

XIX SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA

METODOLOGÍAS PARA LA SECTORIZACIÓN DE REDES EXISTENTES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

J.G. Saldarriaga¹, G. Naranjo² y E. Rothstein²

¹Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental - Director, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; email: jsaldarr@uniandes.edu.co.

²Investigadores, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados –CIACUA–, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia; email: ga.naranjo22@egresados.uniandes.edu.co, rothst@uniandes.edu.co

RESUMEN:

Con el presente trabajo se analiza el efecto de la sectorización hidráulica en una red de distribución de agua potable ante la eventual falla de uno de sus elementos. Se usa el concepto de resiliencia para evaluar criterios de sectorización, porque permite medir claramente el efecto producido por la sectorización sobre la red intervenida, con el fin de definir una nueva metodología, basada en la hidráulica, que permita de forma fácil generar la sectorización de una red.

ABSTRACT:

This work studies the effect of hydraulic sectorization in a Potable Water Distribution System (PWDS) whenever one of its elements fails. Resilience is used to evaluate several sectorization criteria, as it gives an accurate measure of the impact generated upon the PWDS by sectorization methods, and then a new hydraulic based methodology that allows easy PWDS sectorization is introduced.

PALABRAS CLAVES:

Sectorización hidráulica, Resiliencia, Metodología de sectorización.

INTRODUCCIÓN

Cuando se habla de la red óptima de distribución de agua potable, se hace referencia a la red que cumple con las condiciones de presión mínimas preestablecidas de acuerdo con algunas normas y reglamentos técnicos sobre toda su extensión y que tenga el mínimo costo de construcción. Con estas condiciones es posible realizar varios diseños de una misma red, que cumplan con todas las condiciones hidráulicas necesarias para su debida operación, con el fin de compararlos para encontrar el más económico y elegir el diseño para su construcción.

Actualmente se considera resuelto el problema de diseñar una red óptima de distribución de agua, puesto que ya se cuenta con metodologías bastante acertadas que permiten acercarse al diseño óptimo. Sin embargo, hoy en día rara vez el ingeniero se enfrenta al problema de diseñar una red de distribución totalmente nueva; es mucho más común que se encuentre con el problema de tener que mejorar las condiciones de una red existente, que ya se encuentra en operación.

Cuando se habla de mejorar las condiciones de una red existente se encuentran dos alternativas: la primera consiste en realizar gestión de presiones sobre la red mediante la instalación de controles de presión en puntos estratégicos, con lo cual se busca disminuir el nivel de pérdidas de agua por fugas y extender la vida de las tuberías; la segunda alternativa mide la forma cómo la red reaccionará ante la falla de alguno de sus elementos para así determinar cuáles son los elementos más débiles y proponer su intervención, mejorando la respuesta de la red.

En el primer caso, una manera de realizar gestión de presiones es dividiendo físicamente la red en sectores hidráulicos independientes, controlados mediante válvulas reguladoras de presión, metodología que a nivel mundial ha demostrado ser una forma eficiente de disminuir las pérdidas de agua causadas por la presencia de fugas. Sin embargo, y debido a ésta división, la sectorización al parecer reduce la respuesta de una red ante la falla de uno de sus elementos, haciéndola más vulnerable.

Con el presente trabajo se pretende encontrar en realidad qué tanto afecta la sectorización hidráulica a una red ante la eventual falla de uno de sus elementos. Se usa el concepto del índice de resiliencia, evaluando algunos criterios de sectorización a nivel nacional e internacional, con el fin de definir una nueva metodología, basada en la hidráulica, que permita de forma fácil generar la sectorización de una red y que a su vez mejore las condiciones hidráulicas o minimice el impacto sobre la red de distribución existente; además se tiene la posibilidad de medir claramente el efecto producido por la sectorización sobre la red intervenida.

ANTECEDENTES

A lo largo de la historia, el hombre ha solucionado el problema de distribuir agua en las grandes ciudades construyendo *redes de distribución de agua potable* (RDAP). Estas redes pueden transportar agua desde las fuentes de abastecimiento, que pueden encontrarse fuera de la ciudad, hasta los nodos de consumo, que se extienden por toda la ciudad. Los primeros sectores independientes en un principio no eran regulados por presión y sí lo estaban por el caudal de agua que podía ser distribuido a cada sector. Según el libro “*Los Acueductos de Roma*” de Frontinus, la ciudad de Roma en el año 100 se encontraba dividida en catorce sectores (Bennett, 1961), y se aprecia la manera en que se dividía el agua de las fuentes en los sectores de la ciudad, y cómo las obras realizadas aseguraban la alimentación de cada sector con mínimo dos fuentes, evitando el desabastecimiento de agua en tiempos de sequía.

Históricamente es difícil encontrar cual fue la primera ciudad moderna en realizar la división de sus RDAP para controlar la presión, pues la sectorización no es uno de los hitos históricos comunes. Sin embargo en 1980, mediante el Reporte 26 “*Políticas y Prácticas del Control de Fugas*” de la Asociación de Autoridades del Agua para el Reino Unido, la sectorización se da a conocer como herramienta para la detección de fugas (Morrison, 2004). La sectorización empieza a tomar importancia gracias a las conferencias desarrolladas por las Naciones Unidas (UN) en la década de los 70.

MARCO TEÓRICO

Índice de Resiliencia

El concepto de *Resiliencia* se define como: “la capacidad de un sistema de reaccionar y superar un estado de esfuerzos [...] o el incremento de la redundancia energética y decrecimiento de la energía disipada internamente en una red” (Todini, 2001). Existe una relación entre la resiliencia de un sistema y la cantidad de energía que éste disipa; pues a menor energía disipada, mayor será la capacidad de respuesta del sistema de distribución dada la cantidad de energía disponible.

