

XII Simposio Iberoamericano sobre planificación de sistemas de abastecimiento y drenaje

“LOCALIZACIÓN DE PUNTOS DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE. APLICACIÓN EN BOGOTÁ, COLOMBIA”

Juan Saldarriaga (1), Diego Páez (2), Jessica Bohórquez (3), César Prieto (4), César Jurado (5)

(1) Profesor Titular, 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

(2) Profesor Instructor, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA), Carrera 1 No. 18A-10, Bogotá, Colombia. Email: da.paez27@uniandes.edu.co. Teléfono: 3394949 Ext: 2810

(3, 4, 5) Investigador, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes (CIACUA), Carrera 1 No. 18A-10, Bogotá, Colombia. Email: jm.bohorquez2579@uniandes.edu.co, ce-priet@uniandes.edu.co, c-jurado@uniandes.edu.co, Teléfono: 3394949 Ext: 2819

RESUMEN

El presente documento describe dos metodologías planteadas para la localización de Puntos de Monitoreo de Calidad (PMC) de agua en Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP). La primera busca garantizar que la calidad mínima de agua no esté por debajo de los límites en ningún punto de la red, la segunda busca responder a eventos de contaminación puntuales. Estas metodologías fueron aplicadas exitosamente en la RDAP de la ciudad de Bogotá, Colombia (aproximadamente 8'000.000 habitantes). Los resultados evidencian que ambas metodologías son confiables y que el diseño de la red de PMC depende del objetivo que se quiere optimizar.

Palabras claves: Calidad de agua, cloro residual, puntos de medición de calidad, redes de distribución de agua potable, Colombia.

ABSTRACT

This paper describes two methodologies to determine the location of water Quality Sampling Points (QSP) in Water Distribution Systems (WDS). The first one seeks to ensure that minimum water quality doesn't go below normative boundaries in none node, the second one seeks to respond to punctual water contamination events. These methodologies were successfully applied in Bogotá, Colombia's WDS (population of 8'000.000). The results show that both methodologies are trustworthy and the design of QSP nets depends on the objective that wants to be achieved.

Key words: Water quality, chlorine residuals, quality sampling points, water distribution systems, Colombia.

SOBRE EL AUTOR PRINCIPAL

Juan Saldarriaga: Profesor Titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. Área de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Coordinador del Centro de Investigación Estratégica del Agua (CIE-AGUA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes. Director del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados CIACUA del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes.

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Para las Empresas Prestadoras del Servicio (EPS) de agua potable es indispensable garantizar que la calidad del agua entregada a los usuarios sea la adecuada bajo todas las condiciones de operación de la red. Por esta razón es necesario ubicar Puntos de Monitoreo de Calidad (PMC) de agua donde se realizan muestreos periódicos que permitan cumplir con el objetivo anterior. Sin embargo, históricamente estos PMC han sido seleccionados empíricamente sin tener en cuenta la dinámica del cloro residual o los contaminantes en la red.

En la investigación objeto de este artículo se plantearon dos metodologías que permiten escoger los PMC de agua respondiendo a dos problemas típicos de las Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP): por un lado se busca garantizar la calidad del agua medida por un residual de cloro y por otro detectar problemas de contaminación accidental o intencional en la red. En la primera aproximación se debe tener en cuenta que la calidad del agua disminuye a medida que la edad del agua y la distancia de la fuente al punto de consumo aumentan. Para el caso de eventos de contaminación externa existe cierta incertidumbre en el lugar, duración e inicio de estos eventos (Xu et al., 2009) siendo esto vital para determinar la localización de PMC de alerta temprana y el grado de afectación de usuarios.

De igual forma es importante recalcar que la ubicación de PMC que cumplan los objetivos planteados debe ser entendida de manera dinámica pues ésta cambia en el tiempo según el patrón de demandas y el modo de operación de la red en el instante de monitoreo. Eso no significa que las metodologías aquí descritas tengan validez para un único escenario utilizado pues éstas permiten el uso de diferentes conjuntos de datos para cada condición de operación.

Con el fin de garantizar una concentración de cloro residual mínima se han utilizado metodologías para determinar los coeficientes de decaimiento de cuerpo (K_b) y de pared (K_w). Diversos estudios han buscado determinar la importancia de estos coeficientes en la dinámica del cloro dentro de una red de distribución llegando a conclusiones diferentes. Por un lado se encontró que el K_b tiene un mayor efecto en el decaimiento del cloro que el K_w (Chang et al., 2009; Hallam et al., 2003) mientras otros estudios sostienen que ambos coeficientes son necesarios para determinar la cinética del cloro dentro de una red (Vasconcelos et al., 1996).

Por su parte, con el propósito de monitorear eventos de contaminación se han propuesto diferentes modelos de localización de PMC según el objetivo a alcanzar: maximización de la cobertura, minimización de tiempo de viaje del contaminante, minimización del consumo de agua contaminada antes de la detección y optimización del tiempo de detección (Preis & Ostfeld, 2008).

Según esto, el problema abordado es de carácter multiobjetivo donde la resolución de un modelo matemático que permita la localización óptima de PMC es en sí mismo un problema NP duro (Xu et al., 2008; Krause et al., 2006). Diferentes autores han propuesto aproximaciones para resolver la anterior problemática como la teoría de grafos (Xu et al., 2008), modelos de optimización determinística (Krause et al., 2006), modelos de optimización estocástica y modelos de optimización robustos (Xu et al., 2008).

Teniendo todo lo anterior en cuenta, el objetivo de este estudio se centra en proponer las metodologías apropiadas para la localización de PMC en RDAP, con condiciones donde los modelos hidráulicos están calibrados pero los modelos de calidad de agua tienen alta incertidumbre pues no se conocen los parámetros K_b y K_w .

TEORÍA DE LA CALIDAD DEL AGUA

Un modelo de simulación de la calidad del agua debe estar acoplado a un modelo hidráulico calibrado de la red y se basa en la suposición de una mezcla completa del soluto. Este tipo de modelo fue desarrollado por Clark & Coyle (1990), Rossman et al. (1994) y estudiado por Rossman (2000). En este se tiene en cuenta que el transporte convectivo en las tuberías es descrito por la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -u_i \frac{\partial C_i}{\partial x} + R(C_i) \quad (1)$$

donde C_i es la concentración (ML^{-3}) en la tubería i siendo función de la distancia x y del tiempo t , u_i es la velocidad del flujo (LT^{-1}) en la tubería i y R es la velocidad de reacción ($ML^{-3}T^{-1}$) como una función de la concentración. Igualmente, el modelo tradicional considera la mezcla completa e instantánea en los nudos así:

$$C_{salida} = \frac{\sum_{j=1}^n Q_j C_j}{\sum_{j=1}^n Q_j} \quad (2)$$

donde C_{salida} es la concentración de salida del nodo (ML^{-3}), n es la cantidad de tuberías o flujos de entrada, Q_j es el caudal de entrada en la tubería j (L^3T^{-1}) y C_j es la concentración de entrada de la tubería j (ML^{-3}).

Teniendo en cuenta que para los objetivos de monitoreo de la calidad del agua se debe conocer la cinética de reacción del cloro en la red, determinar la variación de la concentración con respecto al tiempo se modela por medio de una cinética exponencial de primer orden (Clark & Coyle, 1990):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -KC \quad (3)$$

donde C es la concentración de cloro a la entrada de la tubería (ML^{-3}) y K es el coeficiente de reacción (T^{-1}) que se expresa en términos de los coeficientes K_b y K_w así:

$$K = K_b + \frac{K_w * K_f}{r_h (K_w + K_f)} \quad (4)$$

En la expresión anterior K_b es el coeficiente de decaimiento de cuerpo (T^{-1}) que varía en función de la cantidad de agua proveniente de cada fuente en una tubería específica de la RDAP; K_w el coeficiente de pared (LT^{-1}) que solamente depende del material de la pared de la tubería; K_f es el coeficiente de transferencia de masa desde el interior del fluido hacia las paredes (LT^{-1}) y r_h es el radio hidráulico de la tubería (L).

Por su parte, el coeficiente de transferencia de masa es proporcional al número adimensional de Sherwood y a la difusividad del cloro:

$$K_f = \frac{Sh * d}{D} \quad (5)$$

dado que la velocidad de decaimiento depende de que tan rápido llegue el cloro a las paredes de la tubería, en la ecuación anterior Sh es el Número de Sherwood (cociente entre la transferencia de masa por convección y difusión), D es el diámetro de la tubería (L) y d es la difusividad molecular del reactivo (L^2T^{-1}) que para el caso del cloro se encuentra entre 1.2×10^{-9} y 1.4×10^{-9} m^2/seg .

METODOLOGÍA

En esta sección se describen las metodologías propuestas para determinar los PMC de agua teniendo en cuenta los dos objetivos principales que se quieren cumplir: asegurar que la calidad mínima

del agua se cumpla en toda la RDAP o detectar a tiempo diferentes eventos de contaminación que pudieran presentarse ya sean de carácter accidental o intencional.

Aseguramiento de Calidad Mínima

La concentración de cloro en una RDAP decae una vez que el agua sale de la planta de potabilización; por lo tanto, en los sitios más alejados de la planta la concentración del cloro residual puede estar por debajo de cierto umbral exponiendo al agua al aumento de niveles bacterianos. Estos cambios en la concentración del cloro son resultado de la convección y la reacción química o bioquímica entre el cloro, el agua, las paredes de la tubería y los microorganismos (Tzatchkov, 1996)

Así, un análisis basado en la concentración mínima de cloro residual debe tener en cuenta el decaimiento con el tiempo y la distancia desde la fuente, de tal forma que los nudos que se encuentran aguas abajo representen la calidad mínima de sus nudos aguas arriba.

La metodología para localizar óptimamente los PMC de agua para garantizar el cumplimiento de la calidad mínima del agua en todos los nudos de la red se presenta en la Figura 1.

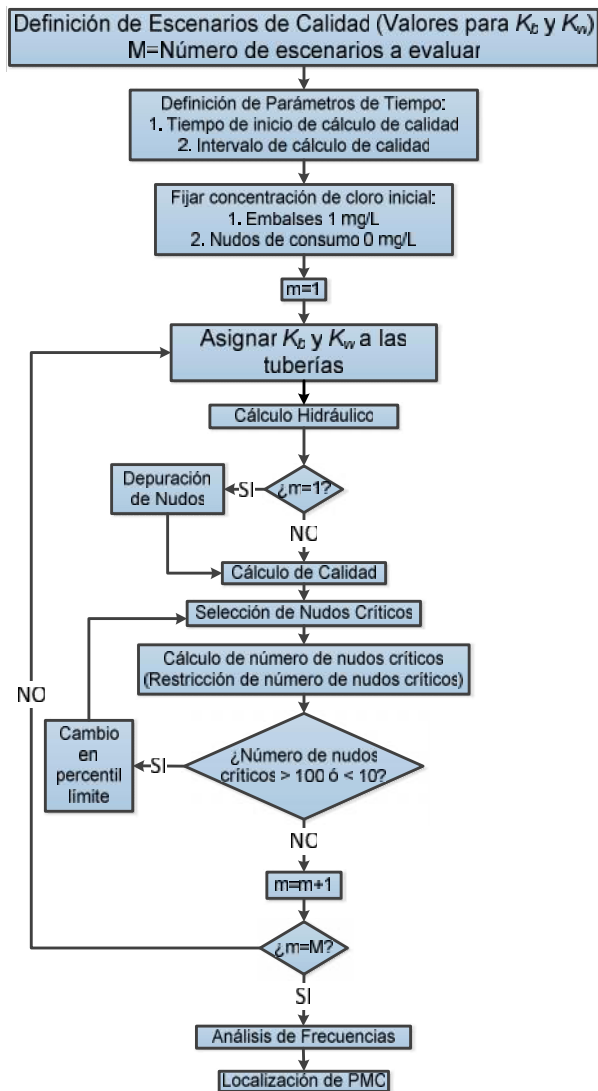


Figura 1. Metodología Calidad Mínima.

El primer paso de la metodología busca determinar los escenarios de calidad que se utilizarán para describir el comportamiento de la concentración de cloro residual en la RDAP. La definición de estos escenarios está asociada principalmente con los valores de K_b y K_w para cada tubería del sistema. La metodología está planteada para que los escenarios de calidad propuestos estén basados en coeficientes K_b y K_w conocidos o por el contrario estén sustentados en algunas pocas mediciones como fue el caso de la aplicación de la metodología en el ciudad de Bogotá, Colombia.

Una vez los escenarios de calidad estén definidos la metodología requiere la determinación de dos parámetros relacionados con el tiempo: el tiempo de inicio para el cálculo de la calidad en la RDAP y el intervalo de cálculo de la calidad en todos los puntos de la red. En el caso del primer parámetro, analizando el comportamiento de varios modelos hidráulicos se estableció como 120 horas a partir del

inicio de la simulación pues en este instante ya se ha estabilizado el cloro en todos los nodos de la red.

Por su parte, el intervalo de cálculo de la calidad del agua en la red para determinar el cloro residual en cada uno de los nodos es un parámetro importante pues está ligado a las limitaciones computacionales propias de la modelación. Entre menor sea el intervalo elegido los tiempo de ejecución de la metodología aumentarán y pueden presentarse diferencias hasta del 42% en los valores de la concentración en algunos nodos.

Para la presente investigación se determinaron intervalos de 1 minuto, 30 segundos y 1 segundo mostrando diferencias como las ya mencionadas en algunos nodos analizados pero en los nodos con menor concentración de cloro no se presentaron diferencias significativas.

Cuando los escenarios y los parámetros ya han sido establecidos, la concentración se fija en 1 mg/L en los embalses y 0 mg/L en el resto de los nodos. Así, comienza la ejecución de cada uno de los escenarios planteados. En principio el procedimiento seguido con cada escenario es el mismo (ver Figura 1): 1) asignación de coeficientes K_b y K_w correspondientes al escenario actual en cada una de las tuberías de la red, 2) ejecución de la hidráulica de la red, 3) cálculo de la calidad del agua, 4) selección de nodos cuya concentración mínima de cloro este dentro del percentil 0.01 y 5) revisión de restricción de número de nodos críticos.

Sin embargo, cuando se evalúa el primer escenario se crea un paso nuevo en medio del 2) y 3). En este caso se evalúan las velocidades en las tuberías de entrada a los nodos de tal forma que aquellos nodos cuyas tuberías de entrada tengan una velocidad menor a 0.005 m/s son descartados del resto del procedimiento pues se consideran nodos sin demanda.

Así, una vez la hidráulica y la calidad del agua se conocen se pueden seleccionar aquellos nodos cuya concentración es inferior al percentil 0.01 de todos los nodos del modelo. Si en algún caso, los nodos considerados “críticos” para cierto escenario son menos de 10 o más de 100 nodos la metodología ajusta el percentil límite para cumplir con el rango de nodos críticos permitidos. Esto es lo que se conoce en la Figura 1 como restricción de número de nodos críticos.

El último paso de la metodología reúne los resultados de todos los escenarios evaluados. En el

análisis de frecuencias se determina en qué proporción los nudos críticos se repitieron en los resultados de varios de los escenarios analizados. Los nudos que hayan sido catalogados como críticos en la mayoría de los escenarios de calidad son aquellos donde la metodología recomienda ubicar un PMC de agua.

Detección de Eventos de Contaminación

En los últimos años ha surgido una preocupación acerca de la posibilidad de eventos de contaminación intencional en las RDAP donde se inyecten cantidades deliberadas de contaminantes químicos y biológicos (Ostfeld et al., 2008). Esta preocupación se debe principalmente a la incertidumbre en el contaminante inyectado y al tiempo y localización de dicha inyección.

Frente a esta problemática se han desarrollado diversas metodologías encaminadas a la identificación de estos eventos de contaminación que también pueden ser accidentales como es el caso del desprendimiento de biopelículas de las paredes de las tuberías y la posterior coloración del agua. Sin embargo, una de las principales dificultades es el desconocimiento *a priori* del lugar donde se va a presentar el evento de contaminación para localizar PMC que respondan adecuadamente a un amplio rango de escenarios de intrusiones.

Para responder a estas dificultades y al hecho que una RDAP es topológicamente compleja, se han desarrollado diferentes herramientas computacionales para facilitar el análisis de estas situaciones. Un ejemplo de esto es el software de acceso libre denominado TEVA-SPOT (Evaluación de la vulnerabilidad ante un conjunto de amenazas y herramientas para la optimización en la localización de sensores, por sus siglas en inglés) desarrollado por la *U.S Environmental Protection Agency EPA, Sandia National Laboratories, Argonne Nacional Laboratory* y la Universidad de Cincinnati en el año 2008.

Este software permite definir los PMC necesarios para reducir el riesgo de incidentes de contaminación bajo el lineamiento de una función objetivo (Murray et al., 2008). Usando como plataforma de cálculo hidráulico a EPANET, se simulan eventos de contaminación suponiendo una inyección de contaminante biológico en algunos puntos del sistema durante 24 horas.

La metodología para determinar la localización de PMC en la ciudad de Bogotá se planteó con base en

el software TEVA-SPOT siguiendo el procedimiento descrito en la Figura 2.

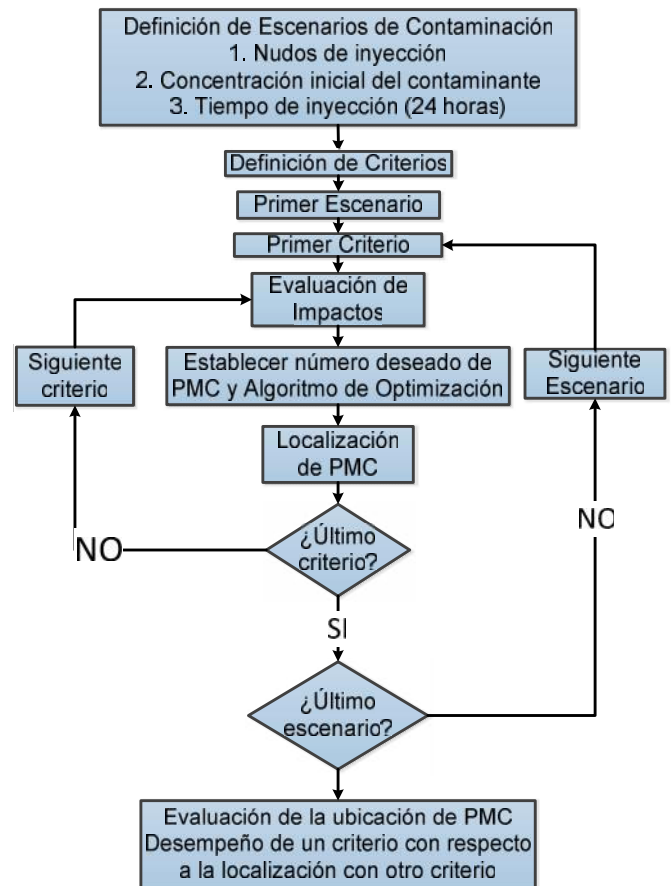


Figura 2. Metodología de Detección de Eventos de contaminación.

El primer paso para desarrollar esta metodología es determinar cuáles son los posibles escenarios contra los que se quiere garantizar protección en la red. Estos escenarios se pueden plantear en todos los nudos de la RDAP, en los nudos de consumo o en algunos nudos específicos. Es necesario establecer la concentración inicial del contaminante y el tiempo de inyección (24 horas).

Cuando los escenarios de contaminación ya se encuentran definidos, el software TEVA-SPOT calcula el impacto de cada evento de contaminación en 8 indicadores: 1) tiempo de detección en minutos; 2) extensión del contaminante en la red; 3) masa consumida en los nudos con demanda; 4) volumen de agua contaminada consumida; 5) número de incidentes no detectados por ningún sensor antes de que la simulación termine; 6) número de individuos expuestos al contaminante; 7) número de individuos que reciben una dosis de contaminante por encima de cierto umbral y 8) número de individuos muertos. El programa genera un informe de resultados donde para cada instante de tiempo determina los nodos

contaminados y el valor del indicador correspondiente.

El tercer paso de la metodología se refiere a la ubicación de los PMC dentro de la RDAP. Indicando el número de sensores que se quieren instalar, el algoritmo de optimización a utilizar (dentro de los cuales se encuentra PICO y GRASP) y el indicador de referencia para la optimización se puede encontrar una solución para la localización de estos puntos. Así, por cada indicador que se esté teniendo en cuenta se obtendrá una ubicación de PMC.

Una vez se tienen las soluciones parciales de la ubicación de los PMC (tomando como referencia los diferentes indicadores), el último paso es de carácter iterativo donde se estudia el desempeño de una solución particular con respecto a los demás indicadores. Por ejemplo, una solución parcial basada en la minimización del tiempo de detección se debe evaluar como solución también para reducir la masa consumida en los nudos de consumo. Este proceso iterativo dirigido por el usuario llevará a la ubicación de los PMC para cumplir con los indicadores que se están teniendo en cuenta.

En caso que se quiera evaluar eventos de coloración del agua por cuenta del desprendimiento de biopelículas (modelado en el software como eventos de turbiedad) el procedimiento es el mismo descrito anteriormente pero utilizando preferiblemente indicadores de umbral máximo como la masa consumida en los nudos.

CASO DE ESTUDIO

Antes de aplicar las metodologías planteadas a la RDAP de la ciudad de Bogotá, Colombia para encontrar la localización de PMC, se desarrolló un proceso de calibración hidráulica de los modelos donde se utilizaron más de 90 puntos de medición de caudal y presión además de mediciones de consumos durante 4 meses. De este proceso se obtuvieron modelos hidráulicos con coeficientes de correlación de 0.85 para las series de presión y 0.90 para las series de caudal.

Igualmente se identificaron 4 configuraciones de operación hidráulica de la red basada en diferentes disposiciones de las 3 plantas de abastecimiento de agua y los 15 tanques principales de la red matriz.

Descripción de la Red

La RDAP de la ciudad de Bogotá está compuesta por tuberías en un rango de 2'' a 78'' considerando la Red Matriz como aquellas tuberías con diámetros

mayores a 14''. Esta Red Matriz tiene una longitud total de 550 Km y se encarga de transportar agua potable desde las tres plantas de potabilización (Tibitoc, Wiesner y El Dorado) ubicadas en diferentes puntos de la ciudad (Ver Figura 3).

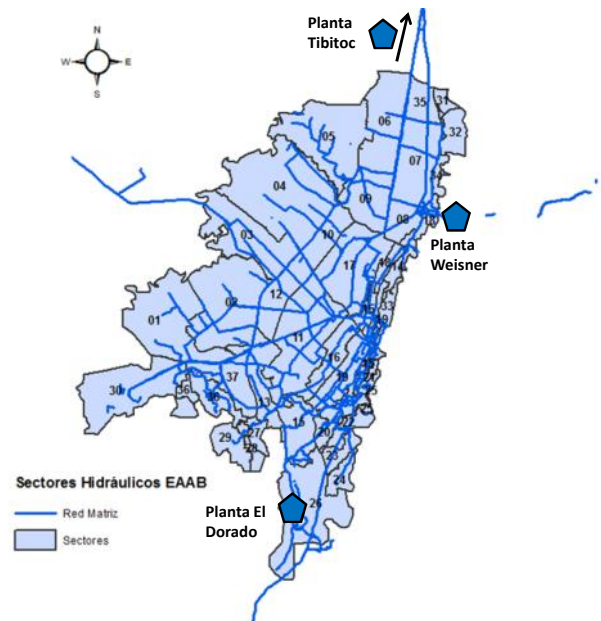


Figura 3. Sectores Hidráulicos y Red Matriz. Bogotá, Colombia.

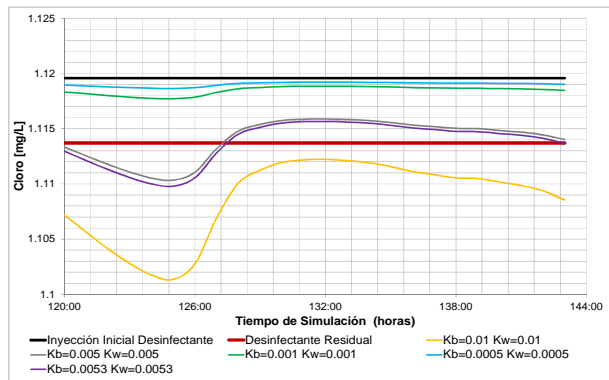
Debido al tamaño y complejidad de la RDAP para la ciudad de Bogotá, ésta ha sido dividida bajo diferentes criterios según cuál sea la necesidad que se tenga. La sectorización de interés para la localización de los PMC es aquella que divide la red en sectores que tienen funcionamiento hidráulico independiente. En total se tienen 37 sectores hidráulicos.

Aplicación de la metodología de Calidad Mínima

Debido a que la RDAP de la ciudad de Bogotá no cuenta con los valores de los coeficientes K_b y K_w , se establecieron 15 conjuntos de valores para estos coeficientes que representan 15 escenarios de calidad diferentes dentro de la red. Estos valores se obtuvieron de una revisión de valores típicos reportados en la literatura los cuales fueron debidamente adaptados a la red de la ciudad de Bogotá mediante análisis de sensibilidad.

Dentro de las configuraciones probadas se tenía el caso donde K_b y K_w toman el mismo valor. Así, se buscaron los valores de los coeficientes que siendo iguales representarían en mejor medida la calidad medida en los pocos PMC instalados en la red. En la

Gráfica 1 se presenta como ejemplo este procedimiento para el Sector 13.



Gráfica 1. Determinación K_b y K_w si toman valores iguales. Sector 13.

Para este sector se encontró que asignar un valor de 0.0053/día al K_b y de 0.0053 m/día al K_w permitiría reproducir las condiciones de calidad medidas en el PMC existente de este sector. Sin embargo, estos coeficientes resultan muy bajos comparados con los reportados en la literatura (Vasconcelos et al., 1996; Chang et al., 2009; Hallam et al., 2003). Frente a esto se plantearon escenarios donde los valores de K_b y K_w son proporcionales entre sí y uno de los dos es dominante frente al otro. Se realizaron múltiples combinaciones teniendo siempre en cuenta que los resultados de decaimiento de cloro concuerden con las mediciones en los PMC existentes.

De esta forma se llegó finalmente a los escenarios presentados en la Tabla 1 donde se tienen las combinaciones de los coeficientes de decaimiento de pared y de cuerpo en los 15 escenarios. Estos fueron aplicados a los 37 sectores hidráulicos de la RDAP de la ciudad de Bogotá.

Tabla 1. Escenarios de K_b y K_w para el desarrollo de la metodología de Calidad Mínima en Bogotá, Colombia.

Escenario	K_b [d^{-1}]	K_w [m^*d^{-1}]
1	0	-0.01
2	0	-0.1
3	0	-1
4	0	-3
5	0	-5
6	-0.1	0
7	-1	0
8	-3	0
9	-5	0
10	-10	0
11	-5	-0.5

12	-1	-0.5
13	-3	-0.5
14	-3	-0.2
15	-3	-1

Una vez definidos los escenarios de calidad, la metodología se aplicó tal como fue expuesta anteriormente.

Aplicación de la metodología de Detección de Eventos de Contaminación

En el caso de la metodología para ubicar PMC de agua bajo diferentes eventos de contaminación es necesario establecer los escenarios de contaminación que serán evaluados. La metodología planteada requiere como dato de entrada la masa inyectada y los nudos en los cuales se inyectará.

Para establecer la sensibilidad de los modelos a la masa de contaminante inyectado se realizaron pruebas donde se inyectaban 50, 100 y 200 mg/L en todos los nudos de consumo. Aunque los resultados numéricos de los impactos varían de escenario a escenario, la localización de los PMC no cambia en forma significativa. Por esta razón se trabajó con un solo escenario de contaminación en el cual se inyectan 50 mg/L del contaminante en todos los nudos de consumo.

Con respecto a los criterios que serán considerados para evaluar los impactos de los escenarios de contaminación, para la aplicación de la metodología en la ciudad de Bogotá se consideró: masa consumida, el tiempo de detección, la extensión de la pluma de contaminación, el volumen de agua contaminada y los incidentes no detectados. A partir de los resultados de estos 5 indicadores y el proceso iterativo descrito en la metodología se llegó a la ubicación de los PMC en la ciudad de Bogotá.

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presenta un extracto de los resultados obtenidos en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Calidad Mínima

Teniendo en cuenta que se evaluaron 15 escenarios diferentes de calidad, el análisis de frecuencia se organizó en rangos definidos así: entre 1 y 3, entre 4 y 6, entre 7 y 9, entre 10 y 12 y entre 13 y 15. Así, los puntos que se encuentran demarcados con rojo corresponden a los nudos donde se presenta

concentración de cloro mínima en una mayor cantidad de escenarios.

La Figura 4 presenta los resultados para el análisis de frecuencia del sector 4 de la RDAP de la ciudad de Bogotá, en el recuadro rojo se presenta un acercamiento a la zona donde se presentan los nudos más críticos.

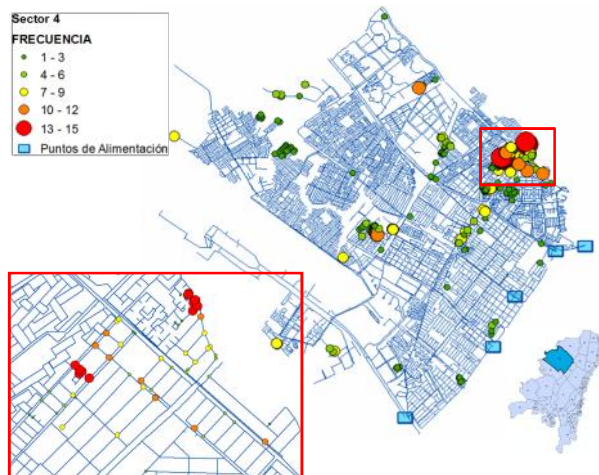


Figura 4. Análisis de frecuencia. Metodología de Calidad Mínima. Sector 4.

Para este sector se encontraron un total de 346 nudos con concentración de cloro menor al percentil 0.01. De éstos, 19 se presentaron como nudos críticos en más de 13 escenarios evaluados; 23 son nudos críticos entre 10 y 12 escenarios; 46 son críticos entre 7 y 9 escenarios; 70 se presentan solamente entre 4 y 6 escenarios y 188 nudos son críticos en menos de 3 escenarios.

Los resultados del Sector 4 muestran que en este caso se presentan dos zonas principales donde se localizan los nudos críticos (en el rango más alto). De estas dos zonas se recomendaría ubicar el PMC en el punto con concentración mínima pues representará a su vez la calidad del resto de la zona.

Por su parte, en la Figura 5 se presentan los resultados del análisis de frecuencias para el Sector 17 y en la Figura 6 los del Sector 29.

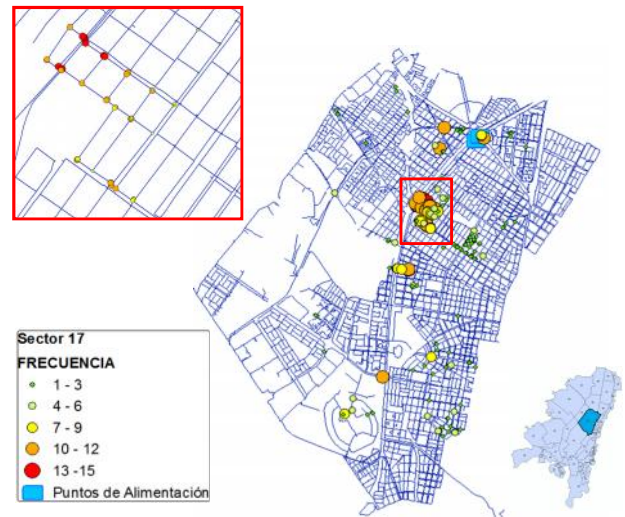


Figura 5. Análisis de frecuencia. Metodología de Calidad Mínima. Sector 17.

En el Sector 17 se presentaron 327 nudos dentro del percentil 0.01 en algún escenario de calidad. Dentro del primer rango de frecuencias (de 1 a 3 escenarios) se encontraron 192 nudos; de 4 a 6 escenarios se encontraron 48 nudos; en el rango de 7 a 9 escenarios hay 28 nudos críticos; de 10 a 12 escenarios se presentaron 44 nudos y en el rango más alto (de 13 a 15 escenarios) hay 15 nudos.

Para este sector se encontró que la zona donde se presentan los nudos críticos en la mayoría de escenarios no se ubica topológicamente lejos de los puntos de alimentación del sector. Esto valida la utilización de la metodología pues considerar la distancia topológica como criterio de localización de PMC podría inducir errores.

En el último sector del cual se muestran resultados, el Sector 29 se encontraron 150 nudos críticos. En el rango de 1 a 3 escenarios se tienen 59 nudos; de 4 a 6 escenarios se encuentran 42 nudos; de 7 a 9 escenarios los resultados arrojan 37 nudos; entre 10 a 12 escenarios se tienen 7 nudos y dentro del rango más crítico se encuentran 5 nudos.

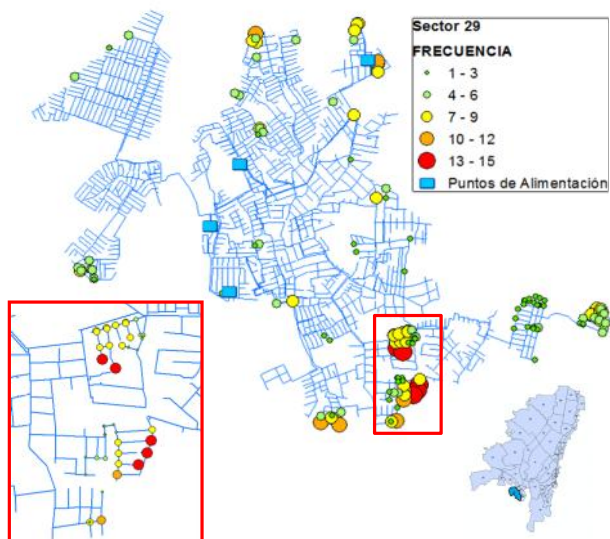


Figura 6. Análisis de frecuencia. Metodología de Calidad Mínima. Sector 29.

El sector 29 presenta dos zonas con nudos críticos. En general, los PMC localizados se encuentran en zonas donde el agua debe recorrer un camino considerable para llegar a los nudos de consumo sin importar si la distancia topológica es corta. Igualmente los resultados encontrados no sugieren ubicar un PMC en cada nudo dentro del rango más alto; la metodología señala zonas donde sería recomendable monitorear la calidad del agua.

Detección de Eventos de Contaminación

Considerando los criterios escogidos para determinar la localización de PMC con la metodología de detección de eventos de contaminación, a continuación se presentan los resultados para tres sectores de la ciudad de Bogotá. Se presentan los resultados del Sector 12, 16 y 20. Por cada uno de los indicadores se ubicaron tres sensores, para un total de 15 PMC en cada sector.

Cabe anotar que en algunos archivos no fue posible realizar la ubicación de sensores debido a su gran tamaño. Este problema se presentó para los Sectores 3, 4, 11, 17, 19, 23, 26. Para los sectores de gran tamaño, es recomendable realizar cortes de los modelos; de tal manera, que se pueda analizar por subsectores hidráulicos.

Dentro de los resultados que se presentan para los diferentes sectores que pudieron ser analizados, se puede observar que algunos sensores tienen puntos en común para ciertos indicadores. Generalmente, los sensores ubicados para minimizar tiempo de detección, masa consumida en los nodos y número de incidentes no detectados tienen a lo sumo 1 sensor en común.

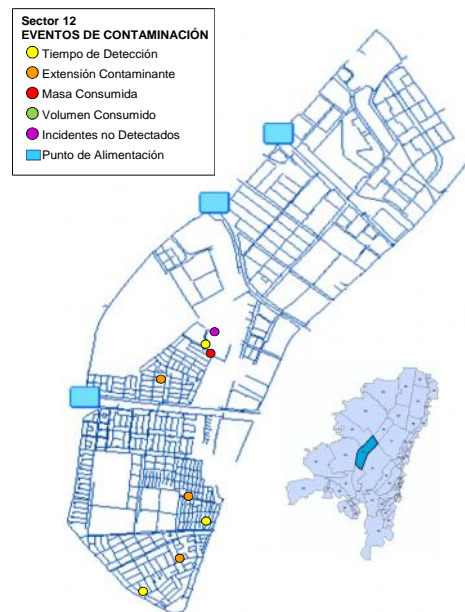


Figura 7. Localización de PMC. Metodología de detección de eventos de contaminación. Sector 12.

La Figura 7 presenta los PMC obtenidos para el Sector 12. Se encontraron 8 puntos diferentes ubicados en su mayoría en la parte inferior del sector. Esto se debe principalmente a que en esta zona hay mayor cantidad de tuberías y la forma como TEVA-SPOT selecciona los PMC le da prioridad a zonas con éstas características.

Para el caso de sectores donde los PMC resultantes estén concentrados en una zona específica del sector se recomienda dividir el análisis en varios subsectores (cada uno con un punto de alimentación) para obtener PMC distribuidos de forma más uniforme en el sector.

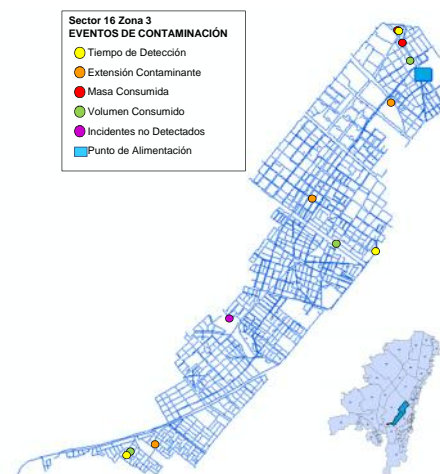


Figura 8. Localización de PMC. Metodología de detección de eventos de contaminación. Sector 16.

Por su parte, en la figura anterior se encuentran los resultados para el Sector 16. En éste sector se ubicaron un total de 12 PMC diferentes distribuidos a lo largo de todo el sector. Los PMC obtenidos de acuerdo a la optimización del Volumen Consumido difieren en mayor medida de los demás pues se presentan 3 PMC independientes de las otras soluciones.

En último lugar, en la Figura 9 se presentan los PMC del Sector 20. Se obtuvieron 11 PMC diferentes teniendo en cuenta los cinco indicadores ya mencionados. Los resultados para este sector muestran que no hay un solo indicador capaz de ubicar los mejores PMC pues en este caso se tienen dos puntos diferentes cuando se considera tiempo de detección, extensión del contaminante, volumen consumido y un punto independiente para los incidentes detectados y la masa consumida.

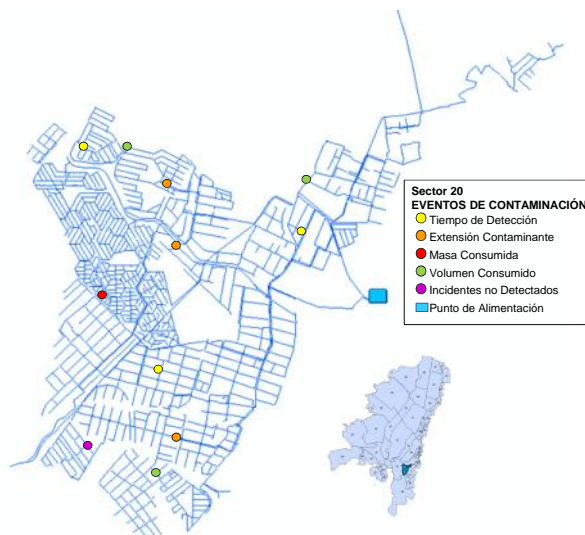


Figura 9. Localización de PMC. Metodología de detección de eventos de contaminación. Sector 20.

Comparación de Metodologías

Una vez se desarrollaron las dos metodologías en los 37 sectores estudiados, es importante realizar una comparación entre los dos resultados obtenidos. Como ejemplo se toma el Sector 10 presentando en la Figura 10 el análisis de frecuencia para la metodología de Calidad Mínima y en la Figura 11 los PMC utilizando la metodología de detección de eventos de contaminación.

A simple vista se puede observar que los PMC localizados con la metodología de Calidad Mínima no coinciden con los PMC de la metodología de detección de eventos de contaminación. Mientras los PMC de la primera metodología se ubicaron en la

parte superior del sector, en la segunda los puntos se ubicaron en la parte media e inferior.

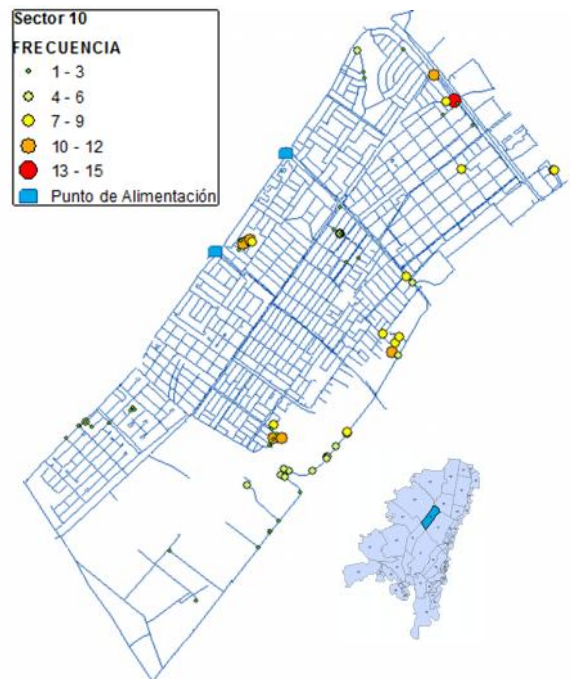


Figura 10. Análisis de frecuencia. Metodología de Calidad Mínima. Sector 10.

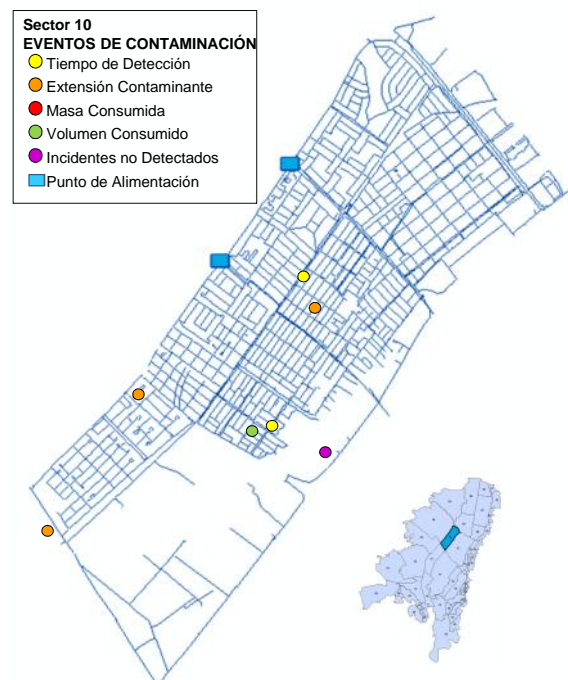


Figura 11. Localización de PMC. Metodología de detección de eventos de contaminación. Sector 16.

Así, en el momento de tomar una decisión operacional acerca de la ubicación de los PMC es importante determinar cuál es el primer objetivo a cumplir y de acuerdo a eso utilizar la metodología pertinente.

CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta todos los análisis realizados, la conclusión más importante es que los valores de K_b y K_w no tienen influencia significativa en la localización de PMC en RDAP.

Las dos metodologías implementadas implican la existencia de un modelo hidráulico calibrado de la red. Por consiguiente, las EPS deben dar este paso antes de escoger en forma precisa sus PMC.

La metodología de Calidad Mínima permite, a partir de un modelo hidráulico calibrado, obtener los puntos críticos que presentan mayor decaimiento de cloro para distintos escenarios de coeficientes de decaimiento. Es importante resaltar que los resultados obtenidos no indican la ubicación exacta ni el número de PMC; se generan una serie de opciones a partir de las cuales la EPS decide su ubicación definitiva.

En cuanto a la metodología para la detección de eventos de contaminación, TEVA-SPOT se presenta como una herramienta confiable que permite de manera rápida determina la ubicación de los PMC. Según los análisis realizados se obtuvo que la localización óptima de PMC que minimice el tiempo de detección, la masa consumida y el número de incidentes no detectados comparten varios puntos en común. Por el contrario, al realizar la evaluación para minimizar la extensión del contaminante o el volumen consumido, se puede observar un aumento significativo en el impacto promedio de cada indicador.

Finalmente, es de vital importante aclarar que las diferentes configuraciones de PMC obtenidas en este estudio, corresponden a un modo de operación específico del sistema el cual es determinado por los modelos hidráulicos. Un cambio en el modo de operación implicaría un cambio en la hidráulica del sistema y por lo tanto la configuración de PMC cambiaría según las nuevas condiciones de flujo.

Luego, es necesario que el diseño de redes de PMC se entienda con un proceso dinámico que obedece a condiciones hidráulicas de un momento en partículas y que la red de estos sensores debe ser diseñada tantas veces como modos de operación se tengan en el sistema. Esto por supuesto implica costos muy altos, así que lo recomendable es tratar de mantener las condiciones hidráulicas similares en el tiempo, evitando los cambios significativos de operación en la RDAP.

BIBLIOGRAFÍA

- Chang, K., Liang Gao, et al. (2009) "Water quality comprehensive evaluation method for large water distribution network based on clustering analysis". Proceedings of Computer and Control in the Water Industry 2009, Eds. Boxall J. and Maksimovic C., Taylor & Francis.
- Clark, R.M. & Coyle, J.A. (1990) "Measuring and modeling variations in distribution system water quality". American Water Works Association, 2, pp. 46.
- Hallam, NB., Hua, F., West, JR., Foster, CF., Simms, J. (2003) "Bulk decay of chlorine in water distribution systems" Journal of Water Resources Planning and Management-ASCE. 129(1), pp. 78-81.
- Krause, A., Leskovec, et al. (2006) "Optimizing Sensor Placements in Water Distribution Systems Using Submodular Function Maximization" WDSA Symposium 2006, pp. 1-17.
- Murray, R., T. Baranowski, et al. (2008) Risk reduction and sensor network design. WDSA Symposium, Kruger National Park, South Africa.
- Ostfeld, A., Uber, J., et al. (2008) "The Battle of the Water Sensor Networks (BWSN): A Design Challenge for Engineers and Algorithms." J. Water Resour. Plann. Manage., 134(6), pp. 556-568.
- Preis, A. and Ostfeld, A. (2008) "Multiobjective Contaminant Sensor Network Design for Water Distribution Systems." J. Water Resour. Plann. Manage., 134(4), pp. 366-377.
- Rossman, L.A., Clark, R.M. & Grayman, W.M. (1994) "Modeling Chlorine Residuals in Drinking Water Distribution Systems". Journal of Environmental Engineering, ASCE, 1210 (4), pp. 803.
- Rossman, L.A. (200) Epanet 2 Users Manual. Cincinnati: EPA United States Environmental Protection Agency.
- Tzatchkov, V. G. (1996) "Modelo numérico del decaimiento del cloro en redes de agua potable con flujo no permanente". Ingeniería hidráulica en México. 11(3), pp. 53-60.
- Vasconcelos, J. J. et al. (1996) "Characteristics and modeling of chlorine decay in distribution systems" AWWA Research Foundation, Denver.
- Xu, J., Fischbeck, et al. (2008) "Identifying Sets of Key Nodes for Placing Sensors in Dynamic Water Distribution Networks." J. Water

Resour. Plann. Manage., 134(4), pp. 378–385.

Xu, J., M. J. VanBriesen, et al. (2009) “Decision making under information constraints”. World Environmental and Water Resources Congress. ASCE. Kansas City, Missouri, USA.