

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**



**Tesis II**

Maestría en Ingeniería Civil

**Determinación de reglas de operación en redes de distribución de agua potable a fin de lograr un mantenimiento eficiente para el desprendimiento de biopelículas haciendo uso de lavado unidireccional.**

**Presentado por:**

Ing. Diva Patricia Rubio Patiño

**Asesor:**

Ing. Juan G. Saldarriaga

Bogotá D.C., Junio de 2012



Diva Patricia Rubio Patiño  
Universidad de los Andes  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados

MIC 201210 18



*A mi familia y amigos  
por su apoyo incondicional*



## Tabla de Contenido

Tabla de Contenido.....	i
Lista de Figuras .....	v
Lista de Tablas .....	vi
INTRODUCCIÓN .....	1
1.1    Objetivos .....	2
1.1.1    Objetivo General.....	2
1.1.2    Objetivos Específicos .....	2
1.2    Contenido General.....	2
2    MARCO TEÓRICO .....	4
2.1    Biopelículas.....	4
2.2    Limpieza en redes de distribución de agua potable.....	5
2.3    Programa de lavado hidráulico .....	7
2.3.1    Objetivos.....	7
2.3.2    Lavado convencional .....	8
2.3.3    Lavado unidireccional.....	8
2.3.4    Lavado continuo .....	10
2.3.5    Costos y beneficios .....	10
2.3.6    Medición de resultados de lavado .....	11
2.3.6.1    Reducción de quejas de los usuarios .....	12
2.3.6.2    Mejora de la calidad del agua .....	12
2.3.6.3    Remoción de biopelículas .....	12
2.3.6.4    Aumento del nivel de desinfectante residual .....	12



2.3.6.5	Beneficios hidráulicos.....	12
2.3.6.6	Costos .....	13
2.3.7	Elaboración de un plan de lavado .....	13
2.4	Procedimiento de lavado hidráulico.....	13
2.4.1	Identificación de las tuberías o áreas a lavar .....	14
2.4.1.1	Manual .....	14
2.4.1.2	Automática .....	15
2.4.2	Selección de ruta/circuito – Aislamiento mediante válvulas .....	15
2.4.2.1	Selección de ruta.....	15
2.4.2.2	Selección de válvulas.....	16
2.4.2.3	Selección/modelación de hidrantes que permiten realizar el lavado ....	17
2.4.3	Condiciones hidráulicas .....	18
2.4.3.1	Esfuerzo cortante .....	19
2.4.3.2	Velocidad de flujo.....	19
2.4.4	Duración del lavado.....	20
2.4.5	Frecuencia de lavado.....	20
2.4.6	Recomendaciones.....	20
2.4.7	Optimización.....	22
2.4.7.1	Algoritmos Genéticos .....	23
2.4.7.2	Programación por restricciones .....	25
3	METODOLOGÍA.....	26
3.1	Software utilizado para la Modelación Hidráulica.....	26
3.1.1	Redes .....	26



3.1.2	EPANET .....	26
3.1.3	GANetXL.....	27
3.2	Red utilizada en la investigación.....	28
3.3	Metodologías previas.....	29
3.3.1	Modelo 1 – Algoritmos Genéticos.....	29
3.3.1.1	Definición de rutas de lavado.....	30
3.3.1.2	Selección accesorios a operar .....	31
3.3.1.3	Optimización del lavado hidráulico.....	32
3.3.1.4	Función Objetivo .....	35
3.3.2	Modelo 2 - Programación por restricciones.....	38
3.3.2.1	Modelo .....	38
3.3.2.2	Función Objetivo .....	45
3.3.2.3	Implementación .....	45
3.4	Modelo 3 – Algoritmos Genéticos Propuesto.....	47
3.4.1	Formulación del problema .....	48
3.4.2	Selección de rutas y accesorios .....	48
3.4.3	Metodología de optimización.....	49
3.4.3.1	Definición de los parámetros .....	49
4	RESULTADOS.....	51
4.1	Análisis solución modelo 1.....	51
4.1.1.1	Definición de rutas de lavado y selección de accesorios. ....	53
4.1.1.2	Optimización del lavado.....	53
4.1.1.3	Función objetivo.....	54



4.1.1.4	Implementación .....	54
4.2	Análisis solución modelo 2.....	54
4.2.1.1	Definición de rutas de lavado y selección de accesorios.....	55
4.2.1.2	Optimización del lavado.....	56
4.2.1.3	Función objetivo.....	56
4.2.1.4	Implementación .....	56
4.3	Resultados y Análisis solución modelo 3 .....	57
4.3.1.1	Seleccionar las tuberías a lavar.....	57
4.3.1.2	Accesorios a operar.....	58
4.3.1.3	Optimización.....	59
5	CONCLUSIONES.....	65
6	Bibliografía.....	67



## Lista de Figuras

Ilustración 1. Esquema de la red R28. ....	29
Ilustración 2. Diagrama de flujo para selección de los accesorios a operar modelo 1. ....	32
Ilustración 3. Diagrama de flujo del algoritmo genético de optimización modelo 1. ....	35
Ilustración 4. Diagrama de flujo para el cálculo del valor de influencia modelo 2. ....	41
Ilustración 5. Diagrama de flujo para el cálculo de la condición de la zona de influencia modelo 2. ....	42
Ilustración 6. Diagrama de flujo que describe el algoritmo de solución aproximada modelo 2. ....	43
Ilustración 7. Diagrama de flujo que describe la función de ordenar y filtrar modelo 2. ....	44
Ilustración 8. Diagrama de flujo que describe la función de poda modelo 2. ....	45
Ilustración 9. Interfaz del módulo de lavado del programa REDES modelo 2. ....	46
Ilustración 10. Tuberías a lavar modelo 1. ....	51
Ilustración 11. Ruta de lavado N°1 para modelo 1. ....	51
Ilustración 12. Ruta de lavado N°1 y accesorios a operar modelo 1. ....	52
Ilustración 13. Accesorios de la red empleados modelo 2. ....	54
Ilustración 14. Tuberías a lavar modelo 2. ....	55
Ilustración 15. Velocidades obtenidas modelo 2. ....	55
Ilustración 16. Distribución de accesorios modelo 3. ....	57
Ilustración 17. Tuberías a lavar modelo 3. ....	58
Ilustración 18. Convergencia F1 modelo 3. ....	63
Ilustración 19. Comparación costos de funciones objetivo modelo 3. ....	64



## Lista de Tablas

Tabla 1. Relación de técnicas de lavado con características de la tubería y efectos obtenidos.....	6
Tabla 2.- Requerimientos de caudal e hidrantes para producir una adecuada velocidad de lavado. (Antoun, 1999).....	17
Tabla 3.- Numero de hidrantes que se deben abrir para obtener un lavado eficiente dado el diámetro. ....	18
Tabla 4. Velocidades requeridas para diferentes características de limpieza. ....	19
Tabla 5. Velocidades de remoción de biopelículas para varios autores. (Tomado de Escovar, 2009). ....	20
Tabla 6. Estado de hidrantes y válvulas para lavado de la ruta N°1 Modelo 1. ....	52
Tabla 7. Velocidad de lavado en las tuberías de interés de la ruta N°1 Modelo 1. ....	53
Tabla 8. Nivel de importancia de las válvulas Modelo 3. ....	58
Tabla 9. Prueba función objetivo Modelo 3. ....	61



## INTRODUCCIÓN

Las empresas prestadoras del servicio de distribución de agua potable están encargadas de entregar a los usuarios agua con unas características físico-químicas específicas y a una presión determinada. Uno de los fenómenos que afecta la calidad del agua y las condiciones hidráulicas de la red es la presencia de biopelículas y su desprendimiento. En este informe se formula una metodología para realizar lavado unidireccional como una solución al control de biopelículas en redes de distribución de agua potable RDAP. Se desea brindar una herramienta a los encargados de toma de decisiones en las empresas para mejorar la prestación de servicio y el uso de infraestructura disponible por medio de mantenimiento preventivo.

El lavado unidireccional en RDAP es una de las técnicas de limpieza más usadas en la actualidad debido a su fácil implementación y a su efectividad para la remoción de material acumulado al interior de las tuberías. Sin embargo, hasta la fecha las metodologías de optimización de este proceso teniendo en cuenta aspectos operacionales, hidráulicos y económicos han sido pocas. Este hecho, motivó al Centro de Investigación en Acueductos y Alcantarillados de la Universidad de los Andes CIACUA a interesarse en el tema desarrollando metodologías de optimización que faciliten y mejoren la implementación de programas de lavado unidireccional en las empresas. Hasta el momento dos metodologías se han planteado: Metodología por Algoritmos Genéticos presentada en el trabajo de grado (Alvarez, 2009) y metodología por Programación por Restricciones presentada en el trabajo de grado (Rothstein, 2011). Este trabajo pretende darle continuidad a estas investigaciones identificando sus debilidades y planteando una tercera metodología que aproveche los beneficios de las dos anteriores y mejore los resultados obtenidos.



## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo General

Formular una estrategia óptima para la selección de un plan de lavado hidráulico unidireccional (UDF) de redes de distribución de agua potable dadas las condiciones topológicas e hidráulicas del sistema.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos de este trabajo consisten en darle continuidad a las metodologías investigadas en el CIACUA para mejorar los procesos de optimización de lavados hidráulicos unidireccionales como herramienta en la remoción de biopelículas.

- a) Describir e investigar el proceso de lavado y en especial su aplicación para desprendimiento de biopelículas.
- b) Establecer un procedimiento para realización de UDF que integre aspectos hidráulicos y operacionales.
- c) Realizar un análisis cualitativo y cuantitativo de las alternativas de solución implementadas
- d) Identificar las limitaciones de las metodologías anteriores y la actual.

## 1.2 Contenido General

El trabajo se divide en tres partes principales. La primera es una revisión de aplicación de las metodologías de lavado hidráulico existentes, la segunda es la propuesta de una metodología que permita optimizar el proceso de lavado hidráulico unidireccional para el control de biopelículas y finalmente se realiza una comparación de la metodología propuesta y metodologías anteriores planteadas por el CIACUA.

- Capítulo 1: Se introduce el tema a tratar, explicando los objetivos a alcanzar e incluyendo una descripción general del informe.



- Capítulo 2: Se define la problemática de las biopelículas y los programas de lavado hidráulico. Posteriormente, se presenta una recopilación de lo encontrado en la literatura acerca de las condiciones hidráulicas relevantes en problemas de lavado.
- Capítulo 3: Se presentan los métodos investigados por el CIACUA, se introduce el método y software a utilizar y se plantea la metodología propuesta para dar solución al problema planteado.
- Capítulo 4: Se exponen los resultados y su análisis.
- Capítulo 5: Se exponen las conclusiones.
- Capítulo 6: Se enumeran las referencias utilizadas para el proceso investigativo de este informe.



## 2 MARCO TEÓRICO

Como parte de esta investigación se realizó una búsqueda y revisión del material bibliográfico relacionado con formación de biopelículas en RDAP, técnicas de lavado y en particular lavado hidráulico unidireccional, a fin de establecer los datos relevantes al realizar un proceso de lavado en RDAP, también se realizó una revisión de técnicas de optimización empleadas para este tipo de problemas. En este capítulo, se sintetiza esta información.

### 2.1 Biopelículas.

Las biopelículas son comunidades de microorganismos que logran sobrevivir a los procesos de potabilización y desinfección y se unen a las paredes de las tuberías de la red. Aunque en general los microorganismos de las biopelículas son inofensivos, algunas biopelículas brindan protección a organismos patógenos que pueden ser potencialmente dañinos para la salud humana. Es por esto que se han realizado múltiples estudios para desarrollar acciones que permitan controlar este fenómeno. La unidad básica de una biopelícula es una microcolonia que puede estar formada por bacterias de una o varias especies, y su correspondiente matriz de sustancia polimérica extracelular (SPE). Dependiendo de la especie involucrada la microcolonia puede estar compuesta de 10-25% de bacterias y un 75-90% de SPE (Reyes, 2004). La presencia y formación de biopelículas en tuberías depende de la interacción de factores como: disponibilidad de nutrientes, condiciones de flujo, temperatura, tipo de superficie y efecto de las partículas.

La presencia de biopelículas en un sistema de distribución afecta la hidráulica de flujo y la calidad del agua. La hidráulica se ve perturbada ya que la biopelícula cambia las características de la pared interna de la tubería afectando la rugosidad y por consiguiente el régimen hidráulico. La calidad se ve afectada en el cambio de olor, sabor, coloración del agua y en algunas ocasiones puede tornarse perjudicial para la salud.



Los eventos de desprendimiento en las biopelículas se dan cuando las fuerzas externas causadas por el fluido, son mayores que la resistencia interna de la matriz que mantiene unida la biopelícula por lo que los dos mecanismos de desprendimiento son por aumento del esfuerzo cortante o por disminución de la resistencia interna. Existen diferentes técnicas para el control de biopelículas entre las que se encuentran: el lavado hidráulico convencional, el lavado hidráulico unidireccional, el control con mecanismos físicos (pigs) y el control con sustancias químicas. Se ha encontrado que las técnicas de lavado convencional y unidireccional son las más efectivas en cuanto a costos e implementación en campo.

## **2.2 Limpieza en redes de distribución de agua potable.**

La técnica de limpieza que se debe implementar en un sistema responde a las necesidades y características especiales de este. La selección del procedimiento debe considerar el tipo de tubería, el tamaño de la tubería, el tipo de problema específico a solucionar, las propiedades y estado del sistema, la ubicación de válvulas e hidrantes, la localización de puntos para el lanzamiento de dispositivos de limpieza, entre otros. Adicionalmente, cada técnica presenta un tiempo esperado de beneficio y una relación de costos distinta. Entre las distintas técnicas o métodos existentes para la limpieza de tuberías se presentan lavados hidráulicos que requieren de un aumento de la velocidad para incrementar el esfuerzo cortante y así limpiar el conducto de la tubería; lavados que requieren el vaciado de las tuberías, por medio del flujo de aire a presión o por medio de sistemas mecánicos que incluyen la conducción de esponjas o émbolos que limpian el conducto; limpieza química o manual y revestimiento de tuberías.

A continuación, se muestra una guía general para distintas técnicas de limpieza, tomada de (AWWA, 2003). Esta guía, relaciona el tipo de técnica requerida con el material, tamaño y condición estructural de la tubería, los usos para los cuales se recomienda, el tiempo estimado de beneficio que se puede reflejar como una frecuencia requerida, un rango unitario de los costos, y consideraciones que deben ser tenidas en cuenta.



**Tabla 1. Relación de técnicas de lavado con características de la tubería y efectos obtenidos.**

		Lavado Hidráulico Convencional	Lavado Hidráulico Unidireccional	Lavado con aire	Lavado mecánico con espuma de poliuretano	Lavado mecánico con émbolos ("pigs")	Limpieza química	Jetting or Balling	Limpieza y Recubrimiento para rehabilitación (no estructural)	Limpieza y Recubrimiento para rehabilitación (estructural)
Recomendado para	Tipo de tubería	Todas	Todas	Todas	Todas	Principalmente hierro fundido o acero sin recubrimiento	Principalmente hierro fundido o acero sin recubrimiento	Todas	Hierro fundido o acero sin recubrimiento	Todas
	Tamaño de tubería	12" (300 mm) ó menores	12" (300 mm) ó menores	12" (250 mm) ó menores	Todas	Todas	Todas	8" (200 mm) hasta 42" (1 m)	3" (75 mm) ó mayores	3" (75 mm) ó mayores
	Condición estructural	Cualquiera	Cualquiera	Media	Media	Buena	Media	Buena	Buena	Cualquiera
	Reacción a quejas de consumidores acerca de la apariencia, sabor y olor	vvv								
	Reemplazar calidad pobre del agua, Aumentar desinfectante residual	vvv								
	Remoción de sedimentos desprendidos	v	vvv	vvv	vvv	vvv	vvv	vvv	vvv	vvv
	Disminución de la demanda de desinfectante		vv	vv	vvv	vvv	vvv	vvv	vvv	vvv
	Remoción de biopelícula, Reducción de bacterias heterotróficas		vv	vv	vvv	vvv	vvv	vvv	vvv	vvv
	Remoción de sarro suelto			v	vvv	vvv	vvv	vv	vvv	vvv
	Remoción de sarro adherido fuertemente				v	vvv	vvv	vvv	vvv	vvv
	Extensión de la vida probable de la tubería								vv	vvv
Incremento de la resistencia de la tubería									vvv	
Tiempo de beneficio probable		Hasta 1 año	6 meses a 3 años	1 a 5 años	3 a 7 años	3 a 10 años	3 a 10 años	3 a 7 años	25 a 50 años	25 a 50 años
Rango unitario de costos ("1" = mínimo)		1	2	3	4	5	5	7	8	9
Consideraciones del servicio de consumidores		Recomendar el no consumo a los usuarios durante el lavado	Recomendar el no consumo a los usuarios durante el lavado	Usualmente suspensión del servicio de 1 a 4 horas	Usualmente suspensión del servicio de 1 a 4 horas	Usualmente suspensión del servicio de 1 a 4 horas	Usualmente se requiere conexión a otras tuberías	Usualmente se requiere conexión a otras tuberías	Usualmente se requiere conexión a otras tuberías	Usualmente se requiere conexión a otras tuberías
Otras consideraciones		-Descarga de agua, sedimentos -Decoloración -Puede revolver sedimentos -Desperdicio de agua -Mantenimiento de presión residual	-Descarga de agua, sedimentos -Decoloración -Confinamiento de agua mala -Menos agua que la convencional -Planeación requerida	-Requerimiento de filtros, compresores -Requerimiento de deflectores -Menos agua que lavado convencional o unidireccional	-Descarga de agua, sedimentos -Decoloración -Puertos de lanzamiento	-Descarga de agua, sedimentos -Decoloración -Puertos de lanzamiento -Remoción de sarro puede causar problemas	-Manejo de materiales peligrosos -Disposición de solución de limpieza -Disposición de agua de limpieza -Remoción de sarro puede causar problemas	-Herramientas sanitarias -Puertos de lanzamiento -Remoción de sarro puede causar problemas	-3 a 6 semanas para la mayoría de calles -Impactos en la comunidad -1/4 a 1/2 del costo de remplazo de tubería	-3 a 6 semanas para la mayoría de calles -Impactos en la comunidad -1/2 a 1 1/2 del costo de remplazo de tubería

	No recomendado	Definición de condiciones estructurales:	
√	Levemente efectivo	"Cualquiera"	La tubería puede soportar fuertes flujos y presiones normales.
√√	Medio efectivo	"Media"	Algunas goteras pero no rupturas
√√√	Bastante efectivo	"Buena"	Sin registro de goteras o rupturas



## 2.3 Programa de lavado hidráulico

El lavado como técnica de limpieza es la más antigua y una de las más usadas debido a su fácil ejecución, efectividad y costos. Esta técnica es empleada con frecuencia para mejorar la calidad del agua permitiendo aumentar los niveles de desinfectante residual, expulsar bacterias del sistema, remover sedimentos suspendidos, remover biopelículas y mejorar problemas de olor, coloración y sabor. Esto puede ayudar a mejorar la hidráulica del sistema, reducir la demanda de cloro y mitigar posibles riesgos para la salud. Algunas limitaciones de esta técnica son que no es efectiva para remover sedimentos y biopelículas de tuberías con diámetros mayores a 300 mm, no puede ayudar a resolver problemas provenientes de las fuentes o de la planta de tratamiento y dependiendo las características del sistema puede ser una solución a corto plazo.

Existen tres tipos básicos de lavado hidráulico: convencional, unidireccional y continuo. El lavado convencional es usado principalmente como una medida de reacción, el lavado unidireccional es recomendado para lavado programado como herramienta de mantenimiento y el lavado continuo se recomienda para lavado en zonas muertas. Aunque el lavado convencional a corto plazo parece ser menos costoso porque requiere de menos personal, planeación y tiempo de ejecución, la eficiencia del lavado unidireccional hace que en la mayoría de los casos este represente un menor costo a largo plazo (AWWA, 2003).

### 2.3.1 Objetivos

Los objetivos que se buscan obtener al implementar un programa de lavado hidráulico en muchas empresas son: 1) minimizar las quejas de los usuarios manteniendo la calidad del agua y presiones adecuadas en la red, 2) reducir o eliminar problemas de salud pública como contaminantes químicos y microbiológicos en el agua, 3) reducir o eliminar problemas de color, sabor y olor, 4) realizar mantenimiento estructural del sistema para mantener optimas condiciones hidráulicas, 5) ejercitar los hidrantes como parte de un



programa de mantenimiento, 6) descubrir problemas en el sistema de distribución como fugas, accesorios inoperables, etc.

### 2.3.2 Lavado convencional

Está definido como la apertura de hidrantes en un área específica durante un tiempo determinado hasta obtener una calidad de agua deseada, lograr remoción de sedimentos o remoción de biopelículas. Algunos de los parámetros que determinan el tiempo de apertura son la detección de desinfectante residual, la reducción de la turbidez y la reducción del color.

Generalmente, los programas de lavado hidráulico convencional se implementan como medidas correctivas dando respuesta a quejas de los usuarios del sistema o como una medida de mantenimiento preventivo. También son usados después de realizar una reparación en el sistema para limpiar y desinfectar antes de retornar a la prestación del servicio. Este tipo de lavado permite la restauración de residuos desinfectantes y expulsión de agua de baja calidad pero como efectos posteriores se presentan quejas crecientes por parte de los usuarios, pérdidas considerables de agua, mejoras mínimas y de poca duración y un potencial incremento de coliformes (Carvajal, 2007). Tiene como desventaja que los sedimentos pueden ser transportados a las tuberías adyacentes por cambios en velocidad y dirección, adicionalmente, no requiere la manipulación de válvulas por lo que no se pueden maximizar las velocidades. Como ventajas tiene que se realiza de forma rápida con requerimientos mínimos de mano de obra, planeación y entrenamiento.

### 2.3.3 Lavado unidireccional

El lavado hidráulico unidireccional es un método mejorado del lavado convencional el cual consiste en separar una sección de la red por medio del cierre de válvulas y apertura de hidrantes de forma organizada. Es una técnica eficiente para la remoción de biopelículas debido a las velocidades de flujo que maneja y a los esfuerzos cortantes que genera. En esta metodología se busca que el agua viaje en una dirección, de lugares limpios a



contaminados y de diámetros grandes a pequeños esto a fin, de que la biopelícula desprendida y contaminantes salga del sistema.

Por medio de esta técnica se alcanza una mayor limpieza dado que mayores velocidades logran un mayor arrastre de sedimentos y hay un menor desperdicio de agua ya que se alcanza la calidad deseada en un menor tiempo debido a la planeación secuencial; con esta técnica de lavado se utiliza aproximadamente el 60% del agua de lo que se usaría con un lavado convencional. Otras ventajas del lavado hidráulico unidireccional para la RDAP son:

- a) Incremento en la velocidad, lo que promueve un mejor lavado de la tubería.
- b) Remoción de depósitos minerales y biológicos mejorada.
- c) Control de sabor y olor.
- d) Reducción de la turbidez.
- e) Reducción de la frecuencia de lavado.
- f) Reducción del uso de agua para lavado.
- g) Promoción de mantenimiento preventivo.
- h) Mantenimiento de hidrantes.
- i) Reducción de costos en comparación al lavado tradicional.

Las etapas que se deben tener en cuenta al ejecutar un lavado hidráulico unidireccional son:

- a) Conocer la hidráulica del sistema y contar con un modelo calibrado.
- b) Identificar los tubos a lavar para localizar el problema e identificar cual debe ser la velocidad de flujo.
- c) Dividir el sistema en circuitos independientes.
- d) Desarrollar una guía que especifique la apertura y cierre de válvulas e hidrantes controlando la operación con un mapa individual para los operarios.
- e) Realizar reparaciones necesarias en tuberías, válvulas o hidrantes.



- f) Realizar los lavados en horas de la noche o madrugada para evitar inconvenientes con los usuarios y tener un promedio alto de presión.
- g) Contar con los equipos y procedimientos de seguridad adecuados.

#### 2.3.4 Lavado continuo

Este tipo de lavado se utiliza para mantener un flujo continuo de agua y evitar estancamiento. Es recomendable en redes con gran cantidad de puntos muertos o con problemas de circulación de agua.

#### 2.3.5 Costos y beneficios

Los costos de un programa de lavado hidráulico se dividen en costos directos e indirectos. Algunos de los costos cuantificables o directos son el costo de mano de obra, los costos del agua usada y el costo de gerencia del programa; y algunos costos no cuantificables son daños a propiedad, interrupción del tráfico, entre otros. También se puede tener un costo potencial negativo en el caso de que el lavado no sea realizado de manera adecuada, por ejemplo, si el contaminante se expande a otros sectores de la red, si los hidrantes no están en buen estado para ser operados, etc. Por otro lado, los beneficios obtenidos de un lavado no son fáciles de cuantificar; pueden incluir conformidad con estándares de calidad, reducción de quejas de los usuarios, mejoras en la calidad del agua. En general el beneficio se puede medir en función del objetivo que se tiene para el lavado. (AWWA, 2004) desarrolló una metodología para evaluar los costos y beneficios asociados con un programa de lavado a partir de una revisión bibliográfica e información de programas de lavado hidráulico de distintas empresas estadounidenses. Según el estudio los costos de lavado se pueden dividir en cuatro categorías:

- Costos financieros para la empresa: Estos costos incluyen costos tangibles como el trabajo en campo y oficina del personal, los costos de producción del agua empleada en el lavado, los costos de disposición del agua en caso de ser necesarios permisos o tratamiento antes del ingreso al sistema de alcantarillado, costo de



notificación a los usuarios, equipos y vehículos, costos del análisis de muestras y costos por posibles daños a las tuberías durante el lavado.

- Costos financieros para los usuarios: estos son costos tangibles pero externos a la empresa prestadora de servicio como daño a la propiedad por inundación accidental, daños en la ropa por decoloración del agua al lavar, etc.
- Costos financieros intangibles para la empresa, representados en daños a la imagen de la empresa como: insatisfacción de los usuarios por mala calidad del agua o bajas presiones, inundaciones en las calles, percepción de desperdicio de agua, decoloración, posible expansión de un contaminante y posible reflujo por conexiones erradas.
- Costos financieros intangibles para los usuarios: Inconvenientes y retrasos por cierre de calles e interrupción del tráfico e impactos ambientales. Estos costos también se convierten en costos intangibles para la empresa ya que afectan su imagen.

Los beneficios enumerados en este mismo estudio son:

- Aumento de la satisfacción de los usuarios.
- Mantenimiento de la salud pública a través del mantenimiento de estándares de calidad.
- Evitar el pago de tarifas, multas y penalidades por calidad.
- Mantenimiento estructural de las tuberías.
- Mantenimiento de hidrantes.
- Identificación de problemas en el sistema.

### 2.3.6 Medición de resultados de lavado

La efectividad del lavado depende en principio de los objetivos que se quieren alcanzar; a continuación se describen algunos de los parámetros más usados para la determinación de la efectividad del lavado.



#### *2.3.6.1 Reducción de quejas de los usuarios*

Es una medida indirecta y subjetiva de la calidad del agua. Puede estar relacionada por un lado con el color y aspecto del agua distribuida y por el otro con deficiencias en las presiones en el sistema. Adicionalmente es un aspecto que debe evitarse en especial si se desarrolla un programa de lavado para mantenimiento.

#### *2.3.6.2 Mejora de la calidad del agua*

Una forma de medir la mejora en la calidad del agua durante el lavado es midiendo la turbiedad del agua de descarga iniciando en el momento de apertura del hidrante, hasta que se obtenga un valor de turbiedad aceptable. También se usan parámetros como el color, la concentración de hierro y sólidos suspendidos.

#### *2.3.6.3 Remoción de biopelículas*

Cuantificar la remoción de biopelículas a través de una disminución en las unidades formadoras de colonias por mililitro UFC/ml. Las UFC generalmente son inofensivas pero estas pueden proteger organismos patógenos perjudiciales para la salud como coliformes.

#### *2.3.6.4 Aumento del nivel de desinfectante residual*

Esta no es una medida muy empleada en la medición de la efectividad de un programa de lavado, ya que, no se conoce con certeza la relación entre cantidad de desinfectante y efectividad del lavado a largo plazo. A corto plazo se sabe que aumenta el nivel de desinfectante residual manteniéndose los niveles de calidad requeridos.

#### *2.3.6.5 Beneficios hidráulicos*

Se puede medir la efectividad del lavado mirando las mejoras en la capacidad hidráulica de la tubería; este proceso requiere tiempo, mano de obra y análisis de datos. También se puede usar el número de problemas encontrados como fugas o accesorios en mal estado gracias al lavado.



#### 2.3.6.6 Costos

Costos del lavado como mano de obra o costo de la cantidad de agua empleada en el lavado.

#### 2.3.7 Elaboración de un plan de lavado

Para la elaboración de un plan de lavado lo primero que se debe tener en cuenta es el objetivo que se busca obtener ya sea reducción de quejas de los usuarios, expulsión de un contaminante de la red, remoción de biopelícula, etc. Los tiempos de los lavados y la frecuencia se deben planear con base en información obtenida previamente; para esto se debe ir generando una base de datos donde se registren los resultados obtenidos de cada lavado. Se debe contar con un modelo de la red donde se tengan ubicadas las válvulas e hidrantes del sistema.

Componentes de un plan de lavado:

- Pre-planeación
- Procedimientos de lavado
- Programación
- Notificación pública
- Recolección de datos
- Terminación del lavado
- Evaluación del programa

### 2.4 Procedimiento de lavado hidráulico

Algunas empresas realizan programas de lavado en intervalos regulares de tiempo o cuando se sabe que va a ocurrir un problema en el sistema (mantenimiento); otras empresas realizan lavados solo como respuesta a problemas que se presentan y realizan el procedimiento en el área donde se localiza el problema (expulsión de contaminantes) y otras utilizan una mezcla de los dos usos. El uso más reportado en la literatura es el segundo debido al interés que se generó en el tema a partir de la preocupación por ataques terroristas. Aunque, el uso asociado al mantenimiento de RDAP se ha



documentado mucho menos, es importante que las empresas realicen mantenimientos rutinarios que permitan controlar la calidad del agua y la hidráulica de flujo, en especial para cumplir con las regulaciones de calidad de agua que cada vez son más exigentes, disminuir costos de bombeo y aumentar la longevidad de las tuberías facilitando los procesos de rehabilitación y reparación.

A continuación se muestran los diferentes aspectos y etapas que se tienen en cuenta para un proceso de planeación de lavado hidráulico.

#### 2.4.1 Identificación de las tuberías o áreas a lavar

Algunos criterios que permiten determinar los sectores que deben lavarse en redes de distribución de agua potable son las quejas de los usuarios, información sobre la calidad del agua (altos tiempos de retención, bajos niveles de cloro residual), zonas muertas, condición y tamaño de las tuberías (presencia de fugas), comportamiento hidráulico de la red, mantenimiento de hidrantes y válvulas y diagnóstico del problema (corrosión, infiltraciones, etc.). Según Chadderton, Cristean y Henry-Unratu citado en (AWWA, 2004) un criterio para identificar áreas de lavado consiste en identificar las áreas con quejas, zonas con bajo nivel de cloro, dirección del flujo, puntos muertos, zonas de presión, tamaños de las fuentes, hidráulica y mantenimiento de hidrantes.

El proceso de identificación de las tuberías a lavar se puede efectuar de forma manual o automática.

##### 2.4.1.1 *Manual*

Requiere del conocimiento experto del personal que opera la red, quien a partir de criterios relacionados con la operación del sistema puede identificar las tuberías con mayor propensión a la acumulación de material ya sea orgánico o mineral. Dentro de los criterios operativos que pueden emplearse se encuentran la identificación de los sectores con mayor frecuencia de reportes sobre problemas de turbiedad y en donde se



encuentran las tuberías de mayor edad o cuyos materiales favorecen la formación de películas.

#### *2.4.1.2 Automática*

Se basa en criterios relacionados con variables hidráulicas de la red tales como la velocidad y la edad del agua, cuyos valores pueden obtenerse de programas computacionales como Redes (desarrollado por la Universidad de los Andes) o Epanet. Por ejemplo, en la metodología propuesta por (Alvarez, 2009) se utilizó la velocidad media del flujo correspondiente al esquema de operación habitual, para la condición de demanda promedio diaria del sistema, como criterio de selección de las tuberías que deben lavarse, ya que esta condición permite identificar los sitios donde se favorece la acumulación de material. Para (Carvajal, 2006) se deben seleccionar tuberías con valores de velocidad inferiores a 0.76 m/s, que indican una alta probabilidad de presencia de películas y sedimentos en el interior de las tuberías.

### 2.4.2 Selección de ruta/circuito – Aislamiento mediante válvulas

#### *2.4.2.1 Selección de ruta*

La etapa de selección de ruta en la planeación de un lavado es usada principalmente en la técnica de lavado unidireccional para aumentar las velocidades de flujo, en los protocolos y guías de buenas técnicas de manejo de la operación y mantenimiento de redes de agua potable como (Fédération Canadienne des municipalités, 2005) se dan como recomendaciones para la selección de ruta que el lavado unidireccional debe realizarse empezando desde la fuente y avanzando desde las tuberías de mayor diámetro hasta las más pequeñas de forma sistemática. Otros autores como (Antoun, 1999) y (Friedman, 2002) sugieren los siguientes pasos: aislar secciones de tubería o circuitos cerrando válvulas de manera apropiada y abriendo los hidrantes de manera organizada, manejar los hidrantes de manera secuencial empezando su operación de la fuente hacia aguas abajo, desplazarse de diámetros grandes a diámetros pequeños y de secciones limpias hacia



secciones sucias y finalmente dimensionar el circuito de acuerdo con el tamaño de la cuadrilla, duración del lavado, equipo disponible y localización de las fuentes, plantas de tratamiento, sistemas de bombeo, etc. La selección de circuitos y lavado unidireccional también ha sido documentada para abordar problemas de contaminantes en la red, donde lo que se busca es aislar un circuito para evitar que un contaminante inyectado pueda poner en riesgo la vida de la población. (Poulin, 2008) muestra un ejemplo de este uso; en este caso lo que se hace es aislar los circuitos contaminados por medio del cierre de válvulas y dejarlos conectados únicamente a una fuente de agua limpia que permita la realización del lavado. En general la documentación de esta parte del procedimiento del lavado está relacionada con la experiencia de un operador del sistema y dos reglas de operación 1) que el agua se dirija de zonas limpias a sucias y 2) que el lavado se realice de diámetros grandes a pequeños. En (Álvarez, 2009) se propone una metodología donde las tuberías a lavar se agrupan formando rutas de lavado, las cuales deben aislarse a fin de direccionar el flujo hacia las tuberías que se pretende limpiar. Estas rutas se construyen teniendo en cuenta la distancia topológica de los nudos de las tuberías que deben lavarse a la fuente de abastecimiento, así como el valor de los trazadores inversos y directos calculados en los nudos adyacentes a aquéllos que hacen parte de la ruta de lavado, buscando crear rutas cortas pero que agrupan la mayor cantidad de tuberías a lavar. Los trazadores tanto directos como inversos y la distancia topológica a la fuente son variables hidráulicas, que permiten, identificar el camino por donde viaja el mayor caudal hacia las tuberías a lavar. (Schaetzen, 2000) creó una metodología donde la ruta se delimita a partir de la selección de accesorios siguiendo dos reglas básicas 1) cerrar todas las tuberías que se encuentran aguas abajo del nudo de la tubería a lavar y 2) cerrar todas las tuberías que tienen el mismo nudo aguas arriba que la tubería a lavar.

#### *2.4.2.2 Selección de válvulas*

La selección de válvulas es otro de los aspectos que se manejan generalmente a partir del conocimiento de un operador experto de la red; algunas recomendaciones adicionales son: identificar las válvulas cercanas a fin de ocasionar la menor afectación del servicio en



todo el sistema, localizar los hidrantes cerca a la ruta de lavado y las válvulas a operar facilita las labores operativas a la hora de llevar a cabo el lavado hidráulico de la red, selección de las válvulas a operar por su cercanía a la ruta, a fin de que ésta pueda aislarse del resto de la red dirigiendo así la mayor cantidad del flujo hacia las tuberías que deben lavarse.

#### 2.4.2.3 Selección/modelación de hidrantes que permiten realizar el lavado

Los hidrantes son los que permiten generar velocidades diferenciales y expulsar el agua de la red, generalmente son seleccionados según su cercanía a la tubería o tuberías a lavar. Los hidrantes se deben modelar como emisores asignados al nudo más cercano de la red, (Walski, 2008); adicionalmente, se debe tener en cuenta que la selección de estos accesorios y de las válvulas se debe realizar buscando disminuir la duración del lavado, minimizar la interrupción del servicio, evitar quejas de los usuarios y evitar condiciones de baja presión. La modelación de los hidrantes se realiza por medio de la Ecuación 1.

$$Q = KP^\alpha \quad \text{Ecuación 1}$$

donde Q es el caudal, P la presión, K el coeficiente del emisor y  $\alpha$  el exponente.

Algunos autores seleccionan los hidrantes basándose en el diámetro de la tubería, por ejemplo (Antoun, 1999) presenta requerimientos de caudal e hidrantes para producir una adecuada velocidad de lavado.

**Tabla 2.- Requerimientos de caudal e hidrantes para producir una adecuada velocidad de lavado. (Antoun, 1999)**

Diámetro tubería Pulg. (mm)	Caudal (m3/h)	Nº Hidrantes (60 mm)	Nº Hidrantes (100 mm)
4 (100)	50	1	-
6 (150)	120	1	-
8 (200)	210	-	-
10 (250)	330	2	1
12 (300)	460	2	1
16 (410)	850	3	2
18 (460)	1080	-	2
24 (610)	1920	-	3



La (Fédération Canadienne des municipalités, 2005) relaciona el diámetro de la tubería con el número de hidrantes requeridos para un lavado efectivo. En la Tabla 3 se muