

Uso de las purgas programadas como herramienta para la mejora de la calidad del agua en la red de agua potable de la ciudad de Valencia

Improving water quality by means of programmed flushing in the drinking water network of Valencia (Spain)

Christiand Olortegui-Artica ^{a1}, F. Javier Martínez-Solano ^{a2*}, Carmen Sánchez-Briones ^b, Pedro L. Iglesias-Rey ^{a3}

^a Dep. Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universitat Politècnica de València (España),

^b Global Omnium, Valencia (España).

E-mail: ^{a1}cholar@cam.upv.es, ^{a2*}jmsolano@upv.es, ^bcsbriones@emivasa.es, ^{a3}piglesia@upv.es

*Autor para correspondencia

Recibido: 20/12/2023

Aceptado: 08/03/2024

Publicado: 30/04/2024

Citar como: Olortegui-Artica, C., Martínez-Solano, F.J., Sánchez-Briones, C., Iglesias-Rey, P.L. 2024. Improving water quality by means of programmed flushing in the drinking water network of Valencia (Spain). *Ingeniería del agua*, 28(2), 106-122. <https://doi.org/10.4995/la.2024.20908>

RESUMEN

El acceso al agua potable en cantidad y calidad aceptable es uno de los derechos reconocidos por la ONU y la OMS. De hecho, está explícitamente recogido en el Objetivo de Desarrollo Sostenible ODS 6, Agua Limpia y Saneamiento. Si bien en la Unión Europea este objetivo se considera alcanzado, en algunos casos ha habido problemas relacionados con la calidad del agua. La implantación de sistema de control de fugas mediante la sectorización trae como consecuencia la aparición de ramales sin salida en los que el agua puede permanecer largo tiempo sin apenas movimiento. Los altos tiempos de residencia del agua en estas zonas favorece la desaparición del desinfectante, la formación de subproductos de la desinfección y el crecimiento de biopelícula. En estas condiciones, los ramales son más susceptibles al incumplimiento en los monitoreos de calidad de agua. Aparte de los tratamientos de desinfección aplicados en las plantas, hay otras estrategias que permiten mejorar la calidad del agua potable en los puntos de consumo, las cuales se van a estudiar en el presente trabajo. Una de estas estrategias es la utilización de purgas controladas de agua que permitan la renovación en los puntos de estancamiento. Estas purgas implican una pérdida de agua que, en un país con déficit como es el caso español, deben reducirse al máximo. En este trabajo se comparan tres métodos para determinar el volumen mínimo de agua de purga necesario para mantener un objetivo de calidad en niveles aceptables. Los resultados muestran que la combinación de un método tradicional basado en el gradiente de mejora, combinado con un método heurístico como es el *Simulated Annealing* puede ser una buena opción para alcanzar este objetivo.

Palabras clave | purgas en redes; redes de suministro; modelo hidráulico; modelación de la calidad del agua.

ABSTRACT

Access to an adequate quantity and quality of drinking water is one of the rights recognized by the United Nations (UN) and the World Health Organization (WHO). In fact, it is explicitly outlined in Sustainable Development Goal 6 (SDG 6), Clean Water and Sanitation. While in the European Union, this goal is considered achieved, there have been issues related to water quality. The implementation of pressure management strategies to control leakages by defining district metering areas leads to dead-end branches where water can remain stagnant for a long time with minimal movement. Large residence times of water in these areas contribute to the decay of disinfectants, the formation of disinfection by-products, and the growth of biofilm. Under these conditions, branches are more susceptible to non-compliance with water quality monitoring. In addition to disinfection treatments applied in plants, there are other strategies to improve the quality of drinking water at consumption points, which will be studied in this work. One of these strategies is

the use of water flushing that allow renewal of water at stagnation points. These flushes involve water loss which, in a water-deficient country such as Spain, must be minimized. This study compares three methods to determine the minimum volume of flushed water needed to maintain a quality target at acceptable levels. The results show that the combination of a traditional method based on the improvement gradient, combined with a heuristic method such as Simulated Annealing, can be a good option to achieve this goal.

Key words | *flushing; water distribution networks; hydraulic model; water quality model.*

INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable en cantidad y calidad aceptable es uno de los derechos reconocidos por la ONU y la OMS. De hecho, está explícitamente recogido en el Objetivo de Desarrollo Sostenible ODS 6, Agua Limpia y Saneamiento (United Nations, 2015). Las empresas que se dedican a dar el servicio de agua potable tienen que cumplir con las regulaciones de calidad. Los parámetros que regulan la calidad del agua dentro de la Unión Europea se establecieron en la Directiva 98/83/CE del Consejo Europeo. En el caso de España, la calidad del agua está regulada por el Real Decreto 3/2023 (Ministerio de la Presidencia, 2023). Estas normativas buscan garantizar la calidad del agua para el consumidor. Para ello se recurre a distintas estrategias. Así por ejemplo, en algunos países de Europa (Países Bajos, Alemania, Austria, ...) se utilizan tratamientos intensivos que incluyen depuración mediante radiación ultravioleta. En el caso de España es más frecuente el uso de una dosis residual de desinfectante en la red de distribución de agua, habitualmente cloro (Vidal *et al.*, 1994). Sin embargo, a medida que el agua fluye en la red, la calidad de esta se va deteriorando. Este decaimiento se debe a diversos factores, entre los que destacan la materia orgánica contenida en el agua, la presencia de biopelículas en las paredes de las tuberías, el tiempo de permanencia o la temperatura (Agudelo-Vera *et al.*, 2020). De entre todos los factores anteriores, el tiempo de permanencia se ve afectado principalmente por la hidráulica de la red. Por esta razón, las zonas terminales del sistema son conocidas por su baja calidad.

Los ramales sin salida, también conocidos como fondos de saco, tienen altos tiempos de residencia del agua, lo que favorece a la desaparición del desinfectante, formación de subproductos de la desinfección y acumulación de biopelícula (Abokifa *et al.*, 2017). En estas condiciones, los ramales son más susceptibles al incumplimiento de los estándares de calidad de agua. Existen diferentes medidas para aumentar las concentraciones de los desinfectantes. Por una parte, se pueden disponer puntos intermedios de adición de desinfectante que aumenten la concentración en aquellos puntos donde sea necesario (Boccelli *et al.*, 1998). Por otra parte, se puede incrementar el flujo de agua y la consiguiente velocidad de circulación mediante la realización de purgas, bien manuales, bien automáticas (Friedman *et al.*, 2002). Agudelo-Vera *et al.* (2020) proponen controlar la temperatura del agua que circula por las tuberías de forma que se ralenticen las reacciones químicas en las que interviene el desinfectante. Resulta evidente que cada técnica presenta ventajas e inconvenientes. Así por ejemplo, la inclusión de puntos adicionales de cloración lleva asociado un desembolso económico importante, el uso de purgas periódicas implica un incremento en el gasto de agua y la reducción de temperatura en las tuberías puede representar un gasto energético inasumible en zonas cálidas.

Sea cual sea la estrategia utilizada, parece evidente que es necesario tener un perfecto conocimiento tanto de la hidráulica de la red como del comportamiento de los desinfectantes y, en su caso, de los subproductos. Aquí, los modelos de calidad del agua juegan un papel muy importante (López-Jiménez *et al.*, 2003). Quizás la herramienta más utilizada para analizar la calidad del agua en las redes de distribución la aporta el modelo EPANET (Rossman, 2000).

En el presente trabajo se va a analizar el uso de las purgas automáticas como herramienta para el control de la calidad del agua. Se puede definir una purga como una extracción de agua de la red (periódica o puntual) cuyo objetivo es limpiar de sedimentos las tuberías y controlar el crecimiento de la biopelícula interna (Rossman, 2000). También permite reemplazar agua estancada por agua con contenido de desinfectante. Inicialmente, las purgas se plantearon como una solución de emergencia ante un evento intencionado o no de contaminación del agua potable. Así, Baranowski y LeBoeuf (2008) plantean las purgas como una estrategia alternativa al aislamiento de un sector de la red cuando se detecta la presencia de contaminantes en la misma. Alfonso *et al.* (2010) plantean tres estrategias: aislamiento del contaminante, purga o dilución del mismo. Alcanzan la solución mediante el uso de algoritmos evolutivos, aunque concluyen que el coste computacional es demasiado elevado para una gestión ágil de la emergencia. Poulin *et al.* (2010) plantean el uso de purgas unidireccionales, combinando la purga con una adecuada operación de las válvulas de forma que el caudal siga una trayectoria predeterminada. En todos estos casos, estas acciones responden a una señal de alarma al detectar contaminación en la red. Más recientemente, Rebollo *et al.* (2020) estudian distintas alternativas de purga junto con distintos algoritmos de optimización. En

su informe concluyen que una adecuada estrategia de purgas periódicas mejora ostensiblemente la calidad del agua en la red. Además, señala como clave una adecuada definición del objetivo de calidad perseguido.