La *Resiliencia* se basa en que la *potencia por unidad de peso de entrada* (P_{inp}) en una red de distribución de agua es igual a la potencia disipada por los efectos de la fricción en las tuberías y las fugas conocida como la *potencia por unidad de peso de operación del sistema* (P_{int}), mas la *potencia por unidad de peso entregada* (P_{out}) en los nodos de consumo (ver ecuación 1).

$$P_{inp} = P_{int} + P_{out} \quad [1]$$

Teniendo que la potencia por unidad de peso de entrada al sistema incluye la potencia por unidad de peso suministrada por una bomba, más la suministrada por los embalses o las entradas del sistema se concluye:

$$P_{inp} = \sum_{e=1}^{n_e} Q_e \cdot H_e + \sum_{j=1}^{n_p} P_j \quad [2]$$

donde Q_e y H_e son el caudal de entrada y la altura de presión de entrada dados por los embalses o las entradas del sistema e , n_e es el número de embalses, P_j es la potencia por unidad de peso suministrada por la bomba j y n_p es el número de bombas en el sistema.

La potencia por unidad de peso entregada a los nodos en términos de presión de servicio y caudal demandado en cada nodo (P_{out}) se encuentra de dos formas: primero, como la *potencia por unidad de peso de entrega óptima* (P_{out}^{max}) debida a una presión de servicio mínima en los nodos, dada en la ecuación 3.

$$P_{out}^{max} = \sum_{j=1}^{n_n} Q_j \cdot H_j^* \quad [3]$$

y segundo, como la *potencia por unidad de peso de entrega real* (P_{out}^{real}), debida a las presiones de entrega del servicio a partir de una configuración de tuberías dada en la ecuación 4 (Araque, 2006).

$$P_{out}^{real} = \sum_{j=1}^{n_n} Q_j \cdot H_j \quad [4]$$

donde Q_j es la demanda en el nodo j , H_j es la presión con la cual se satisface la demanda en el nodo j , n_n es el número total de nodos en la red y H^* es la presión mínima requerida en cada nodo.

A partir de la ecuación 1 se desarrolla una expresión para la potencia por unidad de peso de operación del sistema, la cual corresponde a la diferencia entre la potencia por unidad de peso de entrada y la potencia por unidad de peso de entrega en los nodos y es la parte que se consume de la potencia por unidad de peso de entrada al sistema. Esta expresión se encuentra en la ecuación 5 (Araque, 2006).

$$P_{int} = P_{inp} - P_{out} \quad [5]$$

Como se mencionó anteriormente, la potencia por unidad de peso de entrega se clasifica en una entrega óptima y en una de entrega real del servicio, con las cuales es posible definir las potencias por unidad de peso de operación óptima (ecuación 6) y de operación real del sistema (ecuación 7).

$$P_{int}^{max} = P_{inp} - P_{out}^{max} \quad [6]$$

$$P_{int}^{real} = P_{inp} - P_{out}^{real} \quad [7]$$

El *Índice de Resiliencia* de la red se define como la relación entre las potencias mencionadas, es decir, la relación entre la potencia disipada por la red real y la potencia disipada por una red con la misma potencia total de entrada y una potencia de salida correspondiente a tener en cada nodo la altura de presión mínima. Por lo tanto es posible establecer el nivel de conservación de potencia presente en el sistema mediante la ecuación 8.

$$I_r = 1 - \frac{P_{int}^{real}}{P_{int}^{max}} \quad [8]$$

Reemplazando los términos apropiados se encuentra la expresión general para el índice de resiliencia de la red, como lo muestran las ecuaciones 9 y 10 (Todini 2004).

$$I_r = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e \cdot H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_p} P_i \right] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j \cdot H_j}{\left[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e \cdot H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_p} P_i \right] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j \cdot H_j^*} \quad [9]$$

$$I_r = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} Q_j \cdot (H_j - H_j^*)}{\left[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e \cdot H_e)_i + \sum_{i=1}^{n_p} P_i \right] - \sum_{j=1}^{n_n} Q_j \cdot H_j^*} \quad [10]$$

Este concepto define un índice el cual determina el grado de confiabilidad o la capacidad que tiene una red para soportar la falla de uno de sus elementos (rotura de un tubo), y se debe a que “*al uniformizar el estado de presión en toda la red de distribución de agua potable se aumenta el grado de confiabilidad hidráulica de la misma, debido a que se maximiza la conservación de energía de entrada y disipada por el sistema*” (Araque, 2006). Según Todini, este índice debe encontrarse alrededor del 50 % (0.50). Un sistema de distribución de agua potable con un índice de resiliencia menor representará un sistema que no tiene una buena respuesta ante una falla; un sistema con un índice mayor representa una red que se encuentra sobredimensionada y por lo tanto es una red cuyo diseño es muy costoso. Si se trata de una red ya construida probablemente pueda presentar problemas de calidad de agua.

Para la cuantificación del impacto que tiene una sectorización sobre una red se empleó el concepto de Índice de Resiliencia; este índice es una muy buena medida de la eficiencia en la distribución de un sistema de distribución de agua potable, con lo cual se podrá variar la forma de operación de la red al establecer algún tipo de sectorización y comparar el escenario inicial (red sin sectorización) y un escenario modificado *i* (red sectorizada bajo la prueba *i*).

Sectorización de redes

La sectorización de una Red de Distribución de Agua Potable (RDAP) se define como la manera en que se divide la RDAP en varios conjuntos de tuberías, determinando algunas características comunes sobre cada conjunto. La *sectorización hidráulica* de RDAP se presenta cuando estas divisiones realmente corresponden a fronteras que previenen el paso de agua de una porción a otra y la característica común del conjunto de tuberías es el origen de su alimentación. De esta manera se define como un *sector hidráulico* a una porción de las redes aislada hidráulicamente de los demás sectores de un sistema de distribución de agua y los únicos puntos de conexión son: alimentaciones propias del sector (entradas de agua al sector) o alimentaciones a otros sectores (salidas de agua del sector). Uno de los resultados esperados de este proyecto es encontrar una forma de determinar cuántas entradas y salidas debe tener un sector hidráulico y posiblemente generar una definición más detallada tanto de sector como de sectorización.

Adicionalmente se define como un *criterio de sectorización* a la forma, las razones o los principios por medio de los cuales se realiza la división de las RDAP para conformar los diferentes sectores hidráulicos. No todos los criterios de sectorización siguen motivos netamente hidráulicos; algunos se enfocan sobre alguna evaluación económica, por ejemplo mantener un balance en el costo de las obras de sectorización y detección de fugas contra el ahorro de agua esperado. En este proyecto se utilizan únicamente criterios de sectorización que se basen de alguna forma en la hidráulica y, con base en estos criterios, se desarrolla la metodología de sectorización.

Criterios de sectorización utilizados actualmente

Esta investigación prueba el impacto de varios criterios de sectorización sobre una Red de Distribución de Agua Potable (RDAP). Se utilizaron modelos matemáticos de RDAP, tanto sobre modelos de sistemas de distribución existentes, como sobre modelos de redes ficticias. Aplicando estos criterios y mediante el *Índice de Resiliencia* se establece la forma de cuantificar su impacto sobre la red de distribución intervenida.

Los criterios de sectorización utilizados internacionalmente se encuentran en manuales de empresas proveedoras del servicio de distribución de agua potable en el país, y hacen parte de las estrategias operativas de reducción de pérdidas, donde se especifica de alguna forma el proceso de sectorización. Por ejemplo, se encontró que la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) cuenta con el manual de sectorización más completo, el cual está enfocado al uso de la sectorización como herramienta para el control de pérdidas de agua. Adicionalmente, se evidencia dentro de la metodología de sectorización propuesta en el manual, un interés en cuanto a la disposición de las redes principales de transporte de agua o *red matriz*, la verificación de la operación de los sectores propuestos en condiciones de racionamiento y emergencia, y la proyección del consumo en los sectores según la demografía y el urbanismo. Estos pueden tomarse como criterios, o como pruebas de verificación hidráulica, para determinar la forma en que se deberán trazar los límites de los sectores.

A nivel internacional se encuentran los criterios con los que se realiza la sectorización o la generación de áreas de medición por distritos (DMA), del Centro de Investigación en la Industria del Agua del Reino Unido y su aplicabilidad en los Estados Unidos de Norte América (Sturm y Thornton 2005).

No todos los criterios de sectorización siguen motivos netamente hidráulicos; algunos se enfocan sobre alguna evaluación económica, como mantener un balance en el costo de las obras de sectorización y detección de fugas contra el ahorro de agua esperado. Otros criterios siguen simplemente lineamientos geográficos, como trazar los límites de los sectores siguiendo fallas naturales del terreno, ríos o incluso vías principales; otros tienen un carácter comercial, como dividir por zonas políticas o por estratos socioeconómicos. Estas metodologías son las tradicionalmente usadas y, en general, es difícil conformar un límite de sectorización.

MODELOS UTILIZADOS

A lo largo de esta investigación se desarrollan diversos modelos. El *Modelo 01* es un modelo teórico que se usa para la comprobación de criterios de sectorización sobre una red tipo malla, la cual presenta muchas conexiones entre sí, en conjunto con una disposición de circuitos de tuberías de mayor diámetro encerrando tuberías de menor diámetro interconectadas. El Modelo 01 es un modelo simétrico, puesto que sus tuberías se repiten sobre dos ejes centrales de simetría, con lo cual se forman cuatro cuadrantes idénticos. Esta red presenta cuatro embalses localizados en los cuatro extremos, que mantienen la línea de gradiente hidráulico en los 50.00 m. La red presenta una topografía en forma de cuenco, con una pendiente del 2%, siendo las esquinas, donde se encuentran los embalses los puntos más altos, con una elevación de 12 m. Los puntos más bajos se encuentran en el centro de la red con una elevación de 5 m. La red se dispuso sin una tubería de transporte clara; las tuberías de diámetros mayores se encuentran conectadas con las redes de menor diámetro, siguiendo el concepto de una red tipo malla.

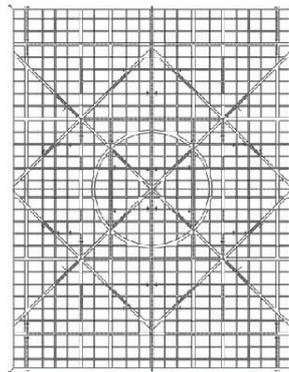


Figura 1. - Modelo 01

Se supuso un consumo por nodo de 0.25 l/s; no se dispusieron emisores. Se decidió utilizar únicamente Policloruro de Vinilo (PVC) como material de las tuberías, debido a que en el momento es uno de los materiales más utilizados en las redes de distribución de agua potable, con una rugosidad de 0.0015 mm, y se dispuso de un coeficiente de pérdidas menores (K_m) igual a 0.02 por metro de tubería (CIACUA, 2006).

Dada la simetría de las tuberías y las fuentes de alimentación, se espera un comportamiento simétrico en la hidráulica del modelo, lo que permitirá ver si la metodología replica los límites determinados sobre un cuadrante en los demás. Adicionalmente, uno de sus ejes de simetría se conformó como un límite natural y el otro intencionalmente no, de forma que se compruebe qué criterios encuentran este último eje como un límite hidráulico adecuado.

El *Modelo 02* es un modelo teórico desarrollado para la comprobación de criterios de sectorización sobre una red que presenta una tubería de transporte clara con pocas conexiones a las tuberías de distribución. Las tuberías de distribución se dispusieron como una malla con circuitos de tuberías de

mayor diámetro, encerrando tuberías de menor diámetro interconectadas. Este modelo es utilizado para prueba de criterios de sectorización y para la realización de la nueva metodología.

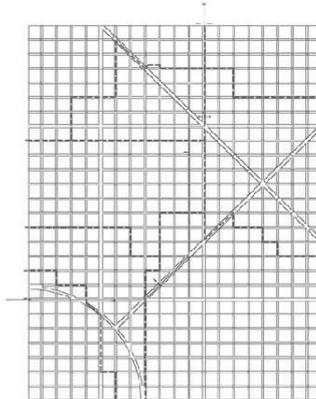


Figura 2. - Modelo 02

A diferencia del Modelo 01, el Modelo 2 no es simétrico. La tubería de transporte no se ubica de forma central para que se presenten zonas en la red de distribución que se encuentren alejadas de cualquier alimentación, esto con el fin de observar qué criterios de sectorización dan una mejor solución sobre estas zonas. El Modelo 2 presenta una alimentación principal localizada sobre el borde superior de la red la cual mantiene la línea de gradiente hidráulico en los 30.00 m; esta se conecta a la tubería de transporte, la cual tiene 600 mm de diámetro, recorre la red de distribución en forma de “J” teniendo cinco puntos de conexión. La red es completamente plana, teniendo todos los elementos a la misma elevación. En la red de distribución se encuentran tuberías en diámetros de desde 76 a 300 mm; se dispusieron las mismas características de tuberías que en el Modelo 01.

El *Modelo 03* es un modelo proporcionado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EEAB), el cual simula las redes del Sector 2S16 (Control Santa Fe, ver la Figura 3). Este modelo se utiliza durante el proceso de prueba de criterios de sectorización y para la realización de la nueva metodología.

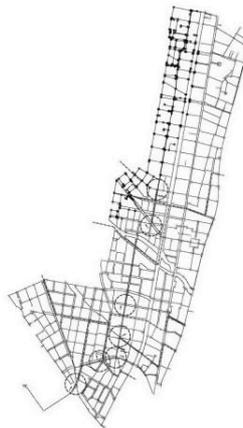


Figura 3. - Modelo 03

La alimentación principal de la red se encuentra en el extremo sur de la red. Está conformada por una estación de control de presión donde se tiene medición de caudal sobre una tubería de 762 mm de diámetro, que define la única entrada de alimentación de la red. El área que cubre la red presenta una elevación de 2595 msnm en la parte más sur oriental; el resto de la red presenta una elevación promedio de 2573 msnm y la menor elevación es de 2558 msnm., con lo cual se tiene una diferencia de 37 m de altura entre el punto más alto y el punto más bajo.

Como tubería de transporte se tiene desde la alimentación principal una tubería de 762 mm, con una longitud de 4.3 km hacia el norte recorriendo en su totalidad la extensión del Modelo 03. Esta tubería de transporte cuenta únicamente con siete conexiones a la tubería de distribución. La red en su mayoría está conformada por tuberías de PVC, también se encuentran tuberías en Asbesto Cemento (AC), Hierro Acerado (HA), Hierro Galvanizado (HG), Hierro Fundido (HF) y en Concreto (CCP), sin embargo, las tuberías de CCP solo se encuentran en diámetros mayores (400 y 600 mm), conformando la tubería de transporte. La red tiene diámetros desde 25.4 a 1066 mm; la mayoría de las redes se encuentran en 100 mm.

El *Modelo 04* es un modelo proporcionado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EEAB), el cual simula las redes del Subsector 2S0405 (Engativa). Este modelo fue utilizado durante el proceso de validación de la nueva metodología. Este modelo proporcionado por la EEAB se modifica agregando 1.9 Km de tubería de 400 mm, para incluir las obras futuras que la EEAB espera realizar sobre esta red. La alimentación principal de la red se encuentra en el extremo oriental y es el punto con mayor elevación; está conformada por un medidor de caudal electromagnético sobre una tubería de 600 mm de diámetro, que define la única entrada de alimentación de la red.

El área que cubre la red no cuenta con una topografía accidentada, más bien plana; la mayor elevación es de 2548 msnm., y la menor elevación es de 2542 msnm., con lo cual se tiene una diferencia de 6 m entre el punto más alto (la alimentación principal) y el punto más bajo (extremo occidental de la red, cerca la Río Bogotá). Como tubería de transporte tiene, desde la alimentación principal, una tubería de 600 mm que recorre 1.9 Km hacia el occidente; luego se reduce a 400 mm por otros 1.9 Km. Esta tubería de transporte cuenta únicamente con cuatro conexiones a la tubería de distribución. Actualmente la tubería de 400 mm no se encuentra construida, por lo cual solo se contaría con dos puntos de conexión con la red de distribución.

La red en su mayoría cuenta con tuberías de PVC; sin embargo se encuentran tuberías en Asbesto Cemento (AC) y en Concreto (CCP), estas últimas solo se encuentran en diámetros mayores (400 y 600 mm), conformando la tubería de transporte. La red está conformada por diámetros desde 76 a 600 mm. La mayoría de las redes se encuentran en 76 mm y casi en su totalidad son tuberías de PVC.

Comparación entre los modelos

Todos los modelos cubren un área grande y tienen un número importante de elementos, lo que permitió, dentro de las pruebas de sectorización realizadas, conformar varios sectores (Ver Tabla 1). Teniendo modelos con una forma topológica variada y con distintas características topográficas es posible desarrollar una nueva metodología de sectorización más completa que las conocidas actualmente.

Tabla 1.- Comparación topológica entre los modelos

Modelo	Nodos	Tubos	Area [ha]	Longitud de redes [km]
Modelo 01	2454	3720	539	216.4
Modelo 02	2237	3321	543	202.1
Modelo 03	2716	3072	275	91.6
Modelo 04	2032	2444	634	97.7

NUEVA METODOLOGÍA DE SECTORIZACIÓN

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa el diagrama de flujo que ilustra la propuesta de sectorización que se desea comparar en este trabajo.

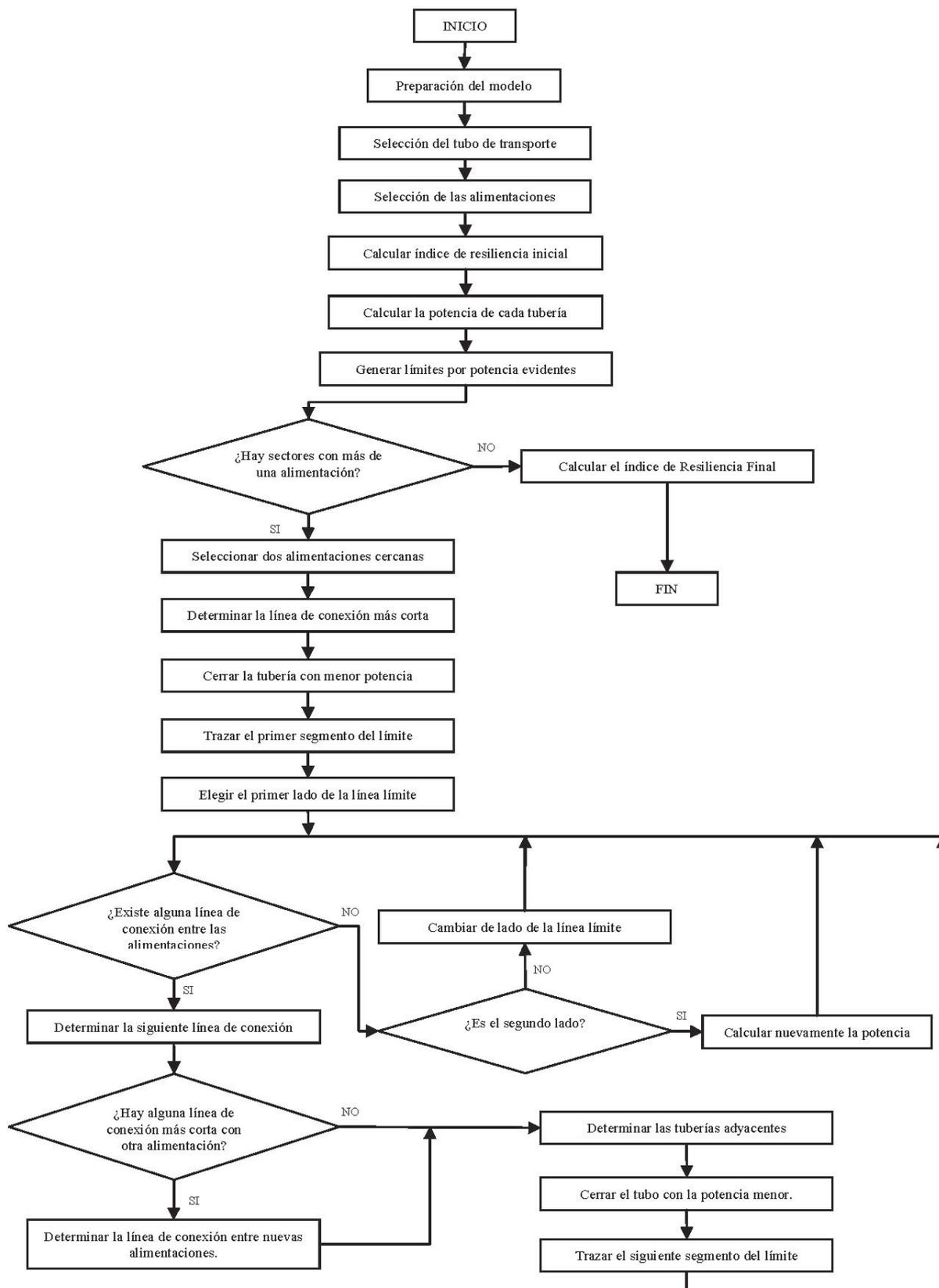


Figura 3. - Nueva Metodología de Sectorización

PRUEBAS DE SECTORIZACION REALIZADAS

Teniendo en cuenta los criterios de sectorización encontrados, se planteó realizar sobre los modelos *Modelo 1*, *Modelo 2* y *Modelo 3* las pruebas de sectorización por medio de un criterio hidráulico. Estas pruebas consisten en: 1) Sectorización mediante límites naturales, 2) Sectorización mediante pérdidas de energía, 3) Sectorización mediante caudal, 4) Sectorización mediante presión y 5) Sectorización mediante potencia.

Sectorización mediante límites naturales

La prueba de sectorización sobre límites naturales consta en dividir el modelo tomando como guías las partes en que se evidencia una separación topológica de la red y por la cual solo se aprecian unas pocas tuberías cruzadas. Esto sucede comúnmente cuando en el prototipo se encuentran: vías principales, vías férreas, cuerpos de agua (canales, ríos o humedales), cambios fuertes de topografía como colinas o riscos, etc. Luego de disponer los límites se permite que cada sector sea alimentado por una sola tubería (WRc, 2007).

Sectorización mediante pérdidas de energía

La prueba de sectorización mediante pérdidas de energía consta en dividir el modelo a través de aquellas tuberías que presentan la menor pérdida de altura de presión o las que presentan la menor diferencia de presión entre sus extremos.

Sectorización mediante caudal

La prueba de sectorización mediante caudal consta en dividir el modelo a través de aquellas tuberías que presentan el menor caudal.

Sectorización mediante presión

La prueba de sectorización mediante presión consta en generar los límites sobre la superficie de presión del modelo buscando las líneas de máxima pendiente y dividir el modelo a través de ellas.

Sectorización mediante potencia

La prueba de sectorización mediante potencia consta en dividir el modelo a través de aquellas tuberías que presentan el menor valor de *potencia unitaria*. La potencia unitaria se define como el resultado de multiplicar el valor del caudal de la tubería por el valor de la pérdida de altura piezométrica.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE SECTORIZACIÓN

Sectorización mediante límites naturales

Luego de aplicar esta prueba sobre el Modelo 01 se encontraron 78 sectores, cada uno de los cuales tiene una o dos entradas de alimentación y presentan hasta tres salidas, que a su vez alimentan otros sectores. Al elegir la alimentación para los sectores generados se da prioridad a las tuberías de mayor diámetro o con mayor caudal. Sin embargo, bajo esta aproximación se genera una gran cantidad de sectores en serie; es decir, sectores hidráulicos localizados uno aguas abajo del otro, con conexión única entre ellos. El uso de límites naturales como criterio de sectorización no asegura aislar los embalses unos de otros, y por ende se generan dos macro sectores; cada uno de estos sectores con dos embalses y en su interior una gran cantidad de sectores en serie que dependen del comportamiento de las dos alimentaciones.

Al aplicar la prueba sobre el Modelo 02 se evitó cerrar la tubería de transporte, debido a que al realizar este cierre se dejaba sin agua una gran parte del modelo. Adicionalmente, generar algunos límites

afecta sectores en serie previamente generados, provocando que se presenten presiones inferiores a los 15 m.c.a., de manera que luego de conformar un límite se debe definir nuevamente de las alimentaciones de cada sector. Se observa que sobre un modelo en el cual se presenta una tubería de transporte, es posible generar más sectores independientes con una sola entrada; pero se continúan generando sectores en serie. Si la conexión que une dos sectores en serie falla, todos los sectores en serie aguas abajo no serían alimentados, aumentando significativamente el impacto sobre la red. Nuevamente al generar los límites se evitó cerrar la tubería de transporte.

Luego de aplicar esta prueba sobre el Modelo 03 se observa que hay muchos más límites naturales de los que se utilizaron; consecuencia de ser una red real sobre un área que presenta muchas divisiones naturales, pues se encuentran varias avenidas principales y un canal. Al definir los límites no se encontró ninguna eventualidad. Nuevamente se evidencia que sobre un modelo en el cual se presenta una tubería de transporte, se generan más sectores independientes con una sola entrada y sectores en serie. Entre los tres modelos el que menos se ve afectado es el Modelo 03 (Ver Tabla 2).

Tabla 2.- Comparación de resultados para la prueba de límites naturales

Modelo	Ir_0^*	Ir_f^{**}	ΔIr
Modelo 01	0.95685	0.67660	0.28025
Modelo 02	0.55801	0.30696	0.25025
Modelo 03	0.92519	0.90913	0.01606

* Ir_0 = Índice de Resiliencia inicial.

** Ir_f = Índice de Resiliencia final.

La prueba de sectorización mediante límites naturales en los tres modelos no dio buenos resultados; tanto en el Modelo 01 como en el Modelo 02, ambas pruebas presentan una gran diferencia entre el Ir_0 y el Ir_f , para el Modelo 03 fue el cuarto resultado.

Esta metodología presenta inconvenientes en cuanto a su aplicabilidad para desarrollar la sectorización, puesto que no da una pauta clara en cuanto a la cantidad de límites que se pueden realizar y que por sí sola no puede discriminar si cierra una tubería con alguna importancia hidráulica dentro del modelo. Sin embargo, se aprovecha claramente este concepto cuando un punto final de la línea límite cae sobre un límite natural al momento de proponer la nueva metodología.

Sectorización mediante pérdidas de energía

Luego de aplicar esta prueba sobre el Modelo 01 se generaron 32 sectores; todavía se presentan sectores en serie. Sin embargo, mediante esta prueba se separan las cuatro alimentaciones como se esperaba, dada la forma simétrica del modelo. Para el Modelo 02 se generaron 6 sectores, sin sectores en serie. Mediante esta prueba se generó un sector independiente por cada conexión entre la tubería de transporte y la red de distribución. Para el Modelo 03 se generaron 7 sectores, sin sectores en serie. Al igual que en el Modelo 02, mediante esta prueba se generó un sector independiente por cada conexión entre la tubería de transporte y la red de distribución.

Tabla 3.- Comparación de resultados para la prueba de pérdidas de energía

Modelo	Ir_0^*	Ir_f^{**}	ΔIr
Modelo 01	0.95685	0.75566	0.20119
Modelo 02	0.55801	0.46080	0.09712
Modelo 03	0.92519	0.92225	0.00294

Como se observa en la tabla 3, nuevamente el modelo menos afectado es el Modelo 03. Esta es una prueba difícil de aplicar, puesto que en algunas zonas se encuentran muchas tuberías con la misma pérdida de energía, lo que hace difícil seleccionar qué tubería cerrar para conformar el límite.

La prueba de sectorización mediante pérdidas de energía en el Modelo 01 y en el Modelo 02 no presentó buenos resultados. Todavía se encuentra gran diferencia entre el I_{r_o} y el I_{r_f} . Sin embargo, para el Modelo 03 se obtuvo un mejor resultado. Este resultado se debe a que este modelo tiene un I_{r_o} muy alto (0,92519) mostrando que sus redes casi no son afectadas ante la presencia de la falla de una tubería. En este modelo se presentan una gran cantidad de tuberías con potencia cercana a cero, con lo cual se pueden probar muchos escenarios de límites hasta encontrar el mejor. Esto en sí es un inconveniente en cuanto a su aplicabilidad para desarrollar la nueva metodología de sectorización, puesto que no hay una forma clara para elegir que tubería debe ser cerrada.

Sectorización mediante caudal

Luego de aplicar esta prueba sobre el Modelo 01 se generaron 4 sectores, sin sectores en serie, dando un sector independiente por cada embalse. Sin embargo esta prueba no se pudo proseguir, debido a que al interior de la red por su topología no fue posible dividirla más. Debido a esto no se tomará en cuenta el resultado de esta prueba en el desarrollo de la metodología. Para el Modelo 02 se generaron 6 sectores, sin sectores en serie; hay un sector independiente por cada conexión entre la tubería de transporte y la red de distribución. Sin embargo, se vio la necesidad de cerrar algunas tuberías que presentaban caudales importantes. Para el Modelo 03 se generaron 7 sectores, sin sectores en serie; se generó un sector independiente por cada conexión entre la tubería de transporte y la red de distribución. Sin embargo, nuevamente se vio la necesidad de cerrar algunas tuberías que presentaban caudales importantes. En la tabla 4 se encuentra la comparación de los resultados para esta prueba.

Tabla 4.- Comparación de resultados para la prueba de caudal

Modelo	$I_{r_o}^*$	$I_{r_f}^{**}$	ΔI_r
Modelo 01	0.95685	0.75566	0.20119
Modelo 02	0.55801	0.46080	0.09712
Modelo 03	0.92519	0.92225	0.00294

La prueba de sectorización mediante caudal en general da muy buenos resultados, con la salvedad del resultado sobre el Modelo 01; sin embargo, es la prueba más difícil de aplicar debido a que, sin un criterio claro en la forma de cómo realizar la división de la red, no es fácil elegir que tuberías se deben cerrar y muchas veces se procedió a cerrar tuberías con un alto caudal, para poder independizar dos sectores. Así este criterio de muy buenos resultados, al presentar este inconveniente en cuanto a su aplicabilidad para desarrollar la metodología de sectorización, no fue elegido. De todas formas dentro de la metodología al utilizar el concepto de Potencia se está utilizando una combinación ente este concepto y el de pérdidas de energía.

Sectorización mediante presión

Para el Modelo 01 se generaron 16 sectores, algunos de los cuales se encuentran en serie. La división mediante esta prueba para este modelo fue muy sencilla dada la ubicación de sus embalses y su topografía. Para el Modelo 02 se encontró que al generar algunos límites se presentan nodos con presiones menores a los 15 m.c.a. e incluso con presiones negativas, por lo cual se tuvo que modificar el límite para evitar este efecto. En total se generaron 6 sectores, sin sectores en serie; también se generó un sector independiente por cada conexión entre la tubería de transporte y la red de distribución.

Para el Modelo 03 se generaron 7 sectores, sin sectores en serie; también se generó un sector independiente por cada conexión entre la tubería de transporte y la red de distribución. En la tabla 5 se pueden ver los resultados de aplicar esta prueba sobre los modelos.

Tabla 5.- Comparación de resultados para la prueba de presión

Modelo	$I_{r_o}^*$	$I_{r_f}^{**}$	ΔI_r
Modelo 01	0.95685	0.94240	0.01445
Modelo 02	0.55801	0.47942	0.07859
Modelo 03	0.92519	0.89623	0.02887

La prueba de sectorización mediante presión, en general da buenos resultados. Sin embargo, su aplicabilidad es relativamente simple solamente para sectores planos con dos alimentaciones y en los cuales no se presenten puntos con presiones bajas debido a alguna restricción en la tubería, ya sea por diámetros pequeños, altas pérdidas menores, altas rugosidades o alta densidad de consumo. Esto en redes más complejas causa mínimos de presión local que vician la conformación de la línea límite que desarrolla este concepto. Dado este inconveniente se decidió no utilizar este concepto para desarrollar la metodología de sectorización.

Sectorización mediante potencia

En el Modelo 01 luego de aplicar esta prueba se generaron 48 sectores, muchos de los cuales son sectores en serie. Al aplicar esta prueba sobre el Modelo 02 se generaron 6 sectores, sin sectores en serie; también se generó un sector independiente por cada conexión entre la tubería de transporte y la red de distribución. Sobre el Modelo 03 se generaron 7 sectores, sin sectores en serie; también se generó un sector independiente por cada conexión entre la tubería de transporte y la red de distribución. En la tabla 6 se encuentra el resultado de aplicar esta prueba sobre los modelos.

Tabla 6.- Comparación de resultados para la prueba de potencia

Modelo	$I_{r_o}^*$	$I_{r_f}^{**}$	ΔI_r
Modelo 01	0.95685	0.89468	0.06217
Modelo 02	0.55801	0.50601	0.05200
Modelo 03	0.92519	0.91737	0.00782

La prueba de sectorización mediante potencia es una combinación entre la prueba de sectorización por caudal y la prueba de sectorización por pérdidas de energía. En los tres modelos dio buenos resultados, siendo el segundo mejor resultado en cuanto a la diferencia entre el I_{r_o} y el I_{r_f} , dado que para el Modelo 01 el mejor resultado lo dio la prueba de sectorización por presión, para el Modelo 02 el mejor resultado lo dio la prueba de sectorización por caudal y para el Modelo 03 el mejor resultado lo dio la prueba de sectorización por pérdidas de energía, este claramente es la prueba de sectorización con mejores resultados globales, adicionalmente fue la prueba más fácil de usar, sin presentar ningún inconveniente en cuanto a su aplicabilidad para desarrollar la metodología de sectorización.

VALIDACIÓN DE LA NUEVA METODOLOGÍA

Como se expuso anteriormente, luego de realizar las pruebas de sectorización sobre los tres primeros modelos y de desarrollar la nueva metodología, esta se validó aplicándola sobre un cuarto modelo, el Modelo 04, para el cual se seleccionaron únicamente cuatro alimentaciones, con las cuales se generaron cuatro sectores independientes. Adicionalmente se aplicó la nueva metodología sobre los tres primeros modelos: sobre el Modelo 01, se aisló una tubería de transporte de las redes de distribución, procedimiento que generó una gran afectación sobre el modelo. Sin embargo, la generación de los límites no disminuyó mucho más el I_r . Sobre el Modelo 02 se seleccionaron únicamente tres de sus seis alimentaciones, lo cual resultó en una disminución de su I_{r_o} . Sin embargo, la generación de los límites no generó mayor afectación sobre el modelo. Sobre el Modelo 03 se seleccionaron tres de sus siete alimentaciones y siguiendo la metodología se dispuso de una nueva alimentación la cual se encuentra en el nodo final de la tubería de transporte, evitando así el efecto de un callejón sin salida; esto

incrementó el I_{r_0} en este modelo. Luego de generar los límites el modelo no presenta mayor afectación. En la tabla 7 se encuentran los resultados encontrados con la metodología.

Tabla 7.- Resultados de la metodología

Modelo	$I_{r_0}^*$	$I_{r_f}^{**}$	ΔI_r
Modelo 01	0.89906	0.88527	0.01379
Modelo 02	0.20042	0.18102	0.01940
Modelo 03	0.96002	0.95700	0.00302
Modelo 04	0.86999	0.86131	0.00868

CONCLUSIONES

Si bien el problema de diseñar una red de distribución óptima se considera resuelto, se deben buscar alternativas para enfrentar los problemas de mejorar las condiciones hidráulicas de redes ya construidas, que si bien pueden ser redes que no fueron diseñadas bajo el óptimo, o que de ser diseñadas bajo el óptimo, por algún cambio debido al crecimiento de la población han perdido su eficiencia, se requieren herramientas que permitan de alguna manera mejorar hidráulicamente la red.

El Índice de Resiliencia es efectivamente una medida que permite determinar el estado hidráulico de una red de distribución de agua potable. Se encontró que toda sectorización aplicada sobre una red de distribución de agua potable la afecta disminuyendo su Índice de Resiliencia en algún grado. El mejoramiento sobre la red depende del resultado del Índice de Resiliencia luego de la sectorización: si el I_r es superior a 0.5, se puede mejorar las condiciones de la red disminuyendo el gradiente hidráulico en sus entradas, que puede ser desarrollado mediante la gestión de presiones de la red o de cada sector. Si el I_r es inferior a 0.5, se puede mejorar las condiciones de la red mediante la aplicación del proceso de Resiliencia, el cual determina que tubos deben incrementar su diámetro para mejorar el I_r del sistema; se recomienda realizar esto por sector y no directamente sobre el modelo total.

La metodología desarrolla da una idea clara de cuales tuberías dependen hidráulicamente de una alimentación interna o de una salida de la tubería de transporte dentro del sector. Se encontró que el tamaño de los sectores resultantes luego de la metodología depende del número de alimentaciones, el cual define el número de sectores (un sector por cada alimentación); su tamaño depende de la capacidad de la alimentación y de la relación hidráulica entre las alimentaciones. Es mucho más fácil y da muchos mejores resultados aplicar esta metodología sobre redes que presentan una tubería de transporte clara.

RECOMENDACIONES

Cuando se presenten criterios de sectorización que no estén basados en la hidráulica y por alguna razón deban ser utilizados, se recomienda que de alguna forma sean introducidos dentro de la metodología como parte de la aceptación de un sector, dentro de la metodología la aceptación de un sector es que cumpla con entregar la presión mínima en todos sus nodos; o que luego de definir los sectores mediante la metodología, se cambien sus límites para que se cumplan con estos criterios. Tenga en cuenta que esto generará una mayor afectación sobre la red.

Dentro del desarrollo de la metodología se encontró que la presencia de una tubería de transporte dentro de una red facilita el proceso de sectorización. Como se observó en la aplicación de la metodología sobre el Modelo 01, la conformación de una tubería de transporte en una red que no cuenta con este tipo de tubería, genera una afectación importante en la hidráulica de la red, disminuyendo su I_r , debido a la gran cantidad de tuberías que deben cerrarse para aislar esta tubería. La

conformación de una tubería de transporte sobre redes que no la presenten, deberá ser un tema desarrollado con mayor profundidad en posteriores trabajos.

REFERENCIAS

Araque, Diego A., 2006, Optimización de Redes de Acueducto con el fin de Uniformizar el Estado de Presiones, Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Biswas, Asit K., 2003. De Mar del Plata a Kyoto: Un análisis de los dialogos sobre políticas mundiales del agua (“From Mar del Plata to Kyoto: An analysis of global water policy dialogues”). Recuperado el 14 de septiembre de 2007 de: <http://www.doccentre.net/docsweb/water1/water-biswas.htm>

Biswas, Asit K., 1978, Conferencia de las Naciones Unidas del Agua (“United Nations Water Conference: Summary and Main Documents”), Pergamon Press, Oxford.

Centro de Investigación en Agua (“Water Research Center”) – WRc, 2007, Beneficios Reales del Control de Presiones (“Real Benefits of Pressure Management”), WRc, Reino Unido.

Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados – CIACUA., 2006, Metodología para la Definición de Planos Óptimos de Presiones y Reducción de Agua No Contabilizada, Proyecto para el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. E.S.P. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Frontinus, Sextus Julius (traducción de Charles Bennett), 1961. Estrategias y los Acueductos de Roma (“Stratagemms and the Aqueducts of Rome”). Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts.

Jiménez, Mauricio, 2003, La sectorización hidráulica como estrategia de control de perdidas en sistemas de acueducto, Empresa de Acueducto de Bogotá.

Martinez, Jhon Jairo, 2002, Análisis Subsectorial Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico - CRA. Bogotá.

Morrison, John, 2004, Manejando Fugas Mediante Áreas de Medición por Distritos una aproximación practica (“Managing leakage by District Metered Areas: a practical approach”), IWA, Water21, Reino Unido.

Rossmann, Lewis A. (traducción por Grupo REDHISP – Instituto de Ingeniería del Agua y M.A., Universidad Politécnica de Valencia), 2002, EPANET 2.0 en Español – Manual de Usuario, U.S. Environmental Protection Agency (EPA).

Saldarriaga, Juan, 2007, Hidráulica de Tuberías Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos, Editorial, Alfaomega, Bogotá, Colombia.

Sturm, R., Thornton, J., 2005, Manejo Proactivo de Fugas Utilizando Áreas Medidas por Distritos y Manejo de Presión - ¿Es Aplicable en Norte América? (“Proactive Leakage Management using District Metered Areas (DMA) and Pressure Management – Is it applicable in North America?”), Leakage 2005 - Conference Proceedings, American Water Works Association.

Thornton, Julian, 2002, Manual de Control para Pérdidas de Agua (“Water Loss Control Manual”), Mc Graw Hill, New York, United States of America.

World Water Council (WWC), 2006. Agua en la Agenda Internacional (“Water on the International Agenda”). Recuperado el 14 de septiembre de 2007 de: <http://www.worldwatercouncil.org/index.php>.