

DOI: 10.24850/j-tyca-2021-04-01

Artículos

**Modelación hidráulica y calibración de redes de
distribución de agua potable**

**Hydraulic modeling and calibration of drinking water
distribution networks**

Walter Rodríguez-Procel¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9194-6066>

Holger Benavides-Muñoz², ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7075-0905>

¹Magister en Recursos Hídricos, Universidad Técnica Particular de Loja, San Cayetano Alto, Loja, Ecuador, wirp.civil@hotmail.com

²Recursos Hídricos, Departamento de Geología, Minas e Ingeniería Civil (DGMIC), Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador, hmbenavides@utpl.edu.ec

Autor para correspondencia: Holger Benavides-Muñoz,
hmbenavides@utpl.edu.ec

Resumen

El objetivo del estudio fue modelar y analizar tres redes de distribución de agua potable; calibrarlas con el *software Epanet Calibrator*, y comparar sus resultados con *Darwin Calibrator*. Se utilizaron un caudalímetro ultrasónico y *data loggers* de presión que fueron configurados para registrar datos cada diez minutos; se obtuvo la media de los caudales en cada nudo de interés de la red. Se utilizaron los datos de presión para ajustar cada red; al variar rugosidades se pudo calibrar y ajustar el modelo entre lo simulado matemáticamente con los datos obtenidos en campo. Mediante esta información se establecieron ecuaciones y curvas de calibración para discriminar la discrepancia entre lo modelado y lo observado en campo. Las calibraciones hidráulicas se hicieron mediante las fórmulas de Darcy-Weisbach y Hazen-Williams. Los resultados muestran para cada red una variación en las calibraciones del 35, 15 y 10 %. Se concluye que estas dos aplicaciones computacionales arrojan resultados similares entre los datos de lo simulado y lo observado con la diferencia de que la calibración en *Epanet* se hace nudo por nudo, mientras que en *Darwin Calibrator* puede efectuarse mediante grupos de calibraciones en un determinado sector.

Palabras clave: redes hidráulicas, calibración, algoritmos genéticos, simulación hidráulica, análisis de red.

Abstract

The objective of the study was to model and analyze three drinking water distribution networks, calibrate them with Epanet Calibrator software and compare their results with Darwin Calibrator. An ultrasonic flowmeter and

pressure data loggers were used, which were configured to record data every ten minutes, the mean of the flows at each node of interest in the network was obtained. The pressure data was used to adjust each network and by varying the roughness, the model could be calibrated and adjusted, among those mathematically simulated with the data obtained in the field. Using this information, equations and calibration curves were established to discriminate the discrepancy between what was modeled and what was observed in the field. Hydraulic calibrations were performed using the Darcy-Weisbach and Hazen-Williams formulas. The results show for each network a variation in the calibrations of 35, 15 and 10 %. It is concluded that these two computational applications show similar results between the simulated and observed data, with the difference that calibration in Epanet is carried out node by node, while in Darwin Calibrator it can be performed by means of groups of calibrations in a given sector.

Keywords: Hydraulic networks, calibration, genetic algorithms, hydraulic simulation, network analysis.

Recibido: 31/12/2018

Aceptado: 27/08/2020

Introducción

Los modelos matemáticos, así como los computacionales aplicados a los sistemas de distribución de redes de agua han alcanzado una gran aceptación por parte de la comunidad científica, convirtiéndose en una herramienta fundamental para el diseño y la gestión de los mismos (Bosch-Fuentes & Recio-Villa, 2014) al permitir una representación veraz en el espacio y tiempo de lo que ocurre en el proceso (Pérez-Arellano, Roldán-Cañas, Moreno-Pérez, & García-Alcubierre, s.f.). La American Water Works Association (AWWA) explica que la calibración consiste en una comparación del modelo final con las mediciones obtenidas en el campo, realizando ajustes en los parámetros de la red (Martínez-Solano, Iglesias-Rey, & Molina-Arce, 2015), con la finalidad de proporcionar registros específicos de presiones en nudos, velocidades y caudales a lo largo del periodo de simulación (Bartolín-Ayala & Martínez-Alzamora, 2013). Estas calibraciones determinan características físicas y operacionales de un sistema, que al ingresar la información al modelo computacional proporcionen resultados realistas (Iglesias-Rey, Martínez-Solano, & Ribelles-Aquilar, 2017).

Saldarriaga y Jurado (2008) consideran que la calibración consiste en hallar un modelo hidráulico que precise los datos de la red existente, con el objetivo de usar el modelo de forma exitosa. Morelos y Ramírez-Hernández (2017); Walski, DeFrank, Voglino, Wood y Whitman (2006)

expresan que en una simulación hidráulica de una red de agua potable construida es necesario investigar todas las variables características de la red, como su topología, nodos de demanda, rugosidad en tuberías y presiones, para poder obtener un resultado confiable en la zona de estudio.

En muchas ocasiones, la calibración de un sistema de distribución de agua potable dificulta resolver analíticamente todos los parámetros del sistema hidráulico, pues cuenta con una gran cantidad de incógnitas, como la rugosidad y el coeficiente de emisor (Guerrero-Angulo & Arreguín-Cortés, 2002; Wu *et al.*, 2002). Los primeros métodos para calibrar modelos a menudo utilizaron un enfoque donde el número de incógnitas (rugosidad y coeficiente de emisor) coincidían con el número de observaciones para que una solución pudiese ser determinada (Ormsbee, 2006). Esto requiere de un análisis exhaustivo para determinar la forma de agrupar la cantidad de incógnitas que una red pudiese tener. Por lo tanto, se necesitaba usar de alguna manera la optimización en modelos hidráulicos para no resolver una cantidad extensa de ecuaciones igual al número de incógnitas (Walski *et al.*, 2006).

Bentley (2008), en su página, hace una comparación entre la eficiencia de estos dos programas y menciona que la metodología en la que se basan es la del cálculo denominado gradiente conjugado con base en los algoritmos genéticos, como también lo describen Datta y Sridharan (1995); Walski *et al.* (2006), y Wu *et al.* (2002). *Darwin Calibrator* tiene un *software* de sistema integrado con tres partes: un módulo de algoritmo genético, un módulo de simulación hidráulica y un módulo de calibración.

Ormsbee (2006), y Ormsbee y Lingireddy (1997) aplicaron la optimización para calibrar los modelos de sus redes hidráulicas. Por otra parte, Lansey y Basnet (1991) desarrollaron un modelo de optimización que podría coincidir con el campo de observaciones, pero señalaron que se necesitaban cantidades suficientes de datos de alta calidad para que funcionara bien. Esto coincidió con la observación de Walski (1983), y Wu, Arniella y Gianella (2004) de que se necesita una pérdida de carga suficiente en el sistema para que funcione la calibración automática, que se ilustró con éxito en un sistema de muestra (Walski *et al.*, 2006).

La modelación y calibración de redes de distribución de agua a presión y flujos de tuberías en *Epanet* se utiliza como herramienta fundamental para la mejora de la gestión, operación y mantenimiento del sistema de abastecimiento de agua (Alves, Muranho, Albuquerque, & Ferreira, 2014; Anisha, Kumar, Ashok-Kumar, & Suvama-Raju, 2016; Koppel & Vassiljev, 2012; Murray, Walsh, Kelliher, & O'Sullivan, 2014). Estas simulaciones hidráulicas permiten que sean más confiables y válidas, con datos acertados que se asemejen a la realidad para la toma de decisiones de presión en nudos de la red (Alves *et al.*, 2014; Bosch-Fuentes & Recio-Villa, 2014). *Epanet* ejecuta simulaciones en el comportamiento hidráulico en periodo extendido y de la calidad de agua en redes a presión, con una aplicación amplia de muestreo, calibración de modelos, análisis del cloro y la valoración del riesgo a que se encuentran involucrados los consumidores (Abdy-Sayyed, Gupta, & Tanyimboh, 2014; Agency, 2000; Pacchin, Alvisi, & Franchini, 2017); compara resultados de simulación hidráulica, respecto a la información de campo mediante curvas de evolución e informes de calibraciones, en los cuales

se analiza la variación de presiones en diferentes nudos de la red (Agency, 2000; Escobar, 2010; Pacchin *et al.*, 2017). Los problemas de calibración están formulados como una optimización de objetivos, donde el modelo estima parámetros de la red de distribución, minimizando la desviación cuadrada entre los datos observados y los simulados (Dunca, Piraianu, Roman, Ciuc, & Georgescu, 2017).

El objetivo principal del estudio fue modelar la red y calibrarla usando el programa computacional *Epanet Calibrator* y comparar sus resultados con *Darwin Calibrator*, que es otra aplicación informática utilizada para la modelación (Iglesias-Rey *et al.*, 2017; Murray *et al.*, 2014) de redes de distribución de agua potable, mediante la modelación estática y dinámica; analizar sus variables, y encontrar la respectiva rugosidad que con el pasar del tiempo aumenta por el deterioro de la tubería (Bartolín-Ayala & Martínez-Alzamora, 2013).

El estudio de la calibración se llevó a cabo en tres ciudades del Ecuador, dos redes en la zona norte y una red en la zona sur del país. Los datos usados en este estudio fueron de presión y caudal, que fueron tomados en diferentes puntos de cada red.

Materiales y métodos

Para la obtención de los resultados de presiones se utilizó un registrador automático del tipo data logger IP68 Lolog, con una capacidad para almacenar 16 000 lecturas, diseñado para supervisar presión. Para obtener los valores de caudal se usaron sensores de un equipo electrónico del tipo “doppler flowmeter” portátil de doble frecuencia no invasivo, con el que se registró el flujo de la red en cada sector de estudio.

El caudalímetro fue configurado para registrar datos cada 10 minutos (Muniz *et al.*, 2015); se obtuvo la media de los caudales en cada nudo de la red. Se utilizaron los datos de presión para ajustar la red, y variar las rugosidades para calibrar y obtener el valor deseado en lo simulado con lo obtenido en campo.

La aplicación informática de *Epanet Calibrator* fue creada para calibrar modelos hidráulicos (Agency, 2000; Iglesias-Rey *et al.*, 2017; Muranho, Ferreira, Sousa, Gomes, & Marques, 2014). El uso fue esencial para el procesamiento de la información obtenida en mediciones de campo. El sistema computacional permitió la estimación de rugosidades de la tubería y coeficientes del emisor nodal por grupo de tuberías que son definidas por el usuario al momento del análisis de la calibración para poder llegar al ajuste deseado. Los datos observados consisten en la presión (Abe & Cheung, 2010).

Darwin Calibrator proporciona calibraciones tentativas, apoyada en un conjunto de datos de campana múltiples, trae la velocidad y la eficacia de algoritmos genéticos a la calibración de su sistema hidráulico y presenta varias alternativas de calibraciones que considera el programa para la optimización del sistema. El calibrador de Darwin puede configurar

una serie de calibraciones que pueden tener numerosos resultados con diferentes patrones y escenarios en el estudio (Hooda & Damani, 2017).

Datos y área de estudio

El área de estudio se ubica en tres ciudades del Ecuador: Loja, Ibarra y Quito, donde se abastecen con sistemas de distribución de agua urbana, delimitadas por redes aisladas topológicamente o por válvulas de frontera operados como sectores hidrométricos, donde se facilita la medición del caudal inyectado y las presiones de servicio. Para efecto de este estudio, las zonas se identifican como sector 1, sector 2 y sector 3, respectivamente. Estas ciudades andinas se caracterizan por su zona montañosa muy irregular, lo cual es necesario tomar en consideración, para no interferir en el resultado final de la calibración (Saldarriaga & Jurado, 2008).

Sector 1

Cuenta con 111 nudos y 92 tuberías. La línea hidráulica que se conecta desde la red matriz hasta el depósito principal en su mayor trayectoria es una tubería de fundición dúctil (FD) de 100 mm de diámetro y llega al reservorio con tubería de polipropileno (PPR) de 90 mm.

La calibración en Epanet se hizo con base en la presión tomada en cada nudo de la red de abastecimiento. Este sector se abastece desde el sistema de suministro público del plan maestro de agua potable — gestionado por la Unidad Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Loja (UMAPAL)— con una línea matriz de polietileno de 300 mm de diámetro y a una profundidad promedio de 1.70 metros.

El nudo de almacenamiento principal (depósito superior) de la red de distribución de agua potable del sector en estudio está ubicado en la cota 2 156 msnm, con una capacidad de almacenamiento de 100 m³, que regula la inyección hacia la red que abastece, como se muestra en la Figura 1.

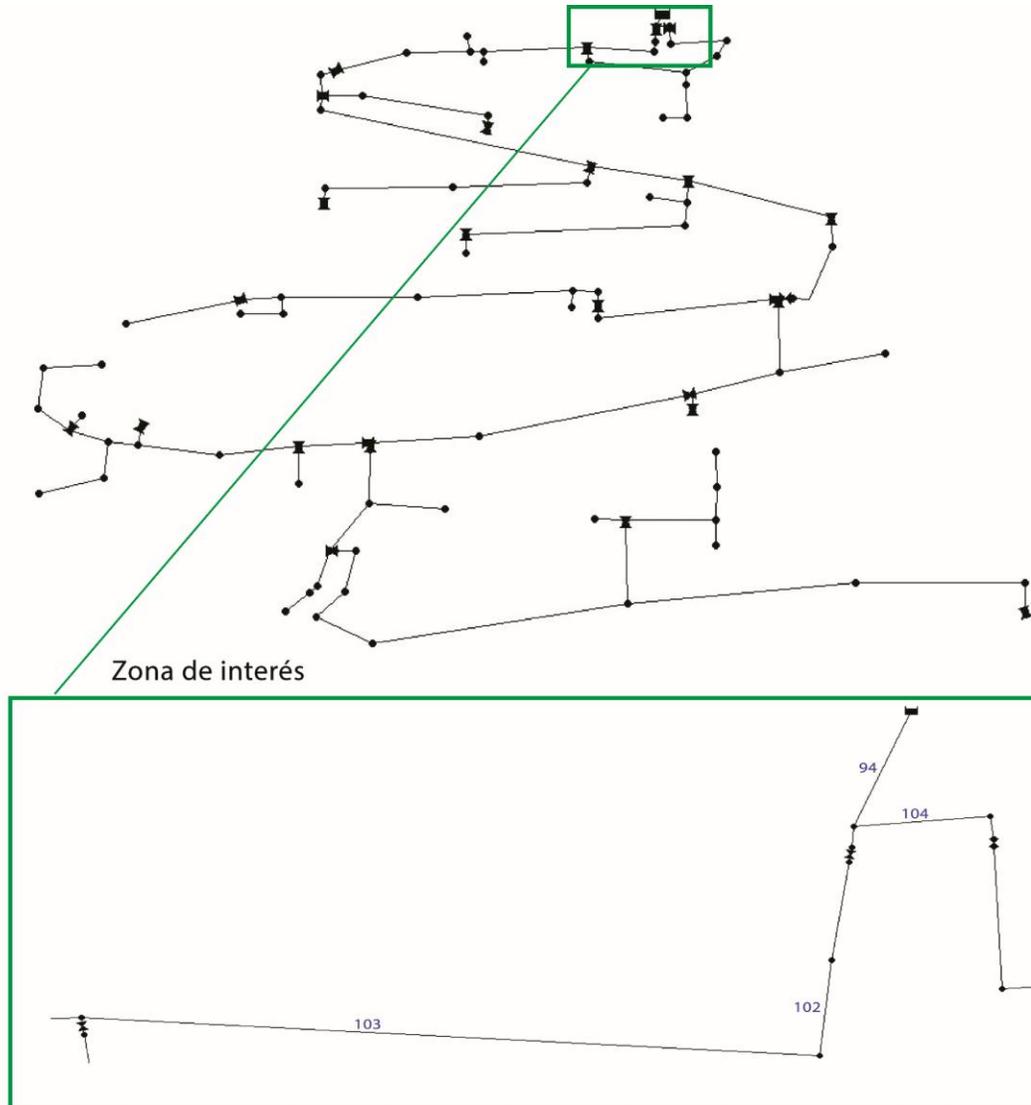


Figura 1. Gráfico de la red de distribución del sector 1.

Sector 2

El sector 2 es abastecido por un tanque de reserva, que es alimentado desde la planta de tratamiento principal mediante una tubería de derivación.

El sector 2 cuenta con 629 nudos y 811 tuberías, y comprende un área de 82 hectáreas. Esta red hidrométrica abastece a 3 651 usuarios del sector, con un caudal medio de 11.7 litros por segundo. El material de las tuberías para la distribución de agua potable es de PVC (policloruro de vinilo) y su longitud es de 8 151 m, con diámetros que varían entre mínimo 40 mm y máximo 110 mm. Los habitantes del sector utilizan el agua potable distribuida por EMAPA (Empresa de Agua Potable y Alcantarillado), que brinda servicio de agua potable durante las 24 horas del día a todo el sector. Cuenta con una presión mínima, promedio y máxima de 1.46, 28.00 y 62.65 metros de columnas de agua, respectivamente. La calibración en *Epanet* se hizo con base en la presión tomada en cada nudo de la red de abastecimiento. En la Figura 2 se muestra la red hidrométrica del sector 2.

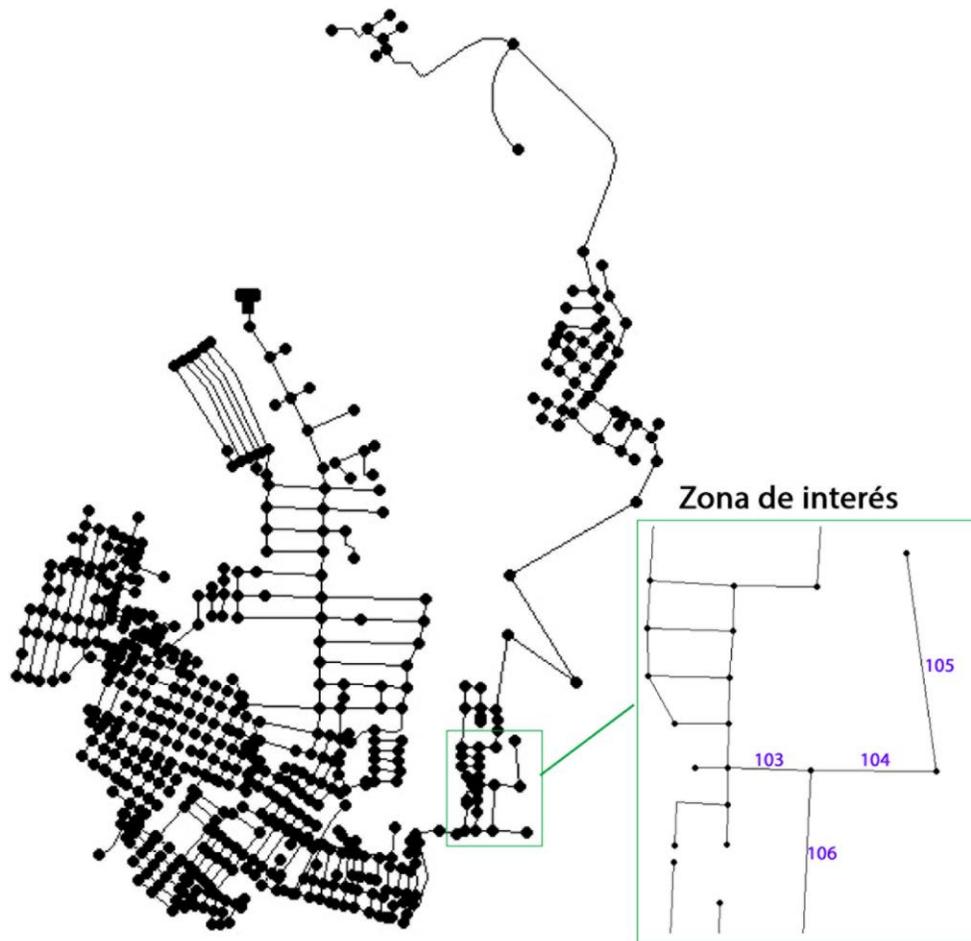


Figura 2. Gráfico de la red de distribución del sector 2.

Sector 3

Los habitantes del sector utilizan el agua de EPMAPS (Empresa Pública Metropolitana de Agua Potable y Saneamiento), que abastece una superficie de 73.6 hectáreas.

Como se observa en la Figura 3, esta red hidrométrica cuenta con 83 nudos y 94 tuberías de PVC, que van desde 7.5 mm hasta 300 mm de diámetro. El caudal máximo, medio y mínimo van desde los 13.93, 8.38 y 4.52 m³/s, respectivamente.

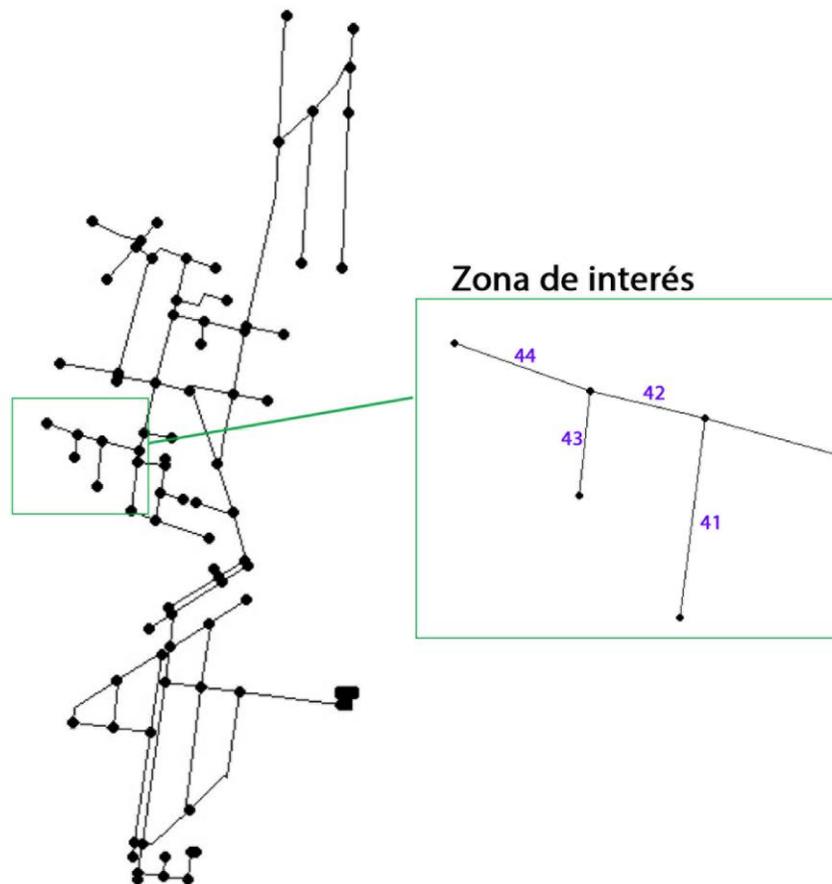


Figura 3. Gráfico de la red de distribución de agua del sector 3.

Estimación de parámetros

La estimación de los parámetros del sistema se determina por la desviación mínima entre los valores simulados y los valores observados en condiciones variables de tiempo. Esta estimación de parámetros ha sido formulada matemáticamente por la teoría estadística de regresión (Abe & Cheung, 2008; Abe & Cheung, 2010; Jorgensen, 1983):

$$y = f(\beta) + \epsilon \quad (1)$$

En la Ecuación (1), y representa los valores observados; $f(\beta)$, la estimación del modelo de y ; β , el parámetro del modelo vector, y ϵ es el vector de error de medición aleatoria. Estas ecuaciones son las que el programa *Epanet* utiliza internamente para el análisis (Martínez-Solano *et al.*, 2015). La maximización de probabilidades (Ecuación (2)) proporciona un argumento de problemas de mínimos cuadrados (Abe & Cheung, 2010; Iglesias-Rey *et al.*, 2017):

$$\text{Máx}L(\beta) = \text{mín} \frac{1}{2}(y - f(\beta))^T C d^{-1}(y - f(\beta)) \quad (2)$$

El problema de la estimación de parámetros es determinar los valores óptimos de rugosidades y coeficientes de emisor de un sinnúmero de observaciones en el campo (Abe & Cheung, 2008; Iglesias-Rey *et al.*, 2017). El enfoque de los mínimos cuadrados se usa para representar la desviación de los valores simulados con los observados, donde se le puede expresar con la Ecuación (3):

$$Min = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\Delta P_i}{\frac{\sum_{i=1}^N P_i}{N}} \right] + \sum_{j=1}^M \left[\frac{\Delta Q_j}{\frac{\sum_{j=1}^M Q_j}{M}} \right] \quad (3)$$

En la Ecuación (3), P_i' (metros de columna de agua) y Q_j' (litros por segundo) representan los valores de presión y caudal, respectivamente. ΔP_i es la diferencia de presión entre los datos simulados y los registrados en campo; ΔQ_j , la diferencia del flujo entre los datos simulados y los observados; N , la cantidad de nudos, y M es el número de tuberías monitoreadas.

Los dibujos de las redes de distribución de agua sectorizadas fueron exportadas del *AutoCAD* (Autodesk, 2010) a un archivo con formato .DXF; después tales archivos digitales fueron importados desde el *Darwin Calibrator* (Alves *et al.*, 2014; WaterGEMS, 2009), aplicación informática donde se realizaron los análisis hidráulicos con sus respectivas calibraciones. Culminado con este paso, el archivo resultante de cada sector se guardó en formato de archivo digital “.INP” para poderlo

importar desde *Epanet 2.0* y así realizar el respectivo análisis hidráulico comparativo.

Se adoptaron las dimensiones de diámetro, longitud y otros parámetros característicos que representan a cada sector investigado para someterlas al análisis respectivo en los módulos de calibración tanto de Darwin como de *Epanet Calibrator* (Boczar, Adamikiewicz, & Włodzimierz, 2017). Con los primeros resultados del análisis se ingresaron los datos de presiones obtenidos con sensores en los nodos de interés para la calibración respectiva. Para optimización de los tiempos de calibración se creó un archivo de texto en el que se organizaron las presiones de cada nodo de cada red para facilitar el ingreso de la información en *Epanet* (Abdy-Sayyed *et al.*, 2014; Gençoğlu & Merzi, 2017).

Validación

La modelación en *Epanet Calibrator* se llevó a cabo de la misma manera que en *Darwin Calibrator*, para así validar los resultados de la simulación del sistema hidráulico en ambas herramientas de calibración.

Darwin Calibrator es el programa de algoritmo genético que permite calibrar un modelo de distribución de agua con condiciones prácticas que

incluyen la combinación y agregación de los parámetros del modelo en múltiples condiciones de carga de demanda, con varios escenarios de límites y fronteras del sistema, ajuste manual y con análisis de sensibilidad de las soluciones de calibración (Abdy-Sayyed *et al.*, 2014; Walski *et al.*, 2006; WaterGEMS, 2009). El Calibrador de Darwin utiliza un enfoque de algoritmo desarrollado por Wu *et al.* (2002), y Wu, Walski, Naumick, Dugandzic y Rob (2005).

Una vez que se construyó el modelo de un sistema de distribución de agua, se ingresaron los datos de campo; luego se decidieron los parámetros que se pueden ajustar para lograr la calibración y cualquier condición de contorno asociado con el sistema en el momento en el que se recopilaron los datos de campo, como flujos, alturas de la línea de gradiente hidráulico (LGH), condiciones de contorno relacionadas con los niveles de agua en depósitos y el estado operacional de las válvulas (Wu *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2005).

Darwin Calibrator tiene un modelador para seleccionar tres tipos de combinaciones en cada modelo, con parámetros como la rugosidad de la tubería en función de las ecuaciones de pérdida de carga de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach y Chézy-Manning (Walski, Wu, & Hartell, 2012; Wu *et al.*, 2004), métodos de cálculo de las pérdidas de carga que también los dispone *Epanet Calibrator* (Abe & Cheung, 2010; Agency, 2000; Iglesias-Rey *et al.*, 2017; Waikhom & Mehta, 2015).

Las tuberías de cada sector se agruparon por el tipo de material, en tuberías de polietileno y de asbesto cemento, para así obtener un único enlace de calibración, al que se le asigna un nuevo coeficiente de

rugosidad establecido a todos los tubos en el mismo grupo. Las uniones que tienen patrones semejantes de demanda y dentro de una misma superficie topológica también se agregaron como una unión de calibración, para que se calcule con un mismo factor de demanda. Los parámetros de calibración son delimitados por las fronteras (superior e inferior) señaladas en los patrones en la red.

Valor incremental

Para este caso, un valor de Hazen William "coeficiente C" para una tubería o un grupo de tuberías se computará dentro de un rango de un mínimo de 40 y un máximo de 140, con un incremental de cinco (5). El multiplicador de demanda puede variar de 0.8 a 1.2 y aumenta en 0.1 (Wu *et al.*, 2004).

La exactitud de las soluciones obtenidas mediante algoritmos genéticos se cuantifica usando lo que se llama "aptitud" de las soluciones. La aptitud se basa en la diferencia entre los valores observados y simulados para la línea de grado hidráulico y flujo (Walski *et al.*, 2006). Normalmente hay tres métodos para calcular la aptitud: mínimos cuadrados, valor de diferencia absoluta mínima y error máximo mínimo. El método utilizado en este trabajo es el de mínimos cuadrados, donde la aptitud se determina con la Ecuación (4):

$$F = \frac{1}{W_h} \sum (H_{mod} - H_{obs})^2 + \frac{1}{W_q} \sum (Q_{mod} - Q_{obs})^2$$

(4)

Donde F es la aptitud del modelo o resultado; H_{mod} , el valor simulado de la carga hidráulica o altura piezométrica; H_{obs} , el valor observado de la carga hidráulica o altura piezométrica; Q_{mod} , el valor simulado del caudal; Q_{obs} , el valor observado del caudal; W_h , el factor ponderado de la carga hidráulica o altura piezométrica, y W_q es el factor ponderado del caudal. Esta expresión matemática de mínimos cuadrados es considerado por *Darwin Calibrator* para la calibración de redes (Walski *et al.*, 2006).

En este trabajo se realizó un conjunto de mediciones de presión distribuidas en todo el sistema y se registró el flujo de la tubería principal. Los factores de rugosidad para los tubos de la red se estiman inicialmente como un valor de las rugosidades de Darcy-Weisbach de 0.0250 mm (Wu & Clark, 2008; Wu *et al.*, 2002). Para poder calcular el estado físico de la red se utiliza la fórmula del error mínimo cuadrado y la ponderación dada de la carga de altura piezométrica (García-Alcaraz & Castillo-Elsitdié, 2006).

Tanto *Darwin Calibrator* como *Epanet Calibrator* funcionan con algoritmos genéticos (Abe & Cheung, 2008; Iglesias-Rey *et al.*, 2017; Pérez, Sanz, Cugueró, Blesa, & Cugueró, 2015). El proceso de calibración que mediante iteraciones realiza cada programa permite encontrar la solución óptima de las redes de agua estudiadas. *Darwin Calibrator* tiene

una particularidad “favorable”, pues muestra tres soluciones óptimas posibles, que se pueden adaptar en la calibración de las tuberías. Para el caso de *Epanet*, la calibración es manual, por lo que se dificulta el proceso de aproximación del valor de la rugosidad, llegándose a sobreestimar o subestimar este valor para el ajuste, como lo mencionan Bentley Systems, I. (2005), WaterGEMS (2009) y Wu *et al.* (2004).

Resultados

Sector 1

La calibración hidráulica fue realizada mediante la fórmula de Darcy-Weisbach, y a partir de la presión tomada en diferentes nodos (Figura 1). El factor de rugosidad para el análisis se estimó inicialmente como 0.0250, mientras que la calibración realizada por *Darwin Calibrator* muestra dos soluciones con un aumento promedio del 35 % más, como se muestra en la Tabla 1. La resolución física de la red hidráulica se calcula utilizando la formulación de error mínimo cuadrado y la ponderación de las mediciones de la LGH (línea de gradiente hidráulico) y caudal, respectivamente

(García-Alcaraz & Castillo-Elsitdié, 2006; Molina-Arce, Iglesias-Rey, & Martínez-Solano, 2014).

Tabla 1. Resultados de ajuste de rugosidad de tuberías del sector 1.

Solución 1					
Porcentaje de ajuste de rugosidad					1.44
Darcy-Weisbach					
Grupo de ajuste	Enlace	Caudal (l/s)	Presión (mca)	Rugosidad inicial (mm)	Rugosidad ajustada (mm)
Tubería	94	5.21	1.56	0.025	0.036
Tubería	102	4.59			
Tubería	103	4.59	5.72		
Tubería	104	0.63			
Solución 2					
Porcentaje de ajuste de rugosidad					1.26
Darcy-Weisbach					
Grupo de ajuste	Enlace	Caudal (l/s)	Presión (mca)	Rugosidad inicial (mm)	Rugosidad ajustada (mm)
Tubería	94	5.21	1.56	0.025	0.032
Tubería	102	4.59			
Tubería	103	4.59	5.72		

Tubería	104	0.63
---------	-----	------

En la Figura 4 se muestra el coeficiente de correlación entre los programas *Epanet Calibrator* (Figura 4a) y *Darwin Calibrator* (Figura 4b), respectivamente. Se observa que los dos programas muestran un coeficiente de ajuste *R*-cuadrado mayor a 0.90, en especial la calibración realizada por *Darwin Calibrator* (Figura 4b), con un *R*-cuadrado de 0.97, mostrando un modelo fiable acercándose a las necesidades de la red hidráulica.

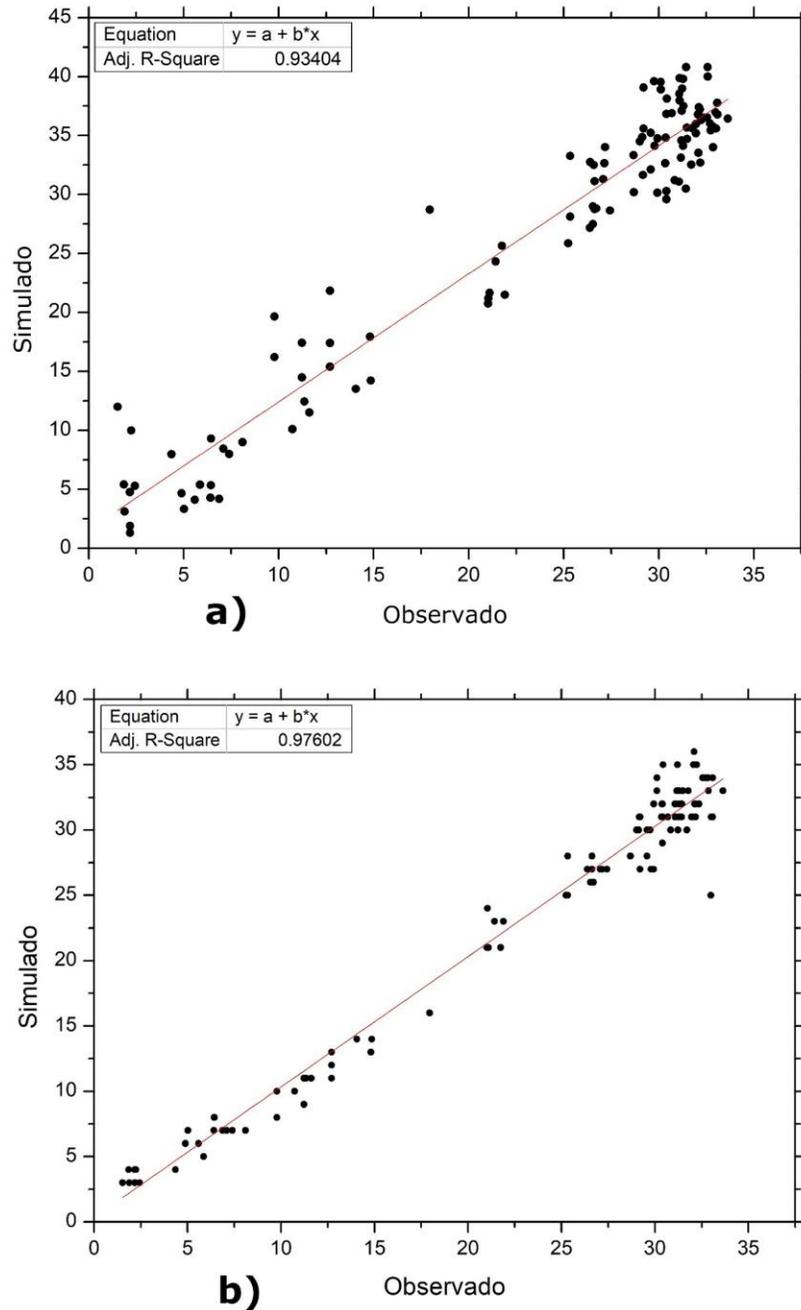


Figura 4. Representación del error de correlación para la solución calibración correcta *Epanet Calibrator* y *Darwin Calibrator* (Darcy-Weisbach; sector 1).

Sector 2

El diseño de la tubería se hizo mediante la fórmula de Hazen-Williams (Wu *et al.*, 2004; Wu & Clark, 2008) y con base en la presión tomada en diferentes nodos (Figura 2). Los factores de rugosidad de Hazen-Williams para las tuberías en este análisis se estiman inicialmente como $C = 130$, mientras que la calibración realizada por *Darwin Calibrator* muestra tres soluciones ideales, con una disminución del 10 % de la rugosidad, que se detalla en la Tabla 2. La solución física de la red hidráulica se calcula utilizando la formulación de error mínimo cuadrado y la ponderación de las mediciones de la LGH y caudal, respectivamente (García-Alcaraz & Castillo-Elsitdié, 2006; Molina-Arce *et al.*, 2014).

Tabla 2. Resultado de ajuste de rugosidad de tuberías del sector 2.

Solución 1

Porcentaje de ajuste de rugosidad					0.90	
Hazen-Williams						
Grupo de ajuste	Enlace	Caudal (l/s)	Presión (mca)	Rugosidad inicial (Valor C)	Rugosidad ajustada (valor C)	

Tubería	103	6.44	9.02	130	117.26
Tubería	104	3.11			
Tubería	105	4.82	9.02		
Tubería	106	5.63	9.02		

Solución 2

Porcentaje de ajuste de rugosidad

0.90

Hazen-Williams

Grupo de ajuste	Enlace	Caudal (l/s)	Presión (mca)	Rugosidad inicial (valor C)	Rugosidad ajustada (valor C)
Tubería	103	6.44	9.02	130	117.13
Tubería	104	3.11			
Tubería	105	4.82	9.02		
Tubería	106	5.63	9.02		

Solución 3

Porcentaje de ajuste de rugosidad

0.9

Hazen-Williams

Grupo de ajuste	Enlace	Caudal (l/s)	Presión (mca)	Rugosidad inicial (valor C)	Rugosidad ajustada (valor C)
Tubería	103	6.44	9.02	130	117.39
Tubería	104	3.11			
Tubería	105	4.82	9.02		

Tubería 106 5.63

En la Figura 5 se muestra el error de correlación entre los programas *Epanet Calibrator* (Figura 5a) y *Darwin Calibrator* (Figura 5b), respectivamente. Los resultados arrojan un coeficiente de ajuste mayor a 0.90, por lo que es un resultado confiable para la permanencia en el tiempo de la red de distribución de agua potable, en especial la calibración por medio de *Darwin Calibrator* con un *R*-cuadrado de 0.99, como se observa en la Figura 4b.

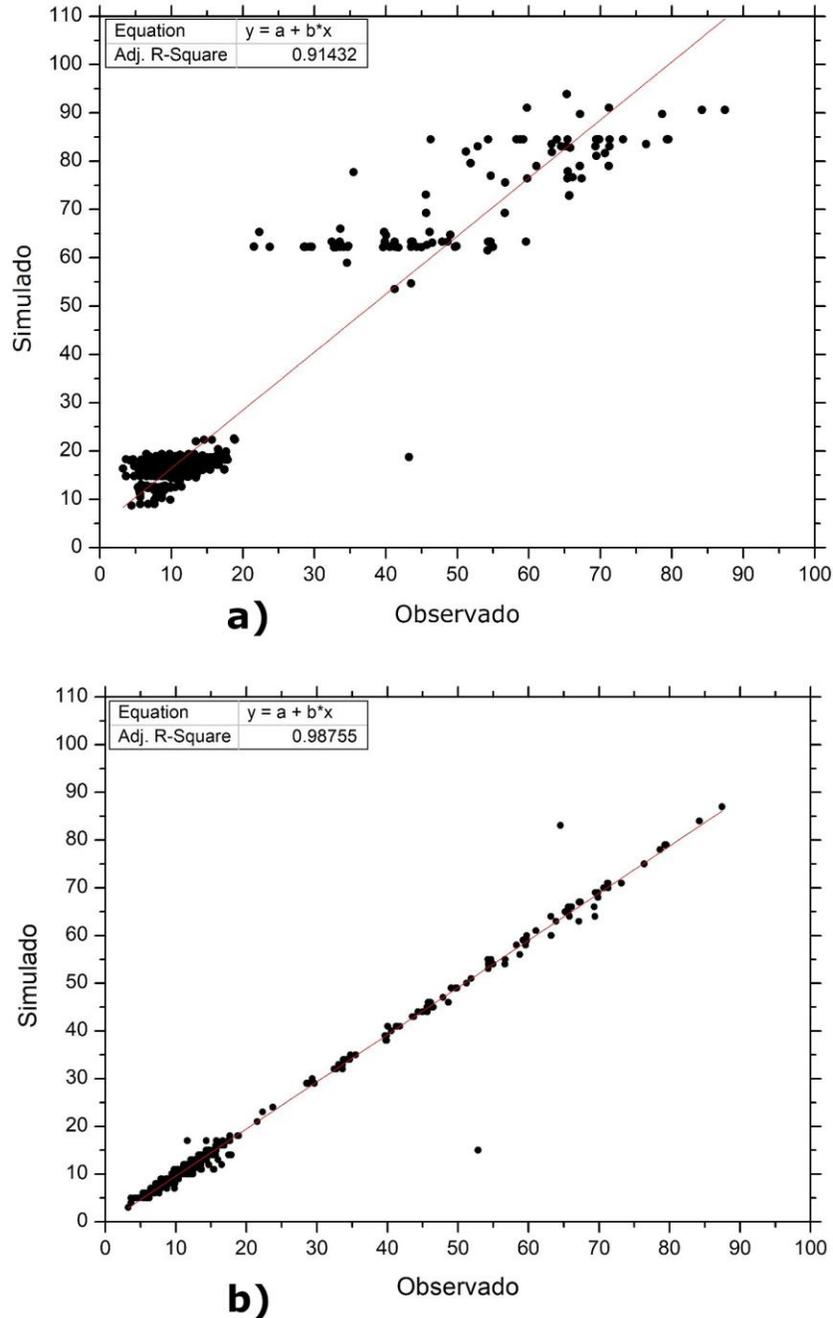


Figura 5. Representación del error de correlación para la solución calibración correcta *Epanet Calibrator* y *Darwin Calibrator* (Hazen-Williams; sector 2).

Sector 3

El análisis se efectuó mediante la fórmula de Hazen-Williams, y con base en la presión tomada en diferentes nodos (Figura 3). El coeficiente *C* de Hazen-Williams en este análisis se estima inicialmente con un valor de 130. La calibración realizada por *Darwin Calibrator* muestra dos soluciones ideales con una disminución del 15 % promedio de la rugosidad detallado en la Tabla 3. La solución física de la red hidráulica se calcula utilizando la formulación de error mínimo cuadrado, y la ponderación de las mediciones de la LGH y caudal, respectivamente (García-Alcaraz & Castillo-Elsitdié, 2006; Molina-Arce *et al.*, 2014).

Tabla 3. Resultado de ajuste del coeficiente de rugosidad de tuberías del sector 3.

Solución 1

Porcentaje de ajuste de rugosidad					0.90
Hazen-Williams					
Grupo de ajuste	Enlace	Caudal (l/s)	Presión (mca)	Rugosidad inicial	Rugosidad ajustada

			(valor C)	(valor C)
Tubería	41	1.22	3.65	130
Tubería	42	3.46		
Tubería	43	1.21	3.60	
Tubería	44	1.21	3.60	

Solución 2

Porcentaje de ajuste de rugosidad

0.80

Hazen-Williams

Grupo de ajuste	Enlace	Caudal (l/s)	Presión (mca)	Rugosidad inicial (valor C)	Rugosidad ajustada (valor C)
Tubería	41	1.22	3.65	130	104
Tubería	42	3.46			
Tubería	43	1.21	3.60		
Tubería	44	1.21	3.60		

En la Figura 6 se puede observar el error de correlación entre los programas *Epanet Calibrator* (Figura 6a) y *Darwin Calibrator* (Figura 6b), respectivamente. Los resultados arrojan un coeficiente de ajuste *R*-cuadrado mayor de 0.90, lo que indica un resultado favorable para la red hidráulica.

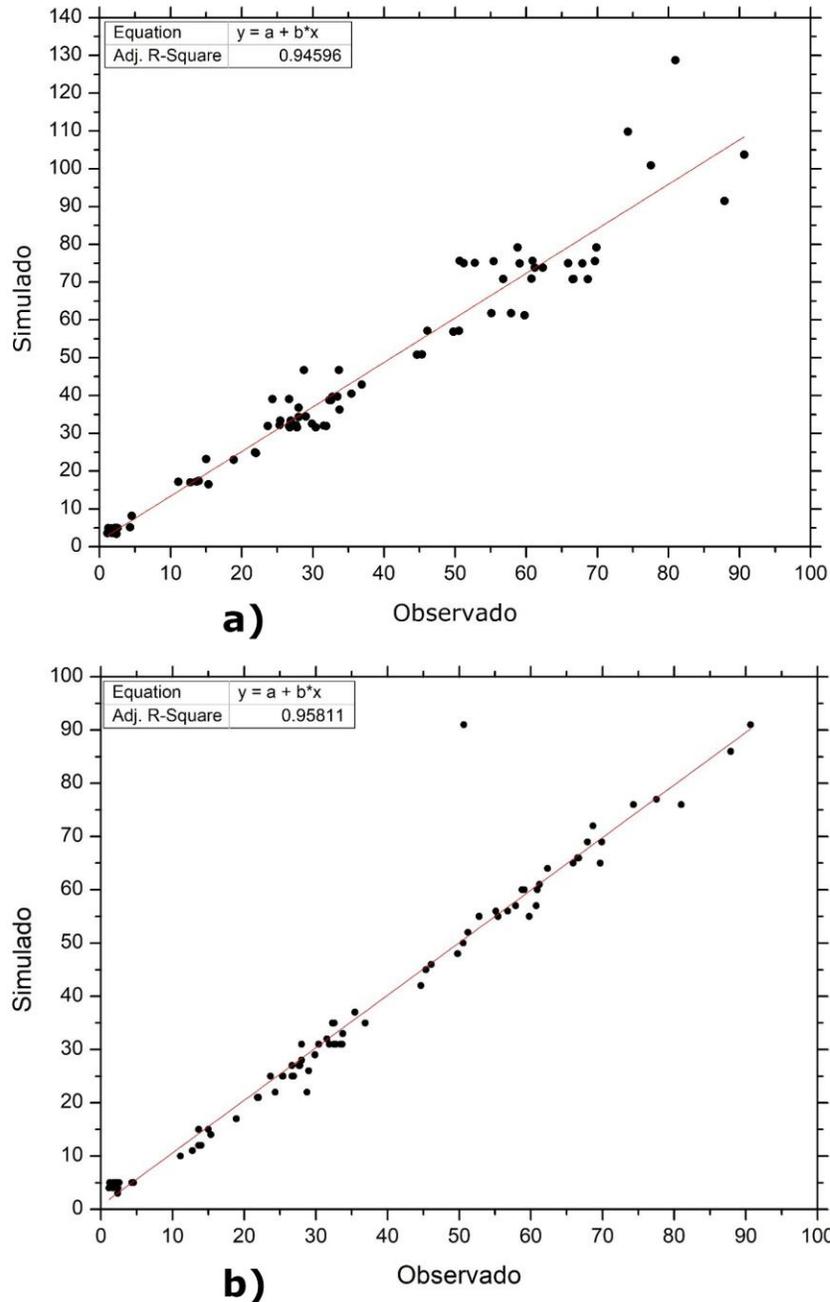


Figura 6. Representación del error de correlación para la solución calibración correcta *Epanet Calibrator* y *Darwin Calibrator* (Hazen-Williams; sector 3).

Discusión de resultados

Los resultados correspondientes a las calibraciones comparativas entre *Epanet Calibrator* y *Darwin Calibrator* muestran coeficientes de correlación superior a 0.90, lo cual señala una buena calibración, una excelente distribución y buena aplicación de parámetros aplicados en la red, como lo demostraron también Walski *et al.* (2006), Wu *et al.* (2002) y Wu *et al.* (2005). La calibración mediante *Darwin Calibrator* permitió agrupar en diferentes combinaciones de posibles rugosidades en tuberías. El proceso del análisis de los dos programas (*Epanet Calibrator* y *Darwin Calibrator*) hizo posible interactuar un proceso de búsqueda para proporcionar la solución más óptima, que incorpora el estado de la válvula, flujos y demandas. Las dos herramientas son eficaces en la calibración de redes, pero mantienen una diferencia, en que la introducción de datos, manejo y análisis se puede hacer con más detalle en *Darwin Calibrator* que en *Epanet Calibrator* (WaterGEMS, 2009). Se tomaron múltiples parámetros y las condiciones de contorno de la red hidráulica, tales como demanda y presiones (Lansey & Basnet, 1991; León-Celi, Iglesias-Rey, & Martínez-Solano, 2017), para proporcionar una representación precisa de la red.

La condición de carga de las demandas en cada uno de los sectores se pudo modificar globalmente para los sistemas hidráulicos en diferentes momentos del día simulado. Los ajustes de la válvula de control de presión también se pueden tener en cuenta en la calibración de cada red hidráulica de los distintos sectores, por tanto, la precisión se mejora al proporcionar un resultado cercano a la realidad, al operar en cada instante de tiempo de la simulación.

Estas simulaciones de cada una de las redes hidráulicas mostraron resultados un coeficiente de ajuste mayor a 0.90. El sector 1 arrojó un R -cuadrado de 0.97, muy similar al del sector 2 con un R -cuadrado de 0.98. Por otro lado, el sector 3 mostró un coeficiente de 0.95, mucho menor al sector 1 y al sector 2; esto puede ser relacionado con el tiempo de funcionamiento en las tuberías de la red (edad de la red).

El método de calibración automática de un modelo de distribución de agua proporciona una flexibilidad máxima para configurar una calibración en la práctica (Boczar *et al.*, 2017; Lansey & Basnet, 1991); por ejemplo, un modelador puede elegir los parámetros del modelo, incluido el coeficiente de rugosidad de la tubería, demanda de nodo y estado operacional de tuberías y válvulas, o cualquier combinación de estos parámetros. Dicha elección de parámetros permitió acortar el tiempo empleado en la calibración con *Darwin Calibrator*, al tener un análisis de manera grupal entre elementos de la red, mientras que la calibración por *Epanet Caibrator* aumentó el tiempo de solución en el estudio, al ser un programa de que limita las opciones que tiene *Darwin Calibrator*. Por consiguiente, es posible ingresar datos observados en el campo, como cantidades de presión y flujo de tubería, que pueden ser

ponderados en el nodo o en varios nodos para enfocar la calibración en diferentes puntos de datos.

Conclusiones

Se pudo observar que *Epanet Calibrator* y *Darwin Calibrator* son dos herramientas computacionales eficaces para la calibración de modelos de redes hidráulicas mediante la incorporación de algoritmos genéticos. Tienen la capacidad de determinar valores de rugosidad de las tuberías, demandas y presiones. *Epanet Calibrator* muestra un solo resultado mediante el cual se deben introducir valores por rugosidades, demandas o presiones, individualmente en los nudos o tuberías, mientras que *Darwin Calibrator* lo facilita, haciéndolo de forma automática y como resultado presenta tres casos factibles en donde los coeficientes de rugosidades de las tuberías pueden variar, de tal manera que se ajusten estos valores a la calibración deseada.

Finalmente, se concluye que el algoritmo genético impulsa un proceso eficiente de búsqueda y localización óptima, con un número de parámetro y modelos de varias soluciones. La calibración integrada también incluye un sistema automático que permite una tarea de calibración de una manera más rápida, mejorando la productividad en el proceso.

Referencias

- Abdy-Sayyed, M. A. H., Gupta, R., & Tanyimboh, T. T. (2014). Modelling pressure deficient water distribution networks in EPANET. *Procedia Engineering*, 89, 626-631. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.487
- Abe, N., & Cheung, P. B. (2008). *Epanet Calibrator. User Guide*. Recuperado de <https://bit.ly/2TK7vvZ>
- Abe, N., & Cheung, P. B. (2010). *Epanet Calibrator – An integrated computational tool to calibrate hydraulic models*. London, UK: Taylor & Francis Group. Recuperado de <https://bit.ly/2TK7vvZ>
- Agency, E. P. (2000). *Epanet 2, Users Manual*. Recuperado de <https://bit.ly/2TK5HTK>
- Alves, Z., Muranho, J., Albuquerque, T., & Ferreira, A. (2014). Water distribution network's modeling and calibration. A Case study based on Scarce Inventory Data. *Procedia Engineering*, 70, 31-40. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.005
- Anisha, G., Kumar, A., Ashok-Kumar, J., & Suvama-Raju, P. (2016). Analysis and design of water distribution network using Epanet for Chirala Municipality in Prakasam District of Andhra Pradesh. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 3(4). Recuperado de <https://bit.ly/2DWFBs4>
- Autodesk. (2010). *Manual de AutoCAD*. Recuperado de <http://autocad.arq.com.mx/>

- Bartolín-Ayala, H., & Martínez-Alzamora, F. (2013). *Confección de modelos de redes de distribución de agua desde un SIG y desarrollo de herramientas e apoyo a la toma de decisiones* (tesis doctoral). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Bentley. (2008). *Síntesis de diferencias entre Bentley WaterCAD/GEMS V8i y Epanet*. Recuperado de <https://bit.ly/2FE4OsQ>
- Bentley Systems, I. (2005). *Manual watercad*. Recuperado de <https://bit.ly/2zIZp4c>
- Boczar, T., Adamikiewicz, N., & Włodzimierz, S. (2017). Calibration of parameters of water supply network model using genetic algorithm. *E3S Web of Conferences*, 19, 02007. DOI: 10.1051/e3sconf/20171902007.
- Bosch-Fuentes, P., & Recio-Villa, I. (2014). Calibración y simulación del sistema fuente para abasto de agua del acueducto El Gato. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 35, 101-115. Recuperado de <https://bit.ly/2PV9Q92>
- Datta, R. S. N., & Sridharan, K. (1995). Parameters estimation in water-distribution system by least squares. *Journal of Water Resources Planning and Management*. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1994)120:4(405)
- Dunca, G., Piraianu, V.-F., Roman, R., Ciuc, P.-O., & Georgescu, S.-C. (2017). Experimental versus EPANET Simulation of Variable Speed Driven Pumps Operation. *Energy Procedia*, 112, 100-107. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1070

- Escobar, C. (2010). *Análisis de sensibilidad espacial de un modelo hidrodinámico del embalse PunChiná (Antioquia)*. Recuperado de <https://bit.ly/2E0exZ0>
- García-Alcaraz, M., & Castillo-Elsitdié, L. (2006). *Modelación y simulación de redes hidráulicas a preseión mediante herramientas informáticas* (proyecto de fin de carrera). Universidad Politécnica de Cartagena, Murcia, España.
- Gençoğlu, G., & Merzi, N. (2017). Minimizing excess pressures by optimal valve location and opening determination in water distribution networks. *Procedia Engineering*, 186, 319-326. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.254
- Guerrero-Angulo, J., & Arreguín-Cortés, F. (2002). Modelo hidráulico para redes de agua potable con tomas domiciliarias. *Ingeniería Hidráulica en México*, 17(1), 31-48. Recuperado de <https://bit.ly/2Kvhph1>
- Hooda, N., & Damani, O. (2017). A system for optimal design of pressure constrained branched piped water networks. *Procedia Engineering*, 186, 349-356. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.211
- Iglesias-Rey, P. L., Martínez-Solano, F. J., & Ribelles-Aquilar, J. V. (2017). Extending Epanet capabilities with Add-In Tools. *Procedia Engineering*, 186, 626-634. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.279
- Jorgensen, B. (1983). Maximum likelihood estimation and large-sample inference for generalized linear and nonlinear regression models. *Biometrika*, 70(1), 19-28. DOI: 10.2307/2335940

- Koppel, T., & Vassiljev, A. (2012). Use of modelling error dynamics for the calibration of water distribution systems. *Advances in Engineering Software*, 45(1), 188-196. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2011.09.024
- Lansey, K., & Basnet, B. (1991). Parameter estimation for water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 117(1), 126-144. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1991)117:1(126)
- León-Celi, C. F., Iglesias-Rey, P. L., & Martínez-Solano, F. J. (2017). Energy optimization of supplied flows from multiple pumping stations in water distributions networks. *Procedia Engineering*, 186, 93-100. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.214
- Martínez-Solano, F. J., Iglesias-Rey, P. L., & Molina-Arce, S. X. (2015). *Calibración de modelos de redes de distribución de agua mediante la utilización conjunta de demandas y consumos dependientes de la presión*. Recuperado de <https://bit.ly/2BwUC1y>
- Molina-Arce, S. X., Iglesias-Rey, P. L., & Martínez-Solano, F. X. (2014). *Metodología para la calibración preliminar de modelos de redes de distribución de agua mediante la utilización conjunta de demandas y consumos dependientes de la presión* (tesis de maestría). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
- Morelos, R. A., & Ramírez-Hernández, J. (2017). *Modelación hidráulica de la red de distribución de agua potable en una ciudad Mexicana Epanet*. Recuperado de <http://www.reibci.org/publicados/2017/abr/2200106.pdf>

- Muniz, P., Venturini, N., Martins, C. C., Munshi, A. B., García-Rodríguez, F., Brugnoli, E., Lindroth-Dauner, A. L., Caruso-Bícego, M., & García-Alonso, J. (2015). Integrated assessment of contaminants and monitoring of an urbanized temperate harbor (Montevideo, Uruguay): A 12-year comparison. *Brazilian Journal of Oceanography*, 63(3), 311-330. DOI: 10.1590/s1679-87592015088506303
- Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., & Marques, A. S. (2014). Pressure-dependent demand and leakage modelling with an EPANET Extension – WaterNetGen. *Procedia Engineering*, 89, 632-639. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.11.488
- Murray, S. N., Walsh, B. P., Kelliher, D., & O'Sullivan, D. T. J. (2014). Multi-variable optimization of thermal energy efficiency retrofitting of buildings using static modelling and genetic algorithms – A case study. *Building and Environment*, 75, 98-107. DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.01.011.
- Ormsbee, L. E. (2006). *The evolutions of water distribution models*. Recuperado de <https://bit.ly/2Kwf1Xa>
- Ormsbee, L. E., & Lingireddy, S. (1997). Calibration of hydraulic network models. *Journal of the American Water Works Association*, 89, 42-50.
- Pacchin, E., Alvisi, S., & Franchini, M. (2017). A New non-iterative method for pressure-driven snapshot simulations with Epanet. *Procedia Engineering*, 186, 135-142. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.219

- Pérez-Arellano, R., Roldán-Cañas, J., Moreno-Pérez, M., & García-Alcubierre, S. (s.f.). *Análisis del comportamiento hidráulico de la red de abastecimiento de la ciudad de Córdoba mediante Epanet*. Recuperado de <https://bit.ly/2FFQVdI>
- Pérez, R., Sanz, G., Cugueró, M.-Á., Blesa, J., & Cugueró, J. (2015). Parameter uncertainty modelling in water distribution network models. *Procedia Engineering*, 119, 583-592. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.08.911
- Saldarriaga, J., & Jurado, C. M. (2008). *Metodología de calibración de redes de distribución de agua potable*. Recuperado de <https://bit.ly/2BxKGVk>
- Waikhom, S. I., & Mehta, D. J. (2015). Optimization of Limbayat Zone water distribution system using Epanet. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 02(04). Recuperado de <https://bit.ly/2DNclTZ>
- Walski, T. M. (1983). Technique for calibrating network models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 109(4), 360-372. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9496(1983)109:4(360)
- Walski, T. M., DeFrank, N., Voglino, T., Wood, R., & Whitman, B. E. (2006). *Determining the accuracy of automated calibration of pipe network models*. 1-18. DOI: 10.1061/40941(247)67
- Walski, T. M., Wu, Z. Y., & Hartell, W. (2012). Performance of automated calibration for water distributions systems. *Water and Environmental Resources Management*. DOI: 10.1061/40737(2004)228

- Wu, Z. Y., Amiella, E. F., & Gianella, E. (2004). Darwin calibrator-improving project productivity and model quality for large water systems. *American Water Works Association*, 96(10), 27-34. DOI: 10.1002/j.1551-8833.2004.tb10715.x
- Wu, Z. Y., & Clark, C. (2008). Evolving effective hydraulic model for municipal water systems. *Water Resources Management*, 23(1), 117-136. DOI: 10.1007/s11269-008-9267-3
- Wu, Z. Y., Walski, T. M., Mankowski, R., Herrin, G., Gurrieri, R., & Tryby, M. (2002). *Calibrating water distribution model via genetic algorithms*. Recuperado de <https://bit.ly/2ScSykK>
- Wu, Z. Y., Walski, T. M., Naumick, G., Dugandzic, J., & Rob, N. (2005). Optimizing water system improvement for a growing community. *International Conference of Computing and Control in the Water Industry*, 5-7. Recuperado de <https://bit.ly/2r5YccA>