Más recientemente, Schück *et al.* (2023) utilizan el tiempo de permanencia del agua en la red como criterio de calidad y proponen un trazado óptimo de las redes interiores para garantizar una adecuada renovación del agua situando las descargas de las cisternas en los extremos finales de la red interior. En la misma línea, Knecht *et al.* (2023) prueban distintas combinaciones de frecuencia de las purgas y tipologías de los aparatos con el fin de reducir la presencia microbiana en las instalaciones domésticas. Las conclusiones a las que llegan ambos estudios es que las purgas periódicas reducen el tiempo de permanencia y mejoran la calidad del agua.

El principal problema asociado a estas purgas radica en que es necesario incrementar la demanda de agua, provocando un consumo excesivo de un recurso habitualmente escaso. Por ello, Rebolledo *et al.* (2020) proponen utilizar algoritmos de optimización que permitan tratar el problema desde un enfoque multiobjetivo de forma que, junto con la calidad del agua, se incluyan otros objetivos como la cantidad de agua necesaria, el coste de implantación, los efectos sobre los consumidores o la reducción del número de hidrantes.

Este estudio se va a realizar en un sector de la red de agua potable de la ciudad de Valencia. La red de agua potable de Valencia se caracteriza por haber sido objeto de una profunda sectorización que ha conducido a reducir notablemente los niveles de fuga (Conejos *et al.*, 2017). Como consecuencia de ello se han reducido los caudales de circulación y las velocidades del agua. Además, han aparecido fondos de saco en aquellos puntos donde se han cerrado tuberías para cerrar sectores. Todo ello ha derivado en eventos de bajo cloro residual en estos ramales sin salida. Entre todas las alternativas estudiadas para incrementar la calidad del agua en la red, se ha optado por utilizar las purgas periódicas. Como esta técnica implica un cierto incremento en el gasto de agua, se plantea optimizar los tiempos de apertura de los hidrantes de forma que el gasto sea mínimo. Además, se utilizarán hidrantes próximos a zonas verdes de forma que en la medida de lo posible el agua purgada tenga un uso secundario y estos volúmenes de agua purgados no se pierdan.

Como se ha visto, el problema de reducir el volumen de agua asociado a las purgas ha sido previamente tratado por varios autores (Rebolledo *et al.*, 2020). Así, Xie *et al.* (2015) plantean una estrategia basada en 43 etapas para reducir el volumen de agua purgado a través de una serie de purgadores automáticos mediante un algoritmo basado en el recocido simulado. Por su parte, Avvedimento *et al.* (2020) plantean una solución similar utilizando cualquier nudo de la red como potencial punto de purga y considerando en este caso una purga continua. En ambos casos las metodologías utilizadas mantienen los puntos de purga abiertos durante toda la simulación. El método propuesto a continuación pretende reducir el volumen de agua limitando el tiempo de apertura de los puntos de purga.

El objetivo principal de este trabajo es la comparación de dos estrategias de reducción del volumen necesario para realizar purgas automáticas mediante la optimización de los patrones de apertura y cierre de unos hidrantes predefinidos como puntos de lavado. Dada la complejidad del problema, como paso previo a la optimización se realizará un estudio preliminar que permitirá reducir el número de hidrantes y, por tanto, de variables de decisión del algoritmo de optimización. Para ello, se han de alcanzar algunos objetivos específicos. En primer lugar, es necesario disponer de un modelo matemático y de calidad de la red que permita reproducir el comportamiento de la calidad del agua a lo largo del día. En este caso, se partirá de un modelo de concentración de cloro pre-existente para adaptarlo a una simulación basada en tiempos de permanencia. A continuación, se realizará un análisis previo de todos los posibles puntos de purga para seleccionar aquellos que presenten mejores resultados para un mismo gasto de agua. Por último, se determinarán las condiciones de caudal, duración y frecuencia de las purgas de forma que se mejore la calidad hasta parámetros aceptables sin malgastar los recursos hidráulicos disponibles.

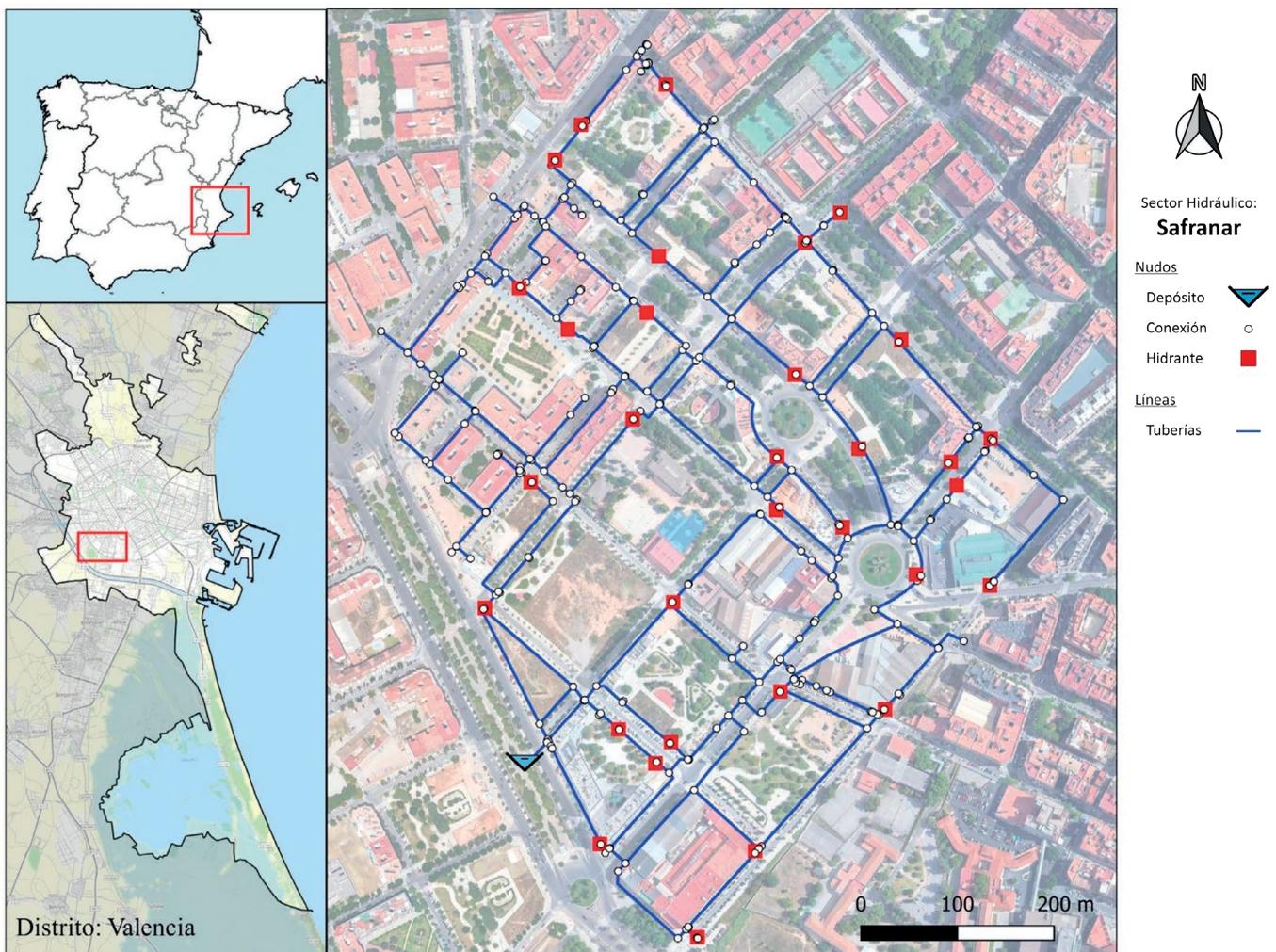
El resultado de este trabajo supone una primera aproximación a la utilización de las purgas programadas como herramienta para mejorar la calidad del agua en sustitución de la adición de cloro. La utilización de hidrantes permite la utilización del agua purgada para otros fines, aunque también supone una limitación del método al no poder garantizar la purga en los puntos donde es más necesaria. Esta técnica puede incorporarse como etapa final en estudios de reducción de fugas como forma de compensar el incremento en los tiempos de permanencia que acarrea la sectorización de las redes como estrategia de reducción de fugas. Es por tanto aplicable a gran parte de los abastecimientos españoles y, en cualquier caso, a redes con gran rendimiento hidráulico como es el caso de la red de Valencia.

MATERIAL Y MÉTODOS

Red objeto de estudio

Para realizar este estudio se ha seleccionado el sector de Safranar en la ciudad de Valencia (Figura 1). Este sector tiene 2248 usuarios registrados, con un 90% de ellos correspondientes a usuarios domésticos y el otro 10% industrial. El caudal medio facturado en el sector es de 6.36 L/s mientras que el caudal inyectado al mismo oscila entre un máximo de 10.83 L/s en el momento de máxima demanda y 2.73 L/s como caudal mínimo nocturno. El sector de abastecimiento de Safranar se ubica al suroeste de Valencia, en el distrito de Patraix. La alimentación se realiza desde el suroeste del sector con agua procedente de la ETAP de El Realón. Esta alimentación está compuesta por una válvula hidráulica que regula la presión en la entrada y el correspondiente caudalímetro. El modelo de la red cuenta con 393 tuberías que suponen 10.7 km. Además, tiene 21 hidrantes y 13 puntos de desagüe hacia el alcantarillado. La red cuenta también con 3 fuentes bebedero que pueden ser utilizadas como puntos de medición de la concentración de cloro residual. En la Figura 1 se observa una representación esquemática obtenida de la base de datos corporativa SIG de la empresa. En esta se observa la ubicación del punto de entrada del agua al sector. En esta figura también se han marcado los hidrantes (cuadrados rojos) que se tomarán como posibles puntos de purga de la red.

Se ha elegido este sector por contar con registros de cloro medidos en varios puntos de la red como resultado de un programa previo de estudio de la calidad del agua en la red. La disponibilidad de estos datos ha servido para validar y calibrar el modelo de



calidad del agua, como paso previo a la utilización de los algoritmos de optimización presentados (Gamón-Olmo, 2020). Como resultado de la calibración realizada en este estudio se obtuvo que el coeficiente de reacción de cloro en el flujo del fluido (k) es de 0.54168 d^{-1} . Este valor se asumió constante e independiente del tamaño o el material de la tubería. Además, se ha medido la concentración de cloro a la entrada del sector, la cual se admitirá prácticamente constante e igual a 0.72 mg/L . Con estos datos, se construyó el modelo de calidad de cloro y, a partir de él, el de tiempos de permanencia que sirve de base para este estudio.

Planteamiento general

El objetivo consiste en resolver el problema de la mala calidad del agua en algunas zonas de la red. Este problema es común en las redes de abastecimiento y en especial de los tramos sin salida o fondos de saco. El problema se agrava por factores que favorecen la permanencia prolongada del agua en estos puntos, tales como el sobredimensionamiento de las tuberías, la sectorización de la red y los bajos consumos en determinadas zonas. Además, el factor estacional influye en los cambios de calidad del agua potable. Modificar estos factores que causan la pérdida de calidad del agua no es tarea sencilla. Por ello, la solución propuesta inicialmente consistía en utilizar los hidrantes de incendio y los desagües como puntos de descarga. A este enfoque se le denomina purgas intermitentes. Esta solución tenía el inconveniente de que las purgas implican necesariamente la pérdida del agua purgada, por lo que finalmente se descartaron los desagües como posibles puntos de purga, limitando éstos a los hidrantes de forma que la purga pudiese aprovecharse para el riego de jardines u otros usos alternativos.

Modelo de calidad del agua

Para poder comprobar el efecto de las purgas sobre la calidad del agua es necesario disponer de un modelo tanto hidráulico como de la calidad del agua. Un modelo de calidad del agua se apoya en los resultados del modelo hidráulico para hacer un seguimiento de cómo varían las concentraciones de un determinado compuesto tanto a lo largo del tiempo como en su movimiento a través de la red. Son muchos los autores que han desarrollado distintos métodos para hacer un seguimiento de la calidad del agua a lo largo de las redes hidráulicas. Zoppou (2001) hace una excelente revisión de los principales métodos utilizados en el seguimiento de sustancias en redes hidráulicas. La ecuación principal, de la cual se derivan el resto de las ecuaciones, es la ecuación que modela los procesos de advección y difusión:

$$\frac{\partial}{\partial t}(A \cdot c) + \frac{\partial}{\partial x}(Q \cdot c) = \frac{\partial}{\partial x}\left(A \cdot \mathfrak{D} \cdot \frac{\partial c}{\partial x}\right) \pm R(x, t, c) \quad (1)$$

En esta ecuación, A es la sección transversal de la tubería, Q es el caudal, c es la concentración de la sustancia objeto de estudio, \mathfrak{D} es la difusividad de la sustancia en el medio y, $R(x, t, c)$ es un término que representa las fuentes o sumideros de dicha sustancia. En general, R será una función que represente la reacción química en la que participa dicha sustancia. Esta ecuación general se puede particularizar para tuberías y para nudos. Así, para tuberías trabajando a presión, se cumple la ecuación de continuidad y tanto el caudal como la sección permanecen constantes. Además, es frecuente despreciar el efecto de la difusividad en comparación la velocidad del flujo (v), quedando:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = \pm R(x, t, c) \quad (2)$$

Para el caso del cloro, con una cinética de reacción de desaparición de primer orden:

$$R(x, t, c) = -k \cdot c \Rightarrow \frac{\partial c}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = -k \cdot c \quad (3)$$

Si para un determinado instante asumimos que el caudal en el interior de la tubería apenas varía:

$$v \cdot \frac{\partial c}{\partial x} = -k \cdot c \Rightarrow c_L = c_0 \cdot e^{-k \frac{L}{v}} = c_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad (4)$$

En esta última ecuación, c_0 es la concentración al inicio de la tubería y c_L al final de la misma, k es la constante de reacción del cloro en el agua, L es la longitud de la tubería, v la velocidad del agua y t el tiempo necesario para que el agua la atraviese.

Por su parte, en los nudos se puede admitir un proceso de mezcla completo y, al no tener capacidad de almacenamiento ni tiempo de retención, la expresión anterior quedaría:

$$\frac{\partial}{\partial x}(Q \cdot c) = \pm R(x, t, c) \quad (5)$$

En los nudos, al no haber variación a lo largo del tiempo, se trata de un simple balance de masas. Por el contrario, en las tuberías se unen el transporte con el movimiento de la sustancia, lo cual complica un poco los métodos de resolución. Estos métodos se distribuyen entre dos comportamientos extremos: el flujo pistón (más conocido como FIFO del inglés *First In First Out*) y el modelo de mezcla completa (Martínez-Solano *et al.*, 2014). La diferencia entre los distintos métodos radica en el tamaño de las porciones en las cuales se admite la mezcla completa, siendo infinitesimal en el primer caso y toda la tubería en el último

En el caso de la ciudad de Valencia, se cuenta con un precedente en el sector Safranar. En un trabajo anterior, en este sector se ha realizado un estudio reciente para mejorar las propiedades organolépticas del agua potable. El estudio emplea un modelo de calidad para predecir el comportamiento del cloro y trihalometanos en la red. El modelo utilizado es el incorporado en el programa EPANET (Rossman, 2000) y se basa en un modelo lagrangiano con discretización en intervalos constantes. Más detalles de este modelo se pueden encontrar en Rossman *et al.* (1994). Al estar realizado sobre cloro, ha sido posible calibrar el modelo mediante la toma de muestras y de esta forma ajustar tanto la distribución de demandas como los coeficientes de reacción del cloro en la red.

Este antecedente se utilizará como base para calibrar un modelo de calidad basado en tiempos de permanencia para el análisis de la calidad del agua. Las purgas implican necesariamente un incremento en el caudal suministrado por la red en determinados momentos del día. Esto supone un volumen de agua cuyo gasto no siempre está justificado desde un punto de vista estrictamente hidráulico. Será necesario reducir tanto como sea posible dicho volumen de agua. Por lo tanto, estamos ante un problema básicamente multiobjetivo con dos objetivos claramente identificables: volumen de agua purgado y mejora obtenida en la calidad del agua. El volumen total de agua desaguado a través de los puntos de purga (V) vendrá dado por:

$$V = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^N Q_i(t) \cdot \Delta t \quad (6)$$

En esta ecuación, $Q_i(t)$ es el caudal de purga desaguado en el hidrante i en el instante t y Δt es la duración de un instante de cálculo.

Por su parte, el segundo objetivo es la propia calidad del agua, la cual se puede medir de diversas formas (concentración media o mínima de cloro residual, tiempos de permanencia, calidad del agua ponderada, etc.). Al tratarse de un problema multiobjetivo, la metodología propuesta consiste en fijar diversos objetivos de calidad y estudiar los volúmenes de agua necesarios para alcanzarlos. De esta forma, el problema se reduce a un problema clásico de optimización en el que la función objetivo queda representada por la Ecuación (6).

Se dispone de abundante información para la confección de los modelos tanto hidráulico como de calidad del agua. En concreto, gracias al trabajo de sectorización realizado en la red, se dispone de información tanto de caudal inyectado en cada sector como de los volúmenes facturados. En este último caso, la implantación de sistemas de micromedición inteligente permite disponer de información con una resolución temporal horaria, lo cual permitirá discriminar la evolución de la demanda tanto a nivel diario como estacional. Para analizar la estrategia de mejora se seguirán las siguientes etapas:

- Se ha partido de un modelo matemático de la red. En este modelo, se ha prestado especial atención al proceso de asignación de consumos de forma que la calibración se ha realizado para garantizar un adecuado ajuste no sólo en términos de presión y caudal, sino también de concentraciones de cloro, para lo cual se han empleado las mediciones existentes.
- Se ha asumido que los únicos puntos a través de los cuales se pueden realizar las purgas son los hidrantes. De esta forma, no es necesario realizar modificaciones en la red y solamente será necesario realizar las maniobras necesarias.

- Se realizará un análisis de sensibilidad de los distintos hidrantes de forma que se prioricen en función de su efecto sobre la calidad del agua. De esta forma, será posible reducir el tamaño del problema.
- Por último, mediante optimización, se determinará dónde y cuándo provocar las purgas para garantizar una cierta calidad del agua en los nudos de consumo de la red.

Para la optimización se han planteado varias alternativas, las cuales se van a comparar en este documento y se describen a continuación. Si bien como se ha mencionado anteriormente estamos ante un problema multiobjetivo, a efectos de comparación se ha fijado como criterio una concentración mínima de cloro. Inicialmente se planteó trabajar con la recomendación del Real Decreto 3/2023 (Ministerio de la Presidencia, 2023), esto es, 0.20 mg/L. Sin embargo, esta concentración se mantiene sin realizar ninguna acción, por lo que se buscó la concentración mínima medida antes del proceso de sectorización y reducción de fugas, que era de 0.32 mg/L. La Ecuación (4) permite relacionar el tiempo de permanencia con el decaimiento del cloro en la red. Por ello, para mantener esta concentración, el tiempo máximo de permanencia en nudos de consumo no debería exceder las 36 horas:

$$c(t) = c_0 \cdot e^{-K \cdot t} \Rightarrow t = \frac{1}{K} \cdot \ln \frac{c_0}{c(t)} = \frac{1}{0.54168} \cdot \ln \left(\frac{0.72}{0.32} \right) = 1.5 \text{ días} = 36 \text{ h} \quad (7)$$

Reducción del espacio de soluciones

Un modelo de calidad del agua es de por sí un problema complejo. Si a eso se le añade que se ha de buscar la solución más adecuada para alcanzar un cierto objetivo de calidad, el problema puede llegar a ser inabordable. Para hacer frente a esta situación, es relativamente habitual utilizar algoritmos heurísticos con una componente estocástica. En este trabajo se compararán dos algoritmos heurísticos: uno basado en un gradiente (Olortegui-Artica *et al.*, 2023) y el ya mencionado recocido simulado (Xie *et al.*, 2015). Ambos algoritmos se compararán con el de búsqueda exhaustiva. Todos ellos presentan un problema común: tienen la desventaja del costo computacional requerido. A medida que el campo de soluciones se incrementa, el coste computacional se incrementará de forma exponencial. Dado el desarrollo de los algoritmos de optimización, el tipo de problemas es cada vez más complejo. Los algoritmos heurísticos no garantizan la obtención del óptimo global, sino de buenas soluciones próximas a él. Por ello, cada vez es más común acompañar dichos algoritmos con estrategias de reducción del espacio de soluciones (Mala-Jetmarova *et al.*, 2018). Así por ejemplo, Ngamalieu-Nengoue *et al.* (2019) optan por deducir el número de opciones disponibles para cada variable de decisión, Bayas-Jiménez *et al.* (2022) por descomponer problemas grandes en problemas más pequeños, o Gutiérrez-Bahamondes *et al.* (2023), que hacen un estudio preliminar para eliminar aquellas soluciones que son claramente irrealizables.

En este caso se parte de la hipótesis de que la calidad del agua se puede gestionar con la apertura y cierre de los potenciales puntos de purga, es decir, los hidrantes. En este sentido, el modo de operación de una purga se define como abierta o cerrada en un horizonte de simulación T . Puesto que la variable de decisión es el estado del hidrante, ésta será de tipo binario (0=cerrado, 1=abierto). Además, al tratarse de una simulación dinámica para una duración T con intervalos de cálculo de duración Δt se tendrán $T/\Delta t$ intervalos de cálculo distintos. Así, para cada uno de los n hidrantes se tendrá un número de soluciones (N) definido por:

$$N = 2^{\left(\frac{T}{\Delta t}\right)^n} \quad (8)$$

Para el caso de estudio expuesto, se tendrían $n=21$ hidrantes. Para una simulación de un día completo ($T=24$ horas) en intervalos de una hora ($\Delta t=1$) se llegaría a tener $N=2^{24 \cdot 21}=5.2 \cdot 10^{151}$ posibles soluciones. Esta cifra justifica por sí sola la necesidad de combinar una estrategia de reducción del espacio de soluciones con el uso de algoritmos heurísticos. Por ello, como paso previo a la utilización de cualquiera de los algoritmos utilizados se ha realizado un análisis de sensibilidad de las posibles soluciones para seleccionar aquellas que tienen más posibilidades de obtener el óptimo.

Se trata de un problema con un número de soluciones muy elevado que precisa de una reducción en su número. Para ello se realizaron dos tandas de simulaciones. En una primera tanda se buscó identificar qué hidrantes son más efectivos para mejorar la calidad del agua y cuáles apenas aportan mejora. Para ello, se planteó extraer un caudal constante (1 L/s) y observar la respuesta de la red ante esta extracción. Se detectó que la calidad general mejoraba con las extracciones, pero en algunos nudos, como

consecuencia de la naturaleza mallada de la red y el cambio en el reparto de caudales, la calidad empeoraba. Por otra parte, la segunda tanda de simulaciones está más orientada a mejorar los algoritmos de gradiente y recocido simulado. Puesto que ambos algoritmos solo actúan sobre un hidrante cada vez, esta segunda tanda buscaba establecer una relación entre los nudos y los hidrantes que más afectaban a un nudo en concreto. Por ello, tras realizar simulaciones en periodo extendido en las que solo se activaba un hidrante se anotaron como parámetros de decisión los siguientes datos:

- Mejora media obtenida en el tiempo de permanencia del agua en la red, para todos los nudos y una duración de un día. Esta mejora se midió como el valor medio del tiempo de permanencia del agua en la red (promedio para una duración de 24 horas e incluyendo todos los nudos de la red).
- Número de nudos que se veían afectados negativamente, esto es, nudos en los que la calidad empeoraba al efectuar una extracción a través del hidrante.
- Nudo en el que mayor era la mejora de la calidad del agua, es decir, nudo más sensible a la purga en cada hidrante.

Como consecuencia de esta información se seleccionaron aquellos hidrantes que presentaban mejores resultados desde el punto de vista de la calidad del agua sin provocar que algún otro nudo pueda empeorar significativamente su calidad. En concreto, se fijó como criterio que el número de nudos afectados negativamente fuese como máximo 3. Además, la mejora media de la calidad en términos en horas se fijó como mínimo en 0.15 horas. El resultado de este primer análisis fue que era posible mejorar la calidad general de la red actuando solo sobre 4 de los 21 hidrantes existentes. De estos 4 hidrantes, los hidrantes HID9 e HID10 estaban muy próximos entre sí y su efecto era muy similar. Como el HID10 afectaba positivamente a un mayor número de nudos (6) se dejó solo este último. En la Tabla 1 se presentan los resultados de ambas tandas de análisis mientras que en la Figura 2 se muestra la ubicación de cada hidrante y el tiempo de permanencia previo a la implantación del programa de purgas.

Tabla 1 | Resultados obtenidos en los análisis previos para la reducción del espacio de soluciones.

Hidrante	Mejora (h)	Nudos beneficiados	Nudos perjudicados
HI_1	0.11	2	3
HI_2	-0.03	0	17
HI_3	0.12	1	12
HI_4	0.15	5	4
HI_5	0.12	0	12
HI_6	0.12	0	8
HI_7	0.10	3	14
HI_8	0.13	2	7
HI_9	0.19	3	2
HI_10	0.20	6	2
HI_11	0.08	4	3
HI_12	0.10	3	5
HI_13	0.03	1	7
HI_14	0.04	2	4
HI_15	0.04	1	17
HI_16	-0.02	0	18
HI_17	0.16	3	3
HI_18	0.13	2	6
HI_19	0.08	0	10
HI_20	0.17	22	1
HI_21	0.11	2	10

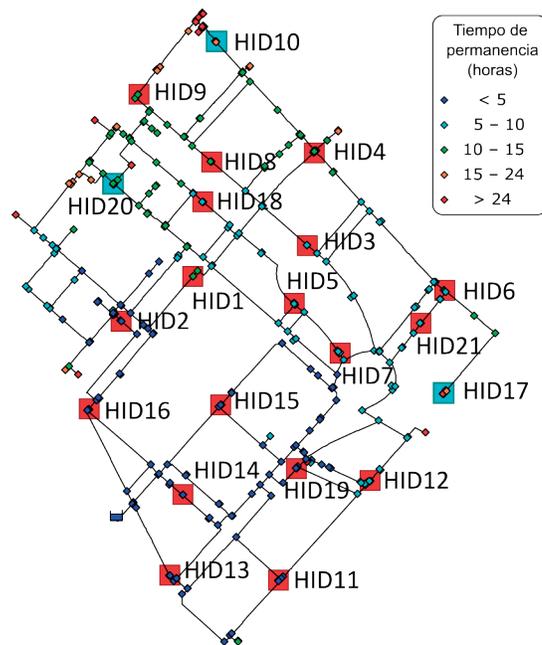


Figura 2 | Ubicación de los hidrantes en la red de Safranar. En color azul, los hidrantes seleccionados tras el proceso de reducción del espacio de soluciones (hidrantes HID10, HID17 y HID20).

En la segunda tanda de simulaciones se completó una tabla de sensibilidad entre hidrantes y nudos de forma que se definió qué hidrantes eran efectivos para mejorar la calidad en cada nudo y cuáles no tenían ningún efecto. Esta información queda recogida en la Tabla 1. Para cada nudo se anotó qué hidrante resolvía mejor sus problemas de calidad (hidrante de referencia). En la tabla antes mencionada, la columna que muestra los nudos beneficiados hace referencia a la cantidad de nudos que tienen a cada hidrante como hidrante de referencia. Se observa que el hidrante HID20 es el que sirve de referencia a un mayor número de nudos. De esta forma, en los algoritmos heurísticos utilizados se utilizará esta información como criterio de decisión para ir mejorando progresivamente la solución.

Optimización por búsqueda exhaustiva

El algoritmo de búsqueda exhaustiva (también conocido como búsqueda secuencial o fuerza bruta, FB) es un método que itera en todas las posibles soluciones de un problema. Este algoritmo puede ser empleado para comparar resultados con algún otro método empleado para la búsqueda de la solución. Quintiliani *et al.* (2019) emplearon este método como base para la comparación de diferentes opciones de optimización de la gestión de válvulas para la mejora de la calidad del agua en redes de distribución. A pesar de ser un método sencillo tiene la desventaja del costo computacional requerido. Por ello este método se ha aplicado al problema reducido resultante del proceso de reducción del espacio de soluciones antes descrito. Tras dicho proceso se seleccionaron 3 hidrantes de los 21 existentes ($n=3$). Además, como consecuencia de este mismo proceso se concluyó que las purgas se pueden concentrar en las 6 primeras horas del día ($T=6$ h) y la duración de una purga se ha fijado en 1 hora ($\Delta t=1$ h). Con estos parámetros, el campo de soluciones es de $N=2^{6 \cdot 3}=262\,144$ posibilidades.

Durante la aplicación del método de la búsqueda exhaustiva se procesan todas las combinaciones posibles, pero solo se guardarán las soluciones que presenten una dominancia en dos objetivos. El primer objetivo es el tiempo de permanencia y el segundo es el volumen de purga. Una solución dominante y, por tanto, válida es la que domina a la anterior en ambos objetivos (mejora simultáneamente ambos). Con este filtrado de soluciones se construirá un frente de Pareto solo para la delimitación del campo de soluciones al problema.

La finalidad de este método es entender la magnitud del problema y tener un punto de comparación con los demás métodos propuestos.

Optimización basada en el gradiente de mejora

En primer lugar, se ha utilizado un método basado en un incremento del volumen de agua purgado. Este método se basa en tres principios:

- Se admite que los puntos de purga están abiertos permanentemente.
- En cada iteración se actúa exclusivamente sobre un hidrante.
- En todos los casos se impone como restricción el cumplimiento de una presión mínima en los nudos con consumo.

El método comienza con una simulación inicial representando la situación actual, sin ninguna purga. En el caso de la red objeto de estudio, esta situación inicial aporta un tiempo de permanencia de 56.92 horas. En cada simulación se localiza el nudo con peor dato de calidad y se incrementa el caudal de la purga en aquel hidrante para el cual el nudo es más sensible. Esta información se obtuvo como resultado de la segunda tanda de simulaciones realizada durante el proceso de reducción del espacio de soluciones. El incremento se hace en base al gradiente de mejora definido como se expresa en la Ecuación (4):

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k \cdot \left[1 - \frac{T_{p,max} - T_p^k}{x \cdot T_{p,max}} \right] \quad (9)$$

En esta ecuación, Q_i^{k+1} y Q_i^k son las descargas medias en las iteraciones actual ($k+1$) y anterior (k), $T_{p,max}$ es el tiempo máximo de permanencia admisible, T_p^k es el tiempo de permanencia calculado para la iteración anterior, y x es un parámetro utilizado para controlar el salto del gradiente. En la expresión el término $x \cdot T_{p,max}$ se emplea para garantizar que la expresión sea positiva y que la capacidad del flujo disminuya a un ritmo adecuado.

El proceso acaba cuando en algún punto de consumo se alcanza una presión inferior a la mínima propuesta o cuando se haya alcanzado el objetivo de calidad buscado. Como resultado de este método se tendrá un volumen de purga diario que se podrá traducir en una duración de apertura de las purgas reales si se calibra adecuadamente el coeficiente de descarga de cada hidrante.

Optimización heurística mediante Recocido Simulado (*Simulated Annealing, SA*)

El algoritmo SA es un algoritmo heurístico propuesto en primer lugar por Kirkpatrick *et al.* (1983). Se basa en imitar el enfriamiento de metales en búsqueda de su estado de mínima energía. La función objetivo representada en la Ecuación (6) representa la energía del sistema. A partir de un cierto estado ($\mathcal{V}^{(k)}$) se obtiene un nuevo estado por búsqueda en sus proximidades ($\mathcal{V}^{(k+1)}$). El algoritmo SA pasa de un estado a otro según una expresión heurística de forma que no se garantiza al 100% que el nuevo estado mejore el anterior. Esto se hace para evitar caer sistemáticamente en los mínimos locales. Esta expresión depende tanto de la diferencia de energía (volumen de purga) entre los dos estados como de la temperatura de enfriamiento (iteración). Así, comenzando por un valor inicial de la temperatura (T_0), esta irá reduciéndose a medida que avanza el algoritmo hasta llegar a un valor final (T_f) que indicará el final del cálculo. Así, en una determinada iteración k se tendrá que la mejora obtenida será $\Delta\mathcal{V} = \mathcal{V}^{(k)} - \mathcal{V}^{(k+1)}$. La nueva solución se acepta si $\Delta\mathcal{V}$ es positiva o si, para un valor aleatorio p entre 0 y 1, se cumple:

$$p < e^{-\frac{\Delta\mathcal{V}}{T_0} \cdot k} \quad (10)$$

El proceso continúa hasta que se alcanzan un cierto número de iteraciones, es decir, hasta que se supera un cierto valor de la temperatura.

Xie *et al.* (2015) propusieron una metodología de optimización para reducir el volumen de purga utilizando EPANET como simulador tanto hidráulico como de la calidad del agua. Esta metodología se apoya en tres fases. Primero determina los caudales máximos que se pueden extraer de cada hidrante sin caer a presiones inferiores a la presión mínima fijada. A continuación, se estima un valor del volumen de purga que permita garantizar un tiempo de permanencia adecuado. En este punto se ha optado por partir de los resultados obtenidos mediante el método del gradiente antes comentado. Por último, se transforman estos volúmenes en un caudal en cada uno de los hidrantes y se ajusta la duración de la apertura de estos. En este último punto se actúa principalmente sobre la secuencia de apertura y cierre de los hidrantes.

Como resultado del método del gradiente se ha obtenido un valor del volumen de la purga para cada hidrante (V_i). Fijado el caudal que es posible descargar desde cada hidrante (Q_i), se puede definir la duración D_i de cada descarga:

$$D_i = \frac{V_i}{Q_i} \quad (11)$$

Sin embargo, no se conoce la distribución de esa duración en el patrón de operación. Para ello se ha definido un patrón de operación a intervalos de valor $\Delta t=1$ h durante un día, es decir, con 24 valores consecutivos. Como punto de partida se crea un primer patrón de operación a partir del instante en que se produce el máximo tiempo de permanencia aleatorio de manera que la suma de los instantes abiertos sea igual o superior a la duración abierta de cada purga. Se crean tantos patrones como hidrantes deben activarse.

Después de crear los patrones de purgas, se verifica si se cumple con la restricción de calidad. Si el patrón no cumple con la restricción, se entra en un bucle de cálculo para abrir más instantes del patrón de purga. En este proceso, se debe seleccionar la purga a editar, definir el momento en que se debe abrir la descarga de agua y determinar el tiempo que se debe incrementar la apertura. En este punto se vuelve a hacer uso de la tabla de sensibilidad construida anteriormente. Así, una vez localizado el nudo con mayores problemas de calidad se buscan los hidrantes sensibles al mismo. Si en el momento en el que se produce el problema de calidad, el hidrante estaba abierto, se modifica el patrón para abrir en el instante anterior.

Con el proceso descrito anteriormente, se ha encontrado un patrón de operación que soluciona el problema de calidad. A partir de aquí se plantea una estrategia para mejorar dicha solución. Es aquí donde entra el algoritmo heurístico de Recocido Simulado (más conocido por su denominación en inglés, *Simulated Annealing*, SA).

El problema se ha definido de manera discreta (número conocido tanto de hidrantes como de instantes considerados en los patrones). En este caso, el número de variables de decisión es igual al número de hidrantes multiplicado por el número de instantes de cálculo, con valores binarios de éstas. Al igual que se hizo con la búsqueda exhaustiva, cada variable de decisión puede tomar el valor 0 (hidrante cerrado) o 1 (hidrante abierto). Al tratarse en cualquier caso de un problema con un espacio de soluciones grande es posible que abunden los mínimos locales. Por ello, para encontrar el mínimo global se decidió emplear el algoritmo SA.

RESULTADOS

Modelo de búsqueda exhaustiva

Para el caso de estudio expuesto, tras realizar el análisis de sensibilidad de los hidrantes de la red se seleccionaron 3 hidrantes de los 21 existentes ($n=3$). Además, como consecuencia de este mismo análisis de sensibilidad se concluyó que las purgas se pueden concentrar en las 6 primeras horas del día ($T=6$ h) y la duración de una purga se ha fijado en 1 hora ($\Delta t=1$ h). Con estos parámetros, el campo de soluciones es de $N=2^6=262$ 144 posibilidades. Con todas las combinaciones obtenidas se ha construido un frente de Pareto compuesto por 71 posibles soluciones. Los resultados para el sector de Safranar se muestran en la Figura 3. Los resultados muestran

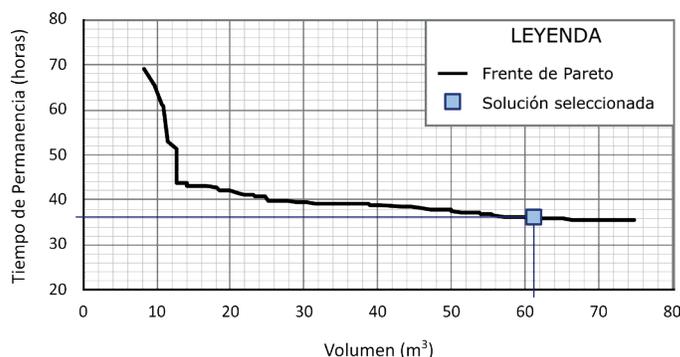


Figura 3 | Frente de Pareto obtenido para Safranar utilizando 3 hidrantes como puntos mediante búsqueda exhaustiva de la mejor solución.

que con los 3 hidrantes y 6 horas al día es posible reducir el tiempo máximo de permanencia hasta 35.5 h empleando para este caso un volumen mínimo de purga de 74.9 m³/día. Para el criterio de tiempo máximo de permanencia de 36 horas, este volumen se reduce hasta los 61.15 m³. En total se obtuvieron 95 modos de funcionamiento que mejoraban la calidad del agua.

Modelo de gradiente de mejora

Para la aplicación de este método se optó por apurar el método hasta llegar a presiones por debajo de la presión mínima. En este caso se pudo reducir el tiempo de permanencia hasta situarlo por debajo de las 24 horas. Se probaron diferentes combinaciones de los parámetros del algoritmo, modificando tanto el tiempo de permanencia objetivo (T) como el factor de crecimiento del caudal (determinado mediante el coeficiente x). En la Figura 4 se muestran los resultados obtenidos para cada una de las combinaciones

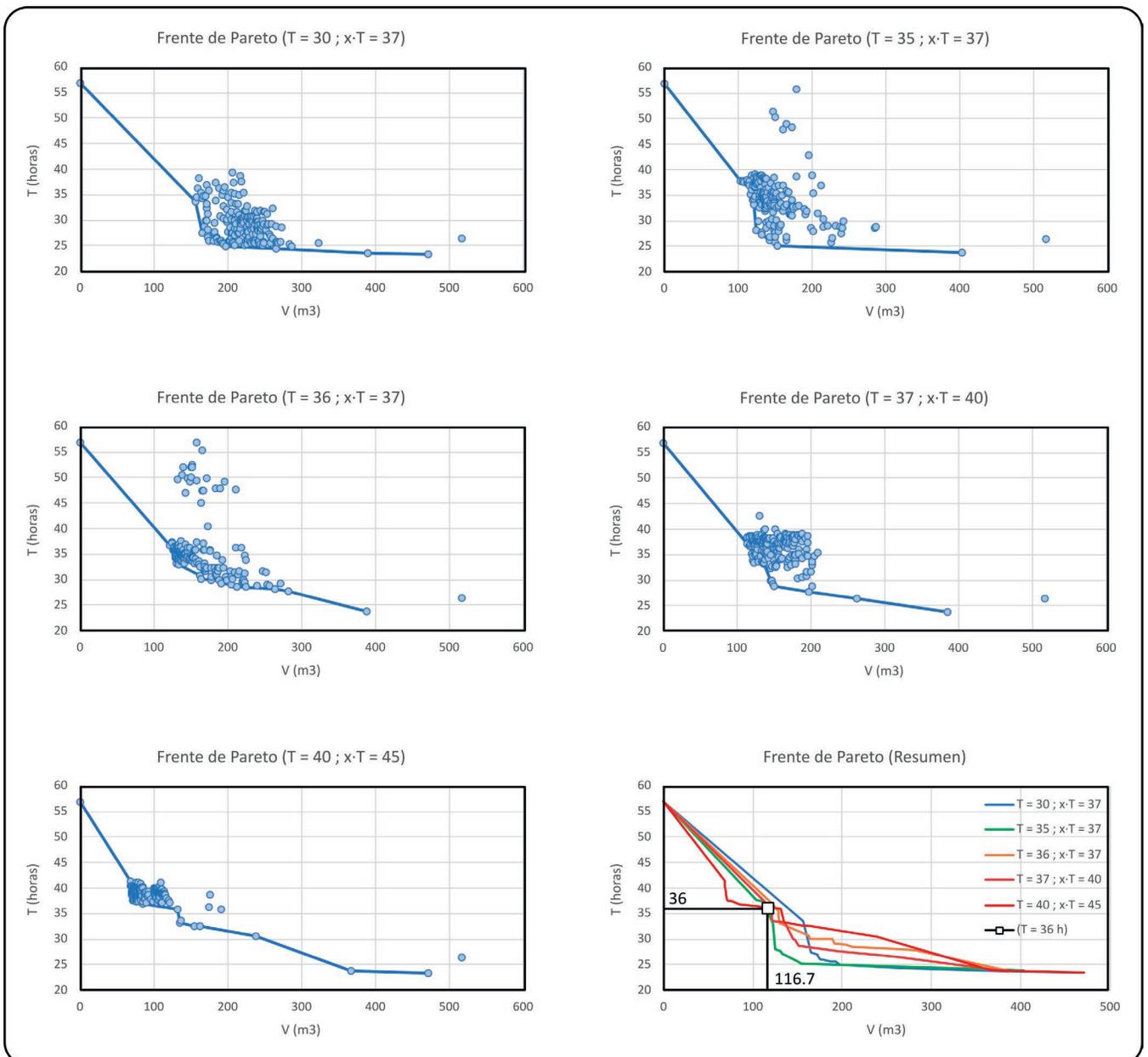


Figura 4 | Resultados de aplicar el método del gradiente de mejora para distintas combinaciones del gradiente.

probadas, así como un gráfico comparativo de los distintos frentes de Pareto obtenidos. Fijando de nuevo el tiempo de permanencia en 36 horas, se llegó a que sería necesario emplear un volumen de 116.7 m³. Este resultado se obtuvo con una combinación en la que el tiempo de permanencia objetivo era de 35 horas y el denominador $x \cdot T=40$ horas. Debido al sobredimensionamiento de la red en este sector se pudo llegar a valores inferiores a las 24 horas, con un volumen de purga asociado de 403 m³. Este valor fue seleccionado como punto de partida para el siguiente método, en búsqueda de una mejora en la solución mediante la limitación temporal del funcionamiento de los hidrantes.

Recocido Simulado

Como último método se probó un método heurístico (SA) derivado del método del gradiente. Como punto de partida se tomó la solución obtenida en éste. Además, se hicieron pruebas partiendo de soluciones aleatorias (incluida la ausencia de hidrantes). Al tratarse de un método heurístico, es necesario realizar varias simulaciones, de forma que se pudiese comprobar hasta qué punto los resultados son consistentes. En la Figura 5 se pueden observar los resultados obtenidos tanto en las 8 simulaciones realizadas como la evolución de la función objetivo (volumen purgado) en una de las simulaciones (la que dio mejor resultado) partiendo de la situación inicial hasta alcanzar una solución que ya no permite mantener la presión mínima en los nudos. Se observa que los resultados mejoran ostensiblemente los obtenidos tanto mediante la búsqueda exhaustiva como por aplicación del método del gradiente de mejora, llegando a valores de tiempos de permanencia inferiores a 35 horas con volúmenes en el entorno de los 50 m³. Se observa también que, a pesar de tratarse de un método heurístico, las soluciones se concentran en torno a valores muy cercanos del volumen purgado, lo cual permite afirmar que este método puede ser un método fiable para determinar el volumen de purga necesario.

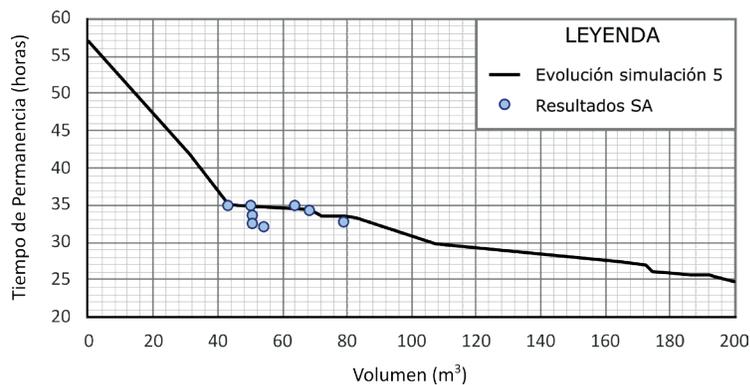


Figura 5 | Resultados obtenidos en varias simulaciones realizadas mediante SA (puntos) y evolución del método a partir de una simulación inicial sin purgas (línea continua).

DISCUSIÓN

En este artículo se han presentado dos métodos alternativos para optimizar el volumen necesario en un abastecimiento para alcanzar un cierto objetivo de calidad previamente establecido. El primero de los métodos utiliza un gradiente de mejora de la calidad mientras que el segundo se apoya en un método heurístico, concretamente el algoritmo SA. Como forma de comparación, ambos métodos se comparan con los resultados obtenidos al aplicar una búsqueda exhaustiva de la solución para una versión simplificada del problema. Mediante la búsqueda exhaustiva tras 262 144 simulaciones se ha llegado a que serían necesarios 61.15 m³ para alcanzar un tiempo de permanencia máximo de 36 horas.

Para el método del gradiente se realizaron un total de 997 simulaciones con 5 combinaciones distintas de los parámetros de ajuste. En la Tabla 2 se muestran los resultados de la combinación en la que el tiempo de permanencia objetivo era de 35 horas y el denominador $x \cdot T=40$ horas. Para esta combinación fue necesario realizar 199 iteraciones antes de alcanzar el objetivo buscado de 35 horas. Los resultados obtenidos para el volumen de purga necesario resultaron superiores en todos los casos a los obtenidos

mediante la búsqueda exhaustiva, si bien en ninguna de las combinaciones fue necesario superar las 200 iteraciones. Esto supone reducir a la milésima parte el tiempo de simulación.

Por último, la utilización del algoritmo SA aplicado a la solución obtenida mediante el método del gradiente ha arrojado soluciones notablemente mejores con un número de simulaciones muy reducido. Así, por ejemplo, la simulación que obtuvo un menor volumen de purga lo consiguió con tan solo diez iteraciones.

Para poder comparar estos resultados con otros similares, en Olortegui-Artica *et al.* (2023) se comparan estos métodos con una estrategia de Purgas Continuas (PC) método propuesto por Avvedimento *et al.* (2020) en el que se realizan purgas continuas no programadas y en la que cualquier nudo de la red es susceptible de acoger la purga. El método de purgas continuas fue igualmente aplicado a la red objeto de estudio, pero aceptando que cualquier nudo de la red es susceptible de constituir un punto de purga. Este método arrojó un volumen de purga notablemente inferior ya que permite concentrar las purgas en los nudos más desfavorables, pero resulta irrealizable en la práctica. La comparación de todos estos métodos se muestra en la Tabla 2, en la que también se incluye el número de simulaciones que ha sido necesario realizar para llegar a estos resultados.

Tabla 2 | Resultados para los distintos métodos empleados.

Método	V (m ³)	T _p (h)	Nº Simulaciones
FB	61.2	36.0	262 144
Gradiente	116.7	36.0	199
SA	43.2	35.0	10
PC	10.4	35.9	346

De estos resultados se puede concluir que la utilización de un algoritmo heurístico como el SA combinado con una solución inicial (en este caso se ha utilizado la solución basada en el gradiente de mejora) permite obtener buenas soluciones con un número reducido de simulaciones. La comparación de estos resultados con la hipótesis de que cualquier nudo puede representar un punto de purga (presentado como purgas continuas, o PC) demuestra que hay campo para la mejora, aunque debe ser a costa de cierto desperdicio de agua.

CONCLUSIONES

Se han comparado tres métodos para determinar el volumen de purga necesario para reducir el tiempo de permanencia del agua en una red de distribución de agua. Los resultados obtenidos indican que hay una fuerte relación entre el volumen de purga y el tiempo máximo de permanencia en la red si se realiza una adecuada selección de los puntos de purga. Por el contrario, si no se realiza esta selección, la relación entre tiempo de permanencia y volumen de purga puede quedar muy desdibujada, como muestra la nube de puntos obtenida al aplicar la reducción de volúmenes mediante el método del gradiente y mostrada en la Figura 4.

En cuanto a las conclusiones obtenidas de cada uno de los métodos, se puede afirmar que el método de búsqueda exhaustiva sería sin duda el que debería presentar mejores resultados al analizar absolutamente todos los escenarios posibles. Sin embargo, la aplicación de este método en la práctica resulta inviable en cuanto el tamaño del problema crece demasiado. El segundo de los métodos probados (el método del gradiente de cambio) puede ser un buen método en sí mismo. El cálculo no resulta excesivamente costoso y es determinista, es decir, para un determinado punto de inicio y unos parámetros determinados, siempre llevará a la misma solución al carecer de cualquier operador estocástico. Además, su aplicación como forma de obtener escenarios iniciales que luego pueden ser mejorados mediante métodos heurísticos permite mejorar notablemente los resultados obtenidos. Por último, la aplicación de un método heurístico como herramienta de mejora de las soluciones anteriores se ha mostrado como la mejor opción. En este caso se ha utilizado el algoritmo SA, pero dada la naturaleza discreta del problema planteado, es posible que otros métodos más adaptados a dicha naturaleza, como pueden ser los algoritmos genéticos, puedan aportar resultados igualmente notables.

Como conclusión general, se puede afirmar que las mejoras obtenidas en cuanto a la calidad del agua han sido similares y las principales diferencias vienen del tiempo necesario en alcanzar una solución. Por otra parte, se ha utilizado como medida de la calidad del agua el tiempo de permanencia máximo en los nudos de consumo de la red. Si bien el parámetro parece el más adecuado, se han hecho estudios con otros parámetros (tiempo medio diario de permanencia, tiempo medio ponderado con la demanda o tiempo máximo ponderado con la demanda). Con todos los parámetros el comportamiento de todos los modelos ha sido similar y ha llevado a las mismas conclusiones, pero los valores de calidad del agua para un mismo volumen de purga se han visto reducidos.

El alcance del trabajo presenta algunas limitaciones. El objetivo de calidad se ha impuesto utilizando un modelo con un coeficiente de reacción idéntico en todas las tuberías y admitiendo una concentración de cloro constante en la entrada del sector objeto de estudio. Si bien esto supone una simplificación, no resta validez al método ya que funcionaría exactamente igual admitiendo un patrón de concentraciones en la sección de entrada y distintos coeficientes de reacción. Los métodos de optimización utilizados se han codificado de forma discreta, lo cual lleva a duraciones de las purgas que pueden no ser óptimas. Además, se ha trabajado con tiempos de permanencia y se utiliza un modelo de calidad simplificado que no tiene en cuenta la dinámica tridimensional de las reacciones químicas, lo cual simplifica en exceso las interacciones con la biopelícula (Abhijith y Ostfeld, 2024; Elsherif *et al.*, 2024). Por último, el trabajo se ha limitado a la utilización de puntos de purga preexistentes (en este caso, los hidrantes). Algunos trabajos (Avvedimento *et al.*, 2020) utilizan metodologías similares extendidas a cualquier punto de la red.

Por todo lo anterior, el trabajo presentado puede ser un punto de partida para la mejora de las decisiones en cuanto a la sectorización de las redes. La sectorización de las redes de distribución de agua presenta ventajas indudables de cara al control de las fugas, la acotación de las tareas de mantenimiento o el control de las presiones. Sin embargo, su efecto en la calidad del agua es su principal inconveniente al dejar tuberías sin salida (fondos de saco) y en ocasiones una notable reducción en las velocidades de circulación del agua.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del Convenio 689345 de prácticas en la empresa Global Omnium financiadas por la Cátedra Aguas de Valencia y realizadas en la Universidad Politécnica de Valencia.

REFERENCIAS

- Abhijith, G.R., Ostfeld, A. 2024. Assessing Uncertainties in Mechanistic Modeling of Quality Fluctuations in Drinking Water Distribution Systems. *Journal of Environmental Engineering*, 150(1). <https://doi.org/10.1061/joeeedu.eeeng-7400>
- Abokifa, A.A., Haddad, K., Lo, C.S., Biswas, P. 2017. Detection of Cyber Physical Attacks on Water Distribution Systems via Principal Component Analysis and Artificial Neural Networks. *World Environmental and Water Resources Congress 2017*, 676–691. <https://doi.org/10.1061/9780784480625.063>
- Agudelo-Vera, C., Avvedimento, S., Boxall, J., Creaco, E., de Kater, H., Nardo, A. Di, Djukic, A., Douterelo, I., Fish, K.E., Iglesias-Rey, P.L., Jacimovic, N., Jacobs, H.E., Kapelan, Z., Martínez-Solano, F.J., Montoya-Pachongo, C., Piller, O., Quintiliani, C., Ručka, J., Tuhovčák, L., Blokker, M. 2020. Drinking water temperature around the globe: Understanding, policies, challenges and opportunities. *Water*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/W12041049>
- Alfonso, L., Jonoski, A., Solomatine, D. 2010. Multiobjective Optimization of Operational Responses for Contaminant Flushing in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(1), 48–58. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2010\)136:1\(48\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2010)136:1(48))
- Avvedimento, S., Todeschini, S., Giudicianni, C., Di Nardo, A., Walski, T., Creaco, E. 2020. Modulating Nodal Outflows to Guarantee Sufficient Disinfectant Residuals in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 146(8). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001254](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001254)

- Baranowski, T.M., LeBoeuf, E.J. 2008. Consequence Management Utilizing Optimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 134(4), 386–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2008\)134:4\(386\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:4(386))
- Bayas-Jiménez, L., Martínez-Solano, F.J., Iglesias-Rey, P.L., Boano, F. 2022. Economic Analysis of Flood Risk Applied to the Rehabilitation of Drainage Networks. *Water*, 14(18), 2901. <https://doi.org/10.3390/w14182901>
- Boccelli, D.L., Tryby, M.E., Uber, J.G., Rossman, L.A., Zierolf, M.L., Polycarpou, M.M. 1998. Optimal Scheduling of Booster Disinfection in Water Distribution Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 124(2), 99–111. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1998\)124:2\(99\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1998)124:2(99))
- Conejos, M.P., Alzamora, F.M., Alonso, J.C. 2017. A Water Distribution System Model to Simulate Critical Scenarios by Considering Both Leakage and Pressure Dependent Demands. *Procedia Engineering*, 186, 380–387. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.234>
- Elsherif, S.M., Taha, A.F., Abokifa, A.A., Sela, L. 2024. Comprehensive Framework for Controlling Nonlinear Multispecies Water Quality Dynamics. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 150(2). <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-6179>
- Friedman, M., Kirmeyer, G.J., Antoun, E. 2002. Developing and Implementing a Distribution System Flushing Program. *Journal AWWA*, 94(7), 48–56. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2002.tb09505.x>
- Gamón-Olmo, A. 2020. Modelización del potencial de mejora organoléptica del agua potable en la red de Valencia. Aplicación al sector de Safranar (Valencia) [Trabajo Fin de Máster]. Universitat Politècnica de Valencia.
- Gutiérrez-Bahamondes, J.H., Mora-Melia, D., Valdivia-Muñoz, B., Silva-Aravena, F., Iglesias-Rey, P.L. 2023. Infeasibility Maps: Application to the Optimization of the Design of Pumping Stations in Water Distribution Networks. *Mathematics*, 11(7), 1582. <https://doi.org/10.3390/math11071582>
- Kirkpatrick, S., Gelatt, C.D., Vecchi, M.P. 1983. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598), 671–680. <https://doi.org/10.1126/science.220.4598.671>
- Knecht, A.E., Ettenauer, J., Posniecek, T., Taschl, M., Helmecke, M., Haller, H., Gößl, S., Brandl, M. 2023 Differences in Microbial Communities in Drinking Water from Conventional Electronic and Manual Taps in Dependence on Stagnation and Flushing Cycles. *Water*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/w15040784>
- López Jiménez, P.A., Espert Alemany, V., Carlos Alberola, M., Martínez-Solano, F.J. 2003. Metodología para la calibración de modelos de calidad de aguas. *Ingeniería del Agua*, 10(4), 501. <https://doi.org/10.4995/ia.2003.2593>
- Mala-Jetmarova, H., Sultanova, N., Savic, D. 2018. Lost in Optimisation of Water Distribution Systems? A Literature Review of System Design. *Water*, 10(3), 307. <https://doi.org/10.3390/w10030307>
- Martínez-Solano, F.J., Iglesias-Rey, P.L., Mora-Meliá, D., Fuertes-Miquel, V.S. 2014. Using the Set Point Concept to Allow Water Distribution System Skeletonization Preserving Water Quality Constraints. *Procedia Engineering*, 89, 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.179>
- Ministerio de la Presidencia. 2003. Real Decreto 140/2003 por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. *Boletín Oficial Del Estado (BOE)*, 7228–7245.
- Ministerio de la Presidencia. 2023. Real Decreto 3/2023, de 10 de enero, por el que se establecen los criterios técnico-sanitarios de la calidad del agua de consumo, su control y suministro. *Boletín Oficial Del Estado (BOE)*, 2023(9), 4253–4354. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2023-628
- Ngamaliou-Nengoué, U., Iglesias-Rey, P., Martínez-Solano, F., Mora-Meliá, D., Saldarriaga Valderrama, J. 2019. Urban Drainage Network Rehabilitation Considering Storm Tank Installation and Pipe Substitution. *Water*, 11(3), 515. <https://doi.org/10.3390/w11030515>

- Olortegui-Artica, C., Martínez-Solano, F.J., Sánchez-Briones, C. 2023. Mejora de la calidad del agua en la red de agua potable de la ciudad de Valencia mediante purgas programadas. *XVII Congreso Iberoamericano Sobre Sistemas de Abastecimiento, Saneamiento y Riego (SERA '23)*. <https://serea23.com/wp-content/uploads/2023/06/6210.pdf>
- Poulin, A., Mailhot, A., Periche, N., Delorme, L., Villeneuve, J.P. 2010. Planning Unidirectional Flushing Operations as a Response to Drinking Water Distribution System Contamination. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 136(6), 647–657. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000085](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000085)
- Quintiliani, C., Marquez-Calvo, O., Alfonso, L., Di Cristo, C., Leopardi, A., Solomatine, D.P., de Marinis, G. 2019. Multiobjective Valve Management Optimization Formulations for Water Quality Enhancement in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 145(12). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001133](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001133)
- Rebolledo, M., Chandrasekaran, S., Bartz-Beielstein, T. 2020. Technical Report: Flushing Strategies in Drinking Water Systems. *arXiv:2012.13574 [cs.AI]*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2012.13574>
- Rossman, L. 2000. EPANET 2.0 Users manual. In *Social Studies of Science* (Vol. 38, Issue 4). <https://www.epa.gov/water-research/epanet>
- Rossman, L.A., Clark, R.M., Grayman, W.M. 1994. Modeling Chlorine Residuals in Drinking-Water Distribution Systems. *Journal of Environmental Engineering*, 120(4), 803–820. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1994\)120:4\(803\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1994)120:4(803))
- Schück, S., Díaz, S., Lansey, K. 2023. Reducing Water Age in Residential Premise Plumbing Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 149(8). <https://doi.org/10.1061/JWRMD5.WRENG-5943>
- United Nations. 2015. Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/publications/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development-17981>
- Vidal, R., Martínez, F., Ayza, M. 1994. Aplicaciones de los modelos de calidad en la simulación de las redes de distribución de agua potable. *Ingeniería del Agua*, 1(3). <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2644>
- Xie, X., Nachabe, M., Zeng, B. 2015. Optimal Scheduling of Automatic Flushing Devices in Water Distribution System. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000477](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000477)
- Zoppou, C. 2001. Review of urban storm water models. *Environmental Modelling & Software*, 16(3), 195–231. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00084-0](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00084-0)