

## Artículo de investigación científica

Cómo citar: F. Santamaría, J. Solorzano, A. Caicedo, "Modelación y calibración del cloro residual en el software Epanet. Caso de estudio: municipio de Villa de Leyva (Boyacá, Colombia)". *Inventum*, vol. 18 n.º 35, pp. 84-96, julio - diciembre 2023 doi: 10.26620/uniminuto.inventum.18.35.2023.84-96

Editorial: Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO.

ISSN: 1909-2520  
eISSN: 2590-8219

Fecha de recibido: 01 de junio de 2023  
Fecha de aprobado: 01 de julio de 2023  
Fecha de publicación: 15 de julio de 2023

Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen intereses en competencia.

# Modelación y calibración del cloro residual en el software Epanet. Caso de estudio: municipio de Villa de Leyva (Boyacá, Colombia)

## Modeling and calibration of residual chlorine in Epanet software. Case study: Town of Villa de Leyva (Boyacá, Colombia)

## Modelagem e calibração de cloro residual no software Epanet. Estudo de caso: município de Villa de Leyva (Boyacá, Colômbia)

### Resumen:

La prestación del servicio de acueducto integra un factor esencial para acceder a un nivel básico de calidad de vida y así evitar la transmisión de enfermedades patógenas en la población. Dentro de la potabilización del recurso hídrico se desarrolla el proceso fisicoquímico "desinfección" en las plantas de tratamiento, en el que la concentración aplicada se realiza por el método de tanteo, sin tener en cuenta el comportamiento que tiene el desinfectante en las redes del acueducto. Por lo anterior, en la siguiente investigación desarrollada en el municipio de Villa de Leyva (departamento de Boyacá, Colombia) en el 2019, se explica el comportamiento que presenta el cloro residual libre en las tuberías de la red de abastecimiento, mediante la modelación y calibración de 3 escenarios en el *software* Epanet, de acuerdo con la variación de los coeficientes de reacción ( $K_{Wall}$ ), ( $K_{Bulk}$ ) y el coeficiente de correlación rugosidad-reacción en la pared ( $F$ ). Realizado el proceso de calibración hidráulica y de calidad, en el escenario n.º. 1 se obtuvo un porcentaje de error entre los valores leídos y computados del 11 % para las presiones y 0,3 % en los niveles de cloro, conforme los coeficientes ( $K_{Wall}$ ) y ( $K_{Bulk}$ ) de -0.65 y ( $F$ ) -2.88 que modelan la red de abastecimiento. Teniendo calibrado el primer escenario, se utilizaron los coeficientes obtenidos para iniciar la modelación del segundo y tercer escenario. Para el caso de estudio, se observó que el comportamiento del cloro residual libre varía según las presiones durante el día, en los intervalos pico de consumo las presiones disminuyen y los niveles del desinfectante aumentan, debido a que el caudal se transporta con mayor velocidad por las tuberías, generando menor reacción del agente químico.

**Palabras clave:** Epanet, cloro residual, desinfección, calibración de redes, coeficientes de reacción.

#### F. Santamaría

Universidad Piloto de Colombia  
Facultad de Ingeniería Civil  
Email: felipe-santamaria@upc.edu.co

#### J. Solorzano

Universidad Piloto de Colombia  
Facultad de Ingeniería Civil  
Email: jusedepla@gmail.com

#### A. Caicedo

Universidad Piloto de Colombia  
Facultad de Ingeniería Civil  
Email: yuri-caicedo@unipiloto.edu.co



### Abstract:

The supply of the aqueduct service integrates an essential factor to access a basic level of quality of life and so avoid the transmission of pathogenic diseases in the population. Within the purification of water resources, the physicochemical process “disinfection” is developed in the treatment plants, where the applied concentration is implemented by the trial method without taking into account the behavior of the disinfectant in the aqueduct networks. Therefore, in the following research developed in the town of Villa de Leyva (department of Boyacá, Colombia) in 2019, the behavior of free residual chlorine in the pipes of the supply network is explained, through the modeling and calibration of 3 stages in the Epanet software, according to the variation of the reaction coefficients ( $K_{Wall}$ ), ( $K_{Bulk}$ ) and the roughness-wall reaction correlation coefficient ( $F$ ). Carrying out the hydraulic and quality calibration process, in stage n°. 1, a percentage of error between the read and computed values of 11 % for the pressures and 0.3% for the chlorine levels was obtained, according to the coefficients ( $K_{Wall}$ ) y ( $K_{Bulk}$ ) de -0.65 y ( $F$ ) -2.88 that model the supply network. Having calibrated the first stage, the coefficients obtained were used to start the modeling of the second and third stages. For the case study, it was observed that the behavior of free residual chlorine varies according to the pressures during the day, in the peak consumption intervals the pressures decrease and the levels of the disinfectant increase, due to the fact that the flow is transported with greater rate through the pipes generating less reaction of the chemical agent.

**Keywords:** Epanet, residual chlorine, disinfection, network calibration, reaction coefficients.

### Resumo:

A prestação do serviço de aqueduto integra um factor essencial para aceder a um nível básico de qualidade de vida e assim evitar a transmissão de doenças patogénicas na população. No âmbito da purificação do recurso hídrico, desenvolve-se o processo físico-químico “desinfecção em estações de tratamento”, no qual a concentração aplicada é realizada pelo método de apalpação, sem levar em conta o comportamento do desinfetante nas redes de aquedutos. Portanto, na seguinte pesquisa desenvolvida no município de Villa de Leyva (departamento de Boyacá, Colômbia) em 2019, é explicado o comportamento do cloro residual livre nas tubulações da rede de abastecimento, através da modelagem e calibração de 3 cenários no software Epanet, de acordo com a variação dos coeficientes de reação ( $K_{Wall}$ ), ( $K_{Bulk}$ ) e do coeficiente de correlação rugosidade-reação na parede ( $F$ ). Feito o processo de calibração hidráulica e de qualidade, no cenário n°. 1 obteve-se um percentual de erro entre os valores lidos e calculados de 11% para pressões e 0,3% para níveis de cloro, conforme os coeficientes ( $K_{Wall}$ ). ( $K_{Bulk}$ ) de -0,65 e ( $F$ ) -2,88 que modelam a rede de abastecimento. Após calibrado o primeiro cenário, os coeficientes obtidos foram utilizados para iniciar a modelagem do segundo e terceiro cenários. Para o estudo de caso observou-se que o comportamento do cloro residual livre varia de acordo com as pressões durante o dia, nos intervalos de pico de consumo as pressões diminuem e os níveis do desinfetante aumentam, pois o fluxo é transportado com maior velocidade através as tubulações gerando menor reação do agente químico.

**Palavras chave:** Epanet, cloro residual, desinfecção, calibração de rede, coeficientes de reação.

## I. INTRODUCCIÓN

Los países en desarrollo a nivel global, especialmente en Suramérica, presentan dificultades en el suministro de servicios públicos por diferentes razones económicas, políticas, o sociales, causando deficiencia en la calidad de vida de la población. Esta situación ocurre en el sector del manejo de los recursos hídricos y potabilización, donde las entidades públicas y privadas encargadas del funcionamiento, mantenimiento y operación de los sistemas de abastecimiento no contemplan la digitalización y modelación de algunos componentes que intervienen en las redes de distribución, entre ellos, el factor de calidad, que tiene como uno de sus objetivos analizar el componente de la desinfección que permite la destrucción de contaminantes microbianos en la mayoría de las situaciones, empleando diferentes productos químicos reactivos [1].

Según la clasificación cualitativa de procesos de tratamiento en función de su complejidad técnica y menores costos asociados, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda emplear la cloración simple mediante la dosis crítica. Esta consiste en la aplicación de suficiente concentración para oxidar con velocidad el nitrógeno amónico presente en el agua y dejar una adecuada concentración de cloro libre residual para proteger el agua de una eventual contaminación de microorganismos y bacterias en el transporte, entre el punto de cloración y el punto de consumo a lo largo de la red de distribución. Además, es necesario determinar las reacciones que pueda tener la concentración inicial del cloro con el seno del agua y las paredes de las tuberías para evitar un costo adicional en la creación de puntos de rechloración [2, 3].

Con la obligación de las empresas que facilitan el servicio de acueducto en presentar óptimos niveles de cloro en todos los puntos del sistema de distribución a las entidades de control y a la población, es necesario implementar modelos digitales de simulación partiendo de datos operacionales, hidráulicos y de calidad comprobados en campo, para identificar y plantear soluciones con respecto a zonas que presenten fallas en el suministro [4]. Con el fin de desarrollarlos existen varias aplicaciones de modelación para investigar conflictos con respecto a la calidad del

agua en los sistemas de distribución, entre ellas Epanet, la cual permite realizar modelaciones del cloro residual e identificar en cualquier punto de la red la concentración; esencialmente el *software* requiere la definición de las constantes de correlación ( $F$ ) y de reacción para el seno del agua ( $K_{Bulk}$ ) y las paredes de las tuberías ( $K_{Wall}$ ), adicionalmente es necesario ingresar la concentración aplicada generalmente en la PTAP [5, 6].

Según lo expuesto, se propuso determinar la magnitud de los coeficientes de reacción y correlación que intervienen en el seno del agua y las paredes de las tuberías para modelar el comportamiento del cloro residual libre en la red de abastecimiento del municipio de Villa de Leyva [7].

## II. METODOLOGÍA

Para desarrollar la investigación planteada, se siguió el proceso expuesto a continuación con el objetivo de calibrar el modelo de calidad del cloro residual libre, para finalmente analizar y discutir su comportamiento.

### A. Condición actual del sistema de distribución

En compañía de la empresa de servicios públicos Esvilla E.S.P., se realizó un recorrido por la planta de tratamiento “La Diana”, con el fin de obtener información respecto al caudal tratado, el método de desinfección del agua, la dosificación del agente desinfectante y cómo se lleva a cabo el proceso de abastecimiento al municipio. Posteriormente, fue suministrado por la empresa de servicios públicos los planos de catastro de redes, donde se encontró información de las características de la red, áreas aferentes a nudos de consumo, longitudes de tuberías, diámetros, localización de accesorios, etc.

### B. Campaña de monitoreo

Se eligieron estratégicamente 4 puntos de monitoreo localizados en el municipio, los cuales se observan en la figura 1, en donde se recopiló durante una semana, en intervalos de tres horas, datos de presión con un manómetro digital y niveles de cloro con un colorímetro portátil.

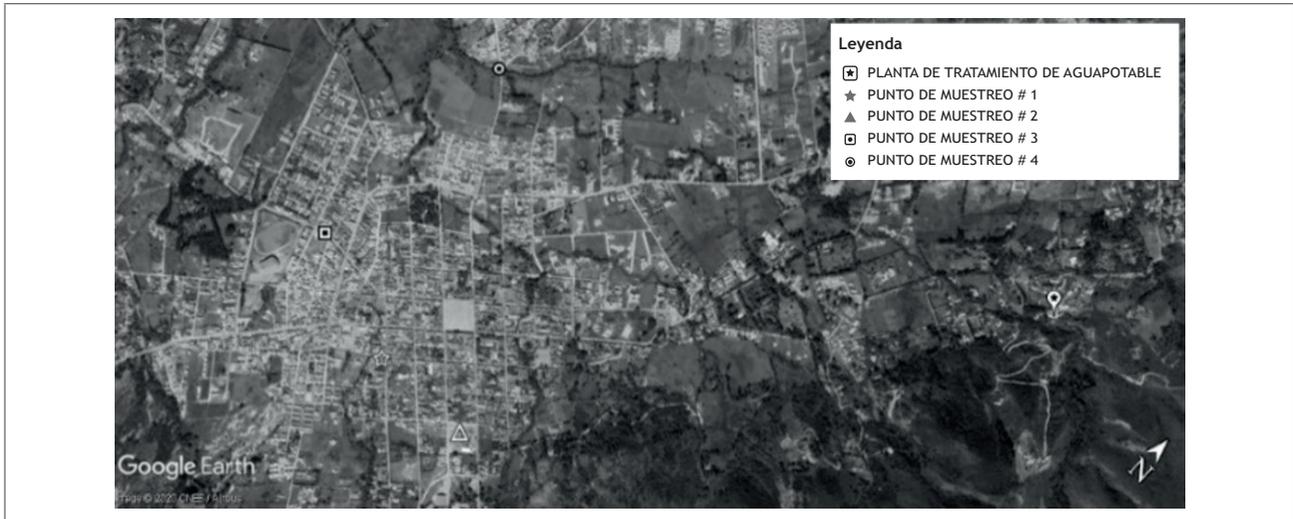


Figura 1. Puntos de muestreo.  
 Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta los datos recolectados, se utilizó la mediana de las presiones y niveles de cloro para analizar el comportamiento que se presenta en la red. En los siguientes diagramas de caja, se muestra la variación de la presión y el cloro para los 4 puntos según la hora de muestreo, en cada punto se analizan los parámetros mencionados en 5 horas diferentes del día, con el fin de evidenciar los aumentos o descensos y la relación que tiene la presión de la red con el nivel del desinfectante.

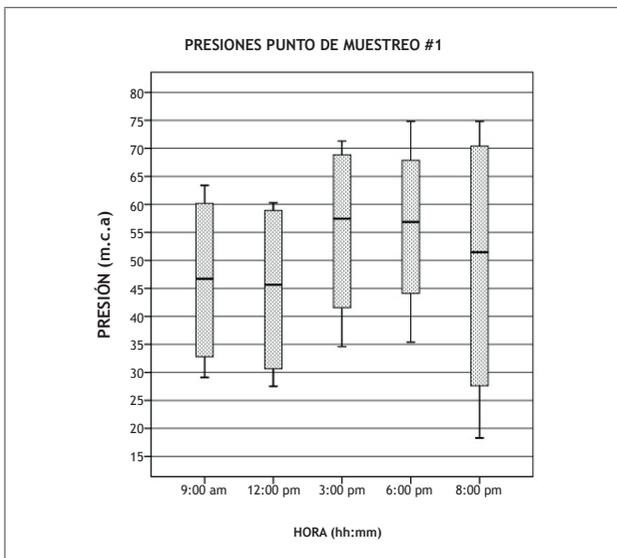


Figura 2. Lecturas presión lunes a viernes punto 1.  
 Fuente: elaboración propia.

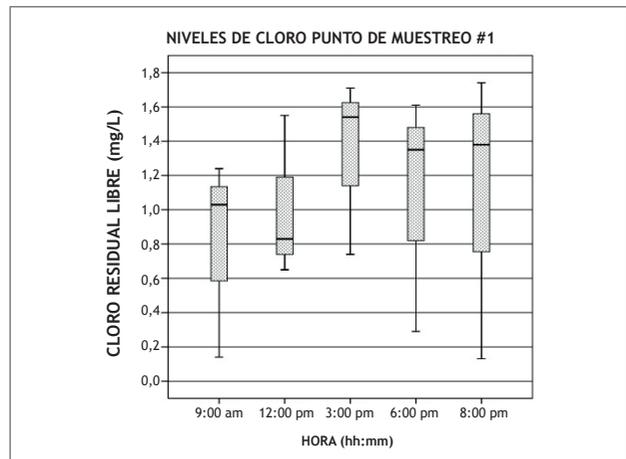


Figura 3. Lecturas cloro lunes a viernes punto 1.  
 Fuente: elaboración propia.

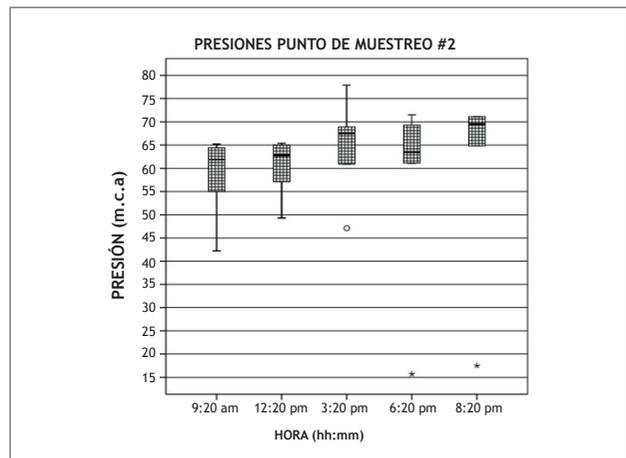


Figura 4. Lecturas presión lunes a viernes punto 2.  
 Fuente: elaboración propia.

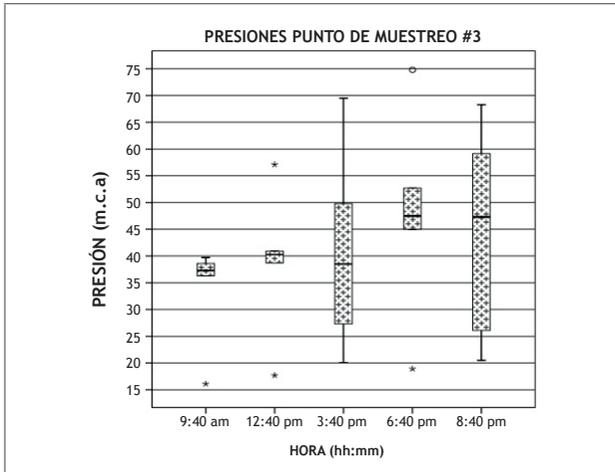


Figura 5. Lecturas presión lunes a viernes punto 3.  
 Fuente: elaboración propia.

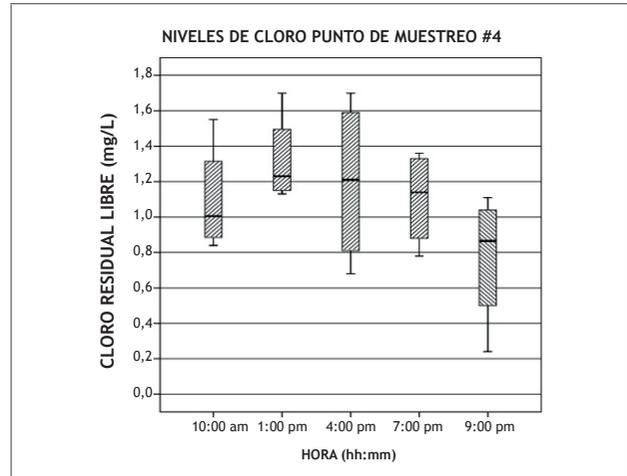


Figura 8. Lectura cloro lunes a viernes punto 4.  
 Fuente: elaboración propia.

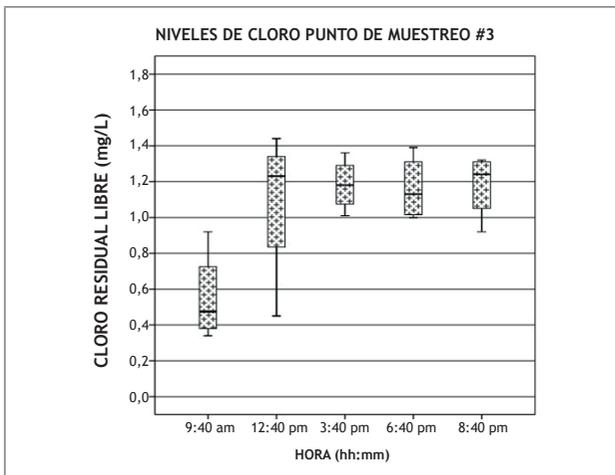


Figura 6. Lecturas cloro lunes a viernes punto 3.  
 Fuente: elaboración propia.

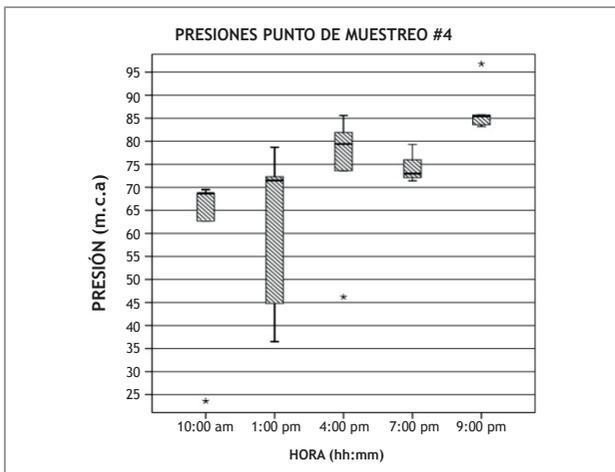


Figura 7. Lectura presiones lunes a viernes punto 4.  
 Fuente: elaboración propia.

### C. Modelación hidráulica

La modelación hidráulica inició montando la red a Epanet indicando datos de diámetros de las tuberías, consumos y demás; también se definieron los diámetros internos y la rugosidad ( $K_s$ ) de 0,0015 mm. Se identificó el componente de accesorios en las tuberías para asignar el coeficiente de pérdidas por estos; se asignó a cada nudo la altura sobre el nivel del mar (m s. n. m.) y la demanda base; se registraron los parámetros de elevación m s. n. m., cota solera, nivel inicial, mínimo y máximo del agua en los tanques de almacenamiento y el diámetro de estos. Para lo anterior, se asignó un valor infinito para generar mayores ciclos de consumo. Es importante recalcar que para el cálculo de las pérdidas de energía y las elevaciones de los nudos se utilizaron los planteamientos dados en [7].

### D. Modelación de calidad

Para realizar la modelación de calidad del agua es indispensable poseer en su totalidad el modelo hidráulico calibrado teniendo en cuenta que en el análisis de calidad intervienen las reacciones del químico en el flujo y en las paredes de las tuberías.

Para las reacciones en el seno del agua Watson propuso la siguiente ecuación:

$$R = K_b C^n$$

$$R = K_b (C - C_L) C^{(n-1)} \text{ para } n > 0, K_b < 0$$

En donde, se define  $K_b$  = Coeficiente de reacción en el medio,  $C$  = Concentración de desinfectante y  $n$  = Orden de reacción o coeficiente de dilución. [8].

Y para las reacciones en la pared de las tuberías, teniendo en cuenta que “la velocidad de reacción de las sustancias que reaccionan en, o cerca de, la pared de las tuberías puede considerarse que depende de la concentración en el seno del agua del flujo principal mediante la expresión.”

$$R = (A/V)K_w C^n$$

En donde se define  $K_w$  = Coeficiente de reacción en la pared y se expresa en unidades de longitud/tiempo y  $(A/V)$  = Superficie de contacto por unidad de volumen en el interior de la tubería.

Otro parámetro que emplea Epanet para analizar qué ocurre en las paredes de las tuberías, es la rugosidad de las tuberías, dependiendo el tipo de material. Según la fórmula de pérdidas, para esta investigación (Darcy-Weisbach), el *software* utiliza la siguiente expresión, que logra hacer depender el coeficiente  $K_w$  para cada tubería de su coeficiente de rugosidad.

$$K_w = \frac{-F}{\log\left(\frac{\varepsilon}{d}\right)} - K_w * \log\left(\frac{\varepsilon}{d}\right) = F$$

En donde, se define  $\varepsilon$  = Rugosidad absoluta (D-W),  $d$  = Diámetro de la tubería (m) y  $F$  = Coeficiente de correlación rugosidad-reacción.

### E. Escenario 1

Para iniciar la calibración de la red, se estableció el primer escenario como punto de partida para la calibración de los otros dos.

#### Calibración hidráulica

Para calibrar el modelo de redes de abastecimiento de agua potable, inicialmente, se deben calibrar las presiones tomadas en campo a cierta hora del día (12:00 a.m.), de forma estática. El primer factor para tener en cuenta en la variación a lo largo del tiempo de las rugosidades [9]. Para esto, se calculó el factor de fricción para cada tubería del modelo, despejando la fórmula de Darcy-Weisbach, para ser reemplazada en la fórmula de Colebrook-White. De esta, se determinó un nuevo coeficiente de rugosidad ( $K_s$ ) para cada tubería; también se asignó el coeficiente de pérdidas menores de acuerdo con los accesorios que componen las tuberías.

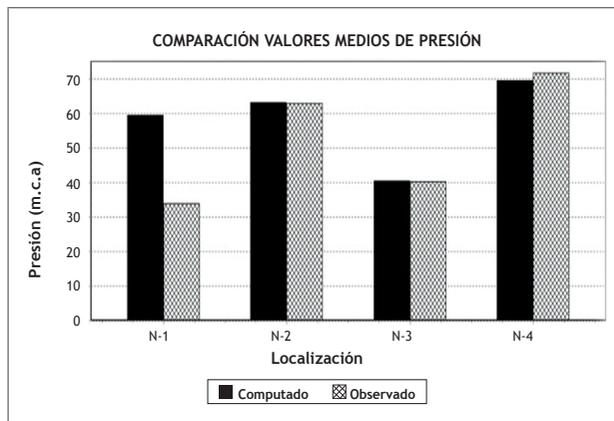


Figura 9. Barras de calibración de presión modelo estático.  
 Fuente: elaboración propia.

En la figura 9, se observa la comparación de las presiones leídas en campo y las calculadas por el *software* para la calibración de la red. En este proceso se obtuvo un porcentaje de error del 13 %, valor aceptable teniendo en cuenta el tamaño y la complejidad de la red de abastecimiento del municipio.

Posteriormente, en la calibración hidráulica dinámica se asignó a los nudos de consumo la curva de comportamiento de la demanda de agua construida mediante una lectura continua cada hora durante un día. Adicionalmente, se registró el consolidado de la mediana de las presiones tomadas en campo en el lapso de lunes a viernes [10, 11].

Finalmente, se ajustaron los factores multiplicadores en la curva de consumo, debido a que el modelo no presentaba el consumo correspondiente a la campaña de monitoreo en el municipio [12, 13]. Como resultado de la calibración de la red en periodo extendido, se observó un margen de error de 11 % entre las barras mostradas en la figura 10, para los cuatro puntos de muestreo.

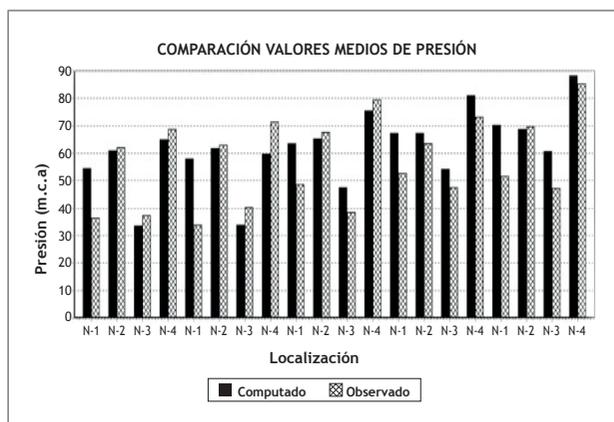


Figura 10. Barras de calibración de presión modelo dinámico.  
 Fuente: elaboración propia.

### Calibración de calidad

Teniendo el modelo hidráulico dinámico calibrado, se inició la calibración del modelo de calidad indicando los parámetros de calidad y opciones de reacciones iniciales. Adicionalmente, a partir de la información suministrada por el personal de operación de la planta, la concentración aplicada para la desinfección es de 2,6 mg/L, valor asignado en calidad de fuente para el nudo próximo a la salida de la planta.

Quality Options		Reactions Options	
Property	Value	Property	Value
Parameter	COLORO	Bulk Reaction Order	1
Mass Units	mg/L	Wall Reaction Order	First
Relative Diffusivity	1	Global Bulk Coeff.	-1
Trace Node		Global Wall Coeff.	-1
Quality Tolerance	0.01	Limiting Concentration	0
		Wall Coeff. Correlation	-10

Figura 11. Parámetros de calidad y reacciones.  
 Fuente: elaboración propia.

Inicialmente, se realizó la modelación definiendo un valor de  $F$  -10 y variando las constantes de reacción. Como resultado de estas modelaciones, se evidenciaron, como se observa en la figura 12, niveles de cloro inferiores 0,20 mg/L en puntos lejanos con respecto a la planta de tratamiento.



Figura 12. Niveles de cloro 10:00 a.m. ( $K_w, K_b$ : -1) y ( $F$ : -10).  
 Fuente: elaboración propia.

Al modificar las constantes de reacción y definir un valor fijo para ( $F$ ), se evidenció un comportamiento similar del cloro y concentraciones menores a las permitidas. Por lo anterior, se calculó mediante la siguiente fórmula, el coeficiente de correlación rugosidad-reacción en la pared ( $F$ ), definiendo un valor inicial de -1 para ( $K_w$ ) tal como lo propone Epanet, reemplazando la rugosidad relativa ( $\epsilon$ ) en 0,0020 mm y el diámetro ( $d$ ) a 54,58 mm, debido que el mayor porcentaje de tubería en la red es de 2”.

$$K_w = \frac{-F}{\log\left(\frac{\epsilon}{d}\right)}$$

$$-K_w * \log\left(\frac{\epsilon}{d}\right) = F$$

De esta manera, se obtuvo un valor para el coeficiente de correlación rugosidad-reacción en la pared ( $F$ ) de -4,56, pero como se observa en la figura 13, con estos factores de relación y correlación siguen existiendo niveles de cloro inferiores a los permitidos. Por tal razón, se aumentó el factor ( $K_w$ ) a -0,6 obteniendo un resultado de ( $F$ ) de -2,74, valores que calibran el modelo de calidad para el primer escenario y que podemos observar en la figura 14.



Figura 13. Niveles de cloro 10:00 a.m. ( $K_w, K_b$ : -1) y ( $F$ : -4,56).  
 Fuente: elaboración propia.



Figura 14. Niveles de cloro 10:00 a.m. ( $K_w, K_b$ : -0,6) y ( $F$ : -2,74).  
 Fuente: elaboración propia.

En la figura 15, se aprecian las barras comparativas que muestran la modelación del cloro teniendo en cuenta los parámetros ( $K_w, K_b$  y  $F$ ). En esta se evidencia el comportamiento de los factores de reacción ( $K_w$  y  $K_b$ ) de -0,6 y de correlación ( $F$ ) de -2,74, los cuales presentan un comportamiento semejante al del agente químico en la red del municipio.

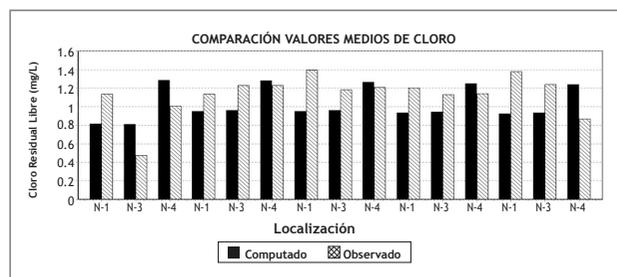


Figura 15. Barras de calibración para ( $K_w, K_b$ : -0,6) y ( $F$ : -2,74).  
 Fuente: elaboración propia.

## F. Escenario 2

El segundo escenario fue planteado teniendo en cuenta la variación de los niveles de presión y cloro el día domingo, considerado el día de mayor consumo.

### 1. Calibración hidráulica

Teniendo en cuenta la disminución de las presiones, se modificaron los patrones de consumo establecidos en el primer escenario del modelo calibrado. Como resultado de la calibración, se muestra en la figura 16 la comparación de las presiones tomadas en campo y calculadas por Epanet, obteniendo un porcentaje de error de 19%.

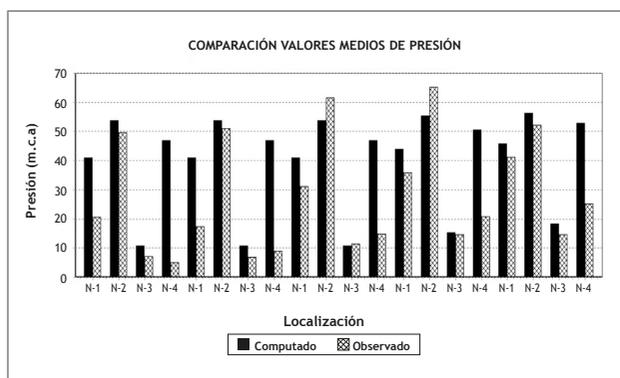


Figura 16. Barras de calibración de presión.  
 Fuente: elaboración propia.

### 2. Calibración de calidad

La calibración de calidad para el segundo escenario partió modelando la red utilizando los parámetros obtenidos en el primer escenario, tras realizar esto en ciertos puntos de la red alcanzan niveles de concentración de cloro inferiores a los permitidos. Teniendo en cuenta lo anterior, se modificaron los coeficientes de reacción ( $K_w$  y  $K_b$ ) a -0,55 obteniendo un factor de correlación ( $F$ ) de -2,51, observando en la figura 17 la variación del comportamiento del desinfectante.



Figura 17. Mapa de contorno 6:00 a.m. ( $K_w, K_b$ : -0,55) ( $F$ : -2,51).  
 Fuente: elaboración propia.

El resultado de la calibración de calidad para el segundo escenario se muestra en la figura 18, en la comparación de las barras correspondientes a los niveles de cloro leídos en campo y simulados por Epanet, para la cual obtuvo un porcentaje de error de 0,3 %.

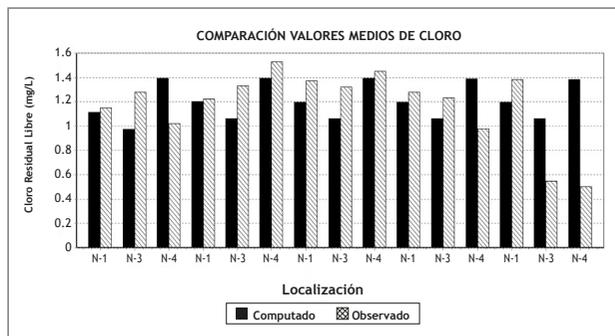


Figura 18. Barras de calibración para ( $K_w, K_b$ : -0,55) ( $F$ : -2,51).  
 Fuente: elaboración propia.

## G. Escenario 3

Para la proyección planteada en el tercer escenario, la Cooperativa de Profesionales de Colombia (2015) afirma que el caudal necesario para suplir el abastecimiento de agua potable del municipio en el 2040 será de 70 L/s, es decir que se tendrá un incremento del 40 %.

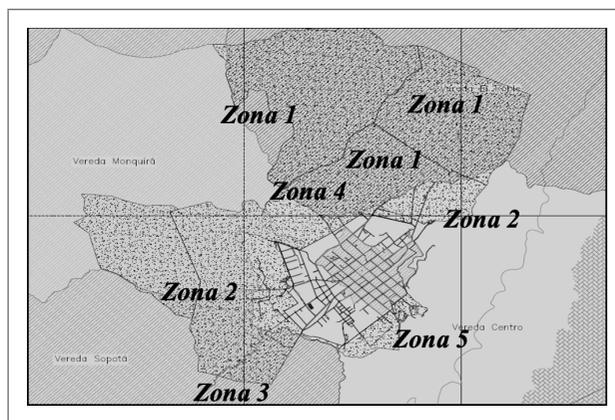


Figura 19. Zonas suburbanas con proyección demográfica.

Fuente: Adaptado de: *Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de Villa de Leyva*, Alcaldía Municipal de Villa de Leyva y Concejo Municipal de Villa de Leyva., 14 de agosto, 2004.

Observando en la figura 19, el área suburbana a desarrollar en los próximos 20 años, se definieron 5 zonas que representan el porcentaje total. Al calcular y modelar las demandas base para los nudos que pertenecen a estas zonas de expansión se observa que el comportamiento de las presiones disminuye considerablemente. En la figura 20, se muestran los niveles de presión, siendo crítico el estado de las zonas 2 y 3.

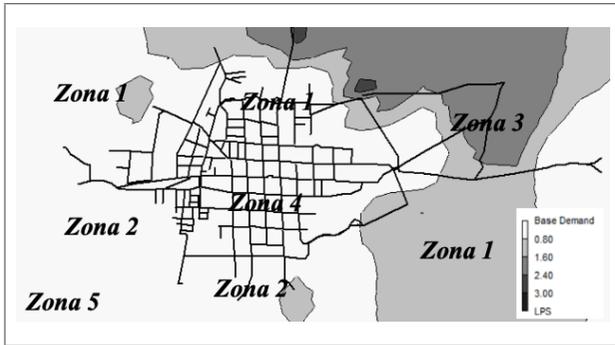


Figura 20. Mapa de contorno demanda base de 2020.

Fuente: elaboración propia.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados obtenidos en la modelación de calidad realizada en el software Epanet para la red de abastecimiento del municipio de Villa de Leyva se desglosa a continuación para cada escenario propuesto.

#### A. Escenario 1

Las constantes de reacción y correlación que modelaron y calibraron el cloro residual para el sistema con respecto a la mediana de los datos de lunes a viernes fueron  $K_w$ ,  $K_b$ : -0.6 y F: -2.74.

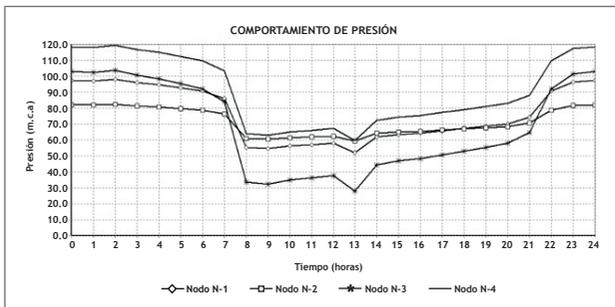


Figura 21. Comportamiento de presiones en 24 h.

Fuente: elaboración propia.

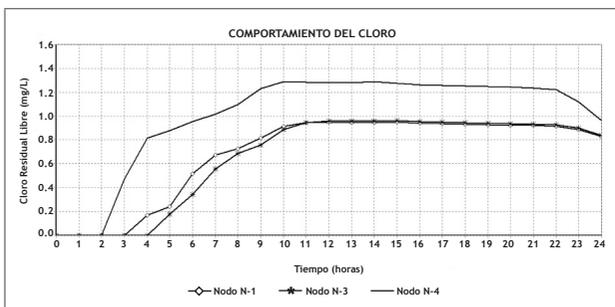


Figura 22. Comportamiento del cloro en 24 h.

Fuente: elaboración propia.

En las figuras 21 y 22, se aprecia en los 4 puntos de monitoreo que el comportamiento del cloro residual libre depende de la presión que se genera en la red, es decir que, en los intervalos del día donde se presentan bajas presiones los niveles de cloro tienden a aumentar teniendo en cuenta que es el pico de consumo.

Teniendo en cuenta la modelación en 24 horas, se proyectó el comportamiento en la red para 120 horas de análisis, donde se observa que la concentración de cloro entre las 10:00 a.m. y 11:00 p.m. permanece estable entre el rango de 0,8 mg/L y 1,4 mg/L.

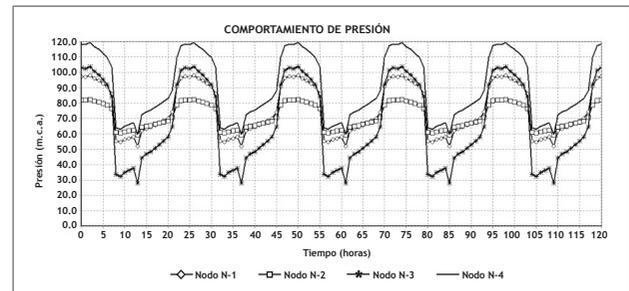


Figura 23. Comportamiento de presiones en 120 h.

Fuente: elaboración propia.

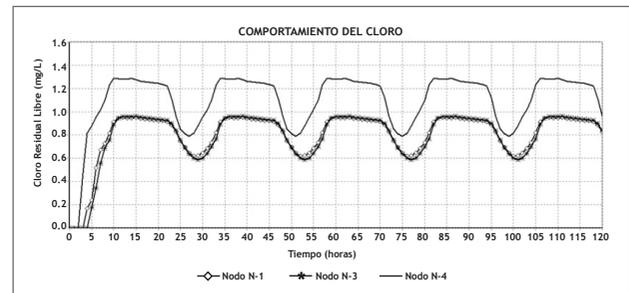


Figura 24. Comportamiento del cloro en 120 h.

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se encontró para 4 instantes del día la concentración del cloro residual en la red municipal de abastecimiento y la variación que presentan en los sectores señalados.



Figura 25. Niveles de cloro 9:00 a.m. ( $K_w$ ,  $K_b$ : -0.6) (F: -2.74).

Fuente: elaboración propia.



Figura 26. Niveles de cloro 12:00 p.m. ( $K_w, K_b: -0.6$ ) (F: -2.74).  
 Fuente: elaboración propia.

Conforme avanza el día hasta llegar al pico de consumo (12:00 p.m.) los niveles de cloro aumentan, mientras que a partir de la 1:00 p.m. el cloro tiende a disminuir en varias zonas indicadas en las figuras 27 y 28.



Figura 27. Niveles de cloro 4:00 p.m. ( $K_w, K_b: -0.6$ ) (F: -2.74).  
 Fuente: elaboración propia.



Figura 28. Niveles de cloro 11:00 p.m. ( $K_w, K_b: -0.6$ ) (F: -2.74).  
 Fuente: elaboración propia.

## B. Escenario 2

Considerando que el domingo con respecto a los días entre semana presenta mayor consumo, la presión disminuye en las horas pico provocando que los niveles de cloro estén en el rango de 1,0 mg/L y 1,6 mg/L.

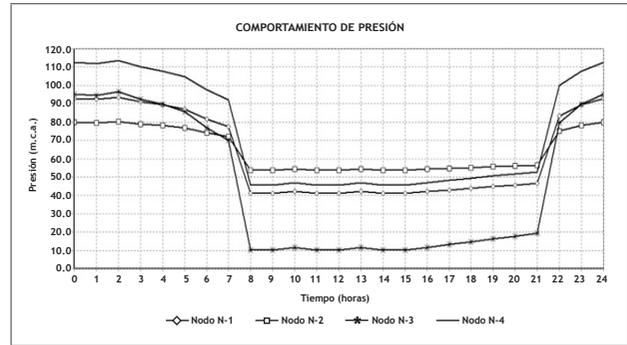


Figura 29. Comportamiento de presiones en 24 h.  
 Fuente: elaboración propia.

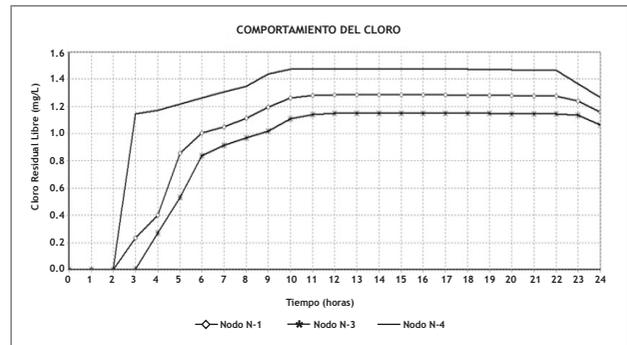


Figura 30. Comportamiento del cloro en 24 h.  
 Fuente: elaboración propia.

Para los 4 puntos de monitoreo, la tendencia en el comportamiento del cloro residual está directamente relacionado con la presión, entendiendo que al existir mayor consumo el caudal se transporta con mayor velocidad en las tuberías ocasionando menor reacción. No obstante, de acuerdo con la figura 32, el punto más distante con respecto a la planta de tratamiento (Nodo 4) está presentando los mayores niveles de cloro en consecuencia de la demanda que requiere esta zona.

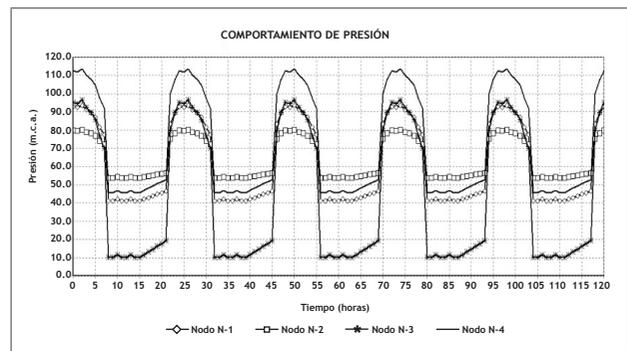
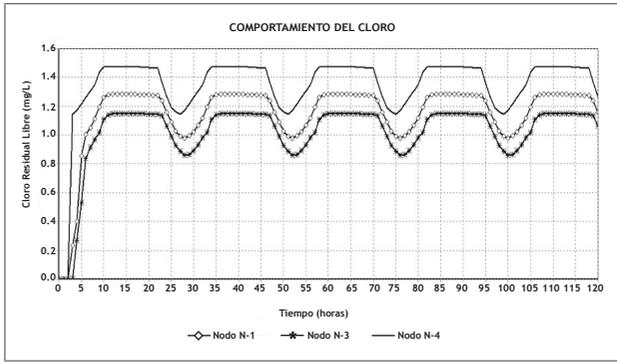


Figura 31. Comportamiento de presiones en 120 h.  
 Fuente: elaboración propia.



**Figura 32.** Comportamiento del cloro en 120 h.  
 Fuente: elaboración propia.



**Figura 35.** Niveles de cloro 4:00 p.m. ( $K_w, K_b: -0.55$ ) (F: -2.51).  
 Fuente: elaboración propia.

De igual forma que el escenario 1, las siguientes figuras muestran el aumento del cloro residual hasta el mediodía. A partir de la 1:00 p.m. hasta las 11:00 p.m. la concentración tiende a estabilizarse en toda la red debido al pico de consumo durante la tarde y noche por la demanda de turistas y visitantes que recibe el municipio para final de año.



**Figura 33.** Niveles de cloro 9:00 a.m. ( $K_w, K_b: -0.55$ ) (F: -2.51).  
 Fuente: elaboración propia.



**Figura 36.** Niveles de cloro 11:00 p.m. ( $K_w, K_b: -0.55$ ) (F: -2.51).  
 Fuente: elaboración propia.

### C. Escenario 3

El resultado de la modelación para el escenario 3 muestra en las figuras 37 y 38 presiones inferiores a 5 m.c.a para las zonas 2 y 3. Por esta razón, las presiones negativas impedirán el suministro del servicio consecuente a la inexistencia de cloro residual.



**Figura 34.** Niveles de cloro 12:00 p.m. ( $K_w, K_b: -0.55$ ) (F: -2.51).  
 Fuente: elaboración propia.



**Figura 37.** Mapa de contorno demanda base de 2040.  
 Fuente: elaboración propia.



Figura 38. Mapa de contorno presiones para 2040.

Fuente: elaboración propia.

## IV. CONCLUSIONES

Producto de la elaboración de los modelos en la investigación, se determinó que la tendencia para el comportamiento de cloro residual libre, teniendo en cuenta los parámetros hidráulicos indicados en la red, podrán ser empleado los actores interesados en la optimización del sistema de abastecimiento municipal.

La modelación de la red de distribución para el municipio de Villa de Leyva propone emplear, para los dos escenarios planteados, coeficientes de correlación rugosidad-reacción en la pared de las tuberías ( $F$ ) de -2.88 y -1.99, que calibraron con precisión el modelo de calidad correlacionando la reacción en las paredes de las tuberías y la concentración del cloro.

Según los resultados obtenidos en la simulación, durante los picos de consumo el municipio presenta concentraciones de cloro dentro de los rangos exigidos por la normativa colombiana y la Organización Mundial de la Salud.

La tendencia para el comportamiento en el cloro residual teniendo en cuenta la modelación de los escenarios planteados concluyó que en el municipio la concentración de cloro varía según las demandas unitarias, presiones y el consumo durante el día. Esto se ve reflejado en los picos de consumo donde la presión disminuye y el cloro aumenta, porque al existir una alta demanda de caudal el fluido se transporta con mayor velocidad generando baja reacción con el seno del agua y las paredes de las tuberías.

Los coeficientes de reacción en el seno del agua y en las paredes de las tuberías que calibraron el sistema para el primer y segundo escenario equivalen a -0.65 y -0.4, los cuales se encuentran en los rangos sugeridos por el manual de Epanet.

Analizando el impacto que generó en la modelación el coeficiente de correlación rugosidad-reacción en las paredes de las tuberías ( $F$ ) es considerable e indispensable su variación para calibrar la red, será necesario profundizar con mayor detenimiento la obtención del coeficiente con el fin de evaluar las implicaciones que podrá generar en nuevos modelos de calidad.

## REFERENCIAS

- [1] E. K. Patil & N. Jariwala, "Determination of Wall-Decay Coefficient ( $K_w$ ) for Water Distribution System of Dhule City using EPANET", *International Research Journal of Engineering and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 1199-1204, 2017. Disponible en: <https://n9.cl/otv6u1>
- [2] Organización Mundial de la Salud, *Guías para la calidad del agua potable*, vol. 1, 3ª ed. Ginebra: OMS, 2006. Disponible en: <https://n9.cl/xngm6>
- [3] L. A. Rossman, R. M. Clark & W. M. Grayman, "Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems", *Journal of Environmental Engineering*, vol. 120, no. 4, pp. 803-820, 1994. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1994\)120:4\(803\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1994)120:4(803))
- [4] V. Tzatchkov, V. H. Alcocer Yamanaka y F. I. Arreguín Cortés, "Decaimiento del cloro por reacción con el agua en redes de distribución", *Tecnología y Ciencias del Agua*, vol. 19, no. 1, pp. 41-51, 2004. Disponible en: <https://revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1007>
- [5] A. T. Tiruneh, T. Y. Debesay, S. J. Nkambule, G. C. Bwembya & L. Zwane, "Variable chlorine decay rate modeling of the matsapha town water network using EPANET Program", *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 11, no. 1, pp. 37-52, 2019. Doi: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.111003>
- [6] L. A. Rossman, *EPANET 2. Users manual*. Cincinnati, OH: Environmental Protection Agency (EPA), 2000. Disponible en: <https://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P1007WWU.pdf>
- [7] D. V. Zárate Carranza y J. D. Muñoz Carvajal, "Determinación de las características de reacción de cloro libre en la red de abastecimiento del municipio de Villa de Leyva", tesis Universidad Piloto de Colombia, Bogotá, 2020. Disponible en <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/9390>

- [8] C. N. Haas, “Desinfección”, En American Water Works Association y R. D. Letterman (coords.), *Calidad y tratamiento del agua Manual de suministros de agua comunitaria*, (pp. 917-940). España: McGraw-Hill Interamericana de España S.L., 2002.
- [9] M. C. Vega Sánchez, “Calibración de redes de distribución de agua potable con métodos de inteligencia artificial”, tesis de maestría, Universidad de los Andes, Bogotá, 2007. Disponible en: <http://hdl.handle.net/1992/9718>
- [10] J. C. Powell, J. R. West, N. B. Hallam, C. F. Forster & J. Simms, “Performance of various kinetic models for chlorine decay”, *Journal of Water Resources Planning & Management*, vol. 126, no. 1, pp. 13-20. Doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2000\)126:1\(13\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:1(13))
- [11] P. Jamwal & M. Kumar, “Effect of flow velocity on chlorine decay in water distribution network: a pilot loop study”, *Current Science*, vol. 111, no. 8, pp. 1349-1354. Doi: <https://doi.org/10.18520/CS%2FV111%2FI8%2F1349-1354>
- [12] C. M. Guanuchi Quezada y J. A. Ordoñez Jara, “Evaluación del cloro residual en la red de distribución de agua potable del Cantón Azogues a través de un modelo experimental”, tesis de grado, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2017. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28012>
- [13] R. M. Clark, J. Yang, C. A. Impellitteri, R. C. Haught, D. A. Schupp, S. Panguluri & E. R. Krishnan, “Chlorine fate and transport in distribution systems: Experimental and modeling studies”, *Journal American Water Works Association*, vol. 102, no. 5, pp. 144-155. Doi: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2010.tb10117.x>