacional son bastante bajas, en estos caso se ve que con la ayuda del modelo físico se logró obtener una representación adecuada del fenómeno y al tener este modelo calibrado y validado, este tipo de simulaciones se pueden extender a diferentes escenarios hidráulico con el fin de estudiar de forma más detallada el fenómeno.

Otro resultado a resaltar de la Red Elevada, es su utilidad para ayudar a determinar con gran precisión coeficientes de pérdidas menores. Al estar esta red compuesta por la mayoría de accesorios utilizados en redes reales, los estudios que se pueden realizar bajo condiciones reales son bastante amplios y utilizados en otro tipo de investigaciones.

## **CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO**

Se puede concluir que la red elevada como modelo físico es una gran herramienta para representar las diferentes situaciones hidráulicas que se pueden presentar en una red de distribución de agua potable, no solo en la parte hidráulica (medición de presión, caudales y calculo de coeficientes), sino como una herramienta para calibrar modelos matemáticos y el estudio de sustancias.

El análisis de las sustancias permite observar que al utilizar un modelo físicos como lo es la Red Elevada, facilita en gran medida estudiar el comportamiento de las sustancias, no solo porque permite calibrar con mucha más precisión un modelo matemático como el presentado en este artículo.

Los resultados satisfactorios de la investigación, permiten concluir que la utilización del modelo como medio de calibración computacional, estudio de sustancias y simulación de situaciones reales es vital y un gran apoyo a métodos investigativos y de docencia, de tal forma que los estudiantes e investigadores pueden comprender de forma directa el comportamiento hidráulico y los fenómenos relacionados con las reacciones de sustancias en redes presurizadas.

El hecho de poder medir caudales y presiones con gran exactitud permite simular diferentes escenarios de redes reales y estudiar los efectos hidráulicos bajo modificaciones físicas del modelo y bajo escenarios de inyección de sustancias.

Al ser una red con equipos de medición modernos, dichos equipos facilitan en gran medida el manejo de la información de tal forma que esta se obtenga con gran exactitud y al ser una red conectada a la red de la universidad, esto permite que estos datos se transmitan rápidamente a cualquier equipo ya sea para su procesamiento investigativo o como herramienta para mostrar en sesiones docentes.

Los trabajos futuros, deben ser enfocados en estudiar condiciones especiales de redes y el trato de sustancias reales de la redes de abastecimiento como lo son los desinfectantes inyectados en los procesos de potabilización, o el estudio de marcadores que permitan investigar más el fenómeno de mezcla completa en las redes de distribución de agua potable.

Por otro lado se recomienda que las futuras investigaciones se enfoque en estudiar las operaciones reales que ocurren en las redes de distribución de agua potable. Es decir, que se estudien los efectos de cerrar válvula o estructuras de la red con el fin de estudiar más a fondo el comportamiento hidráulico de la red.

Finalmente es importante buscar nuevos escenario con mejores indicadores de ajuste de tal forma que las investigaciones que se realicen en la Red Elevada no se limiten a solo 3 escenarios.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- Mays, L. W. (2002). Manual de sistemas de distribución de agua: MCGRAW-HILL.
- Prieto, C. M. (2011). Modelación física y calibración de sustancias en redes de distribución de agua potable. Experimental, Universidad de los Andes Bogotá.

Saldarriaga, J. G. (2009). Hidráulica de Tuberías  
Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos (3  
ed.). Bogotá, D.C: Alfaomega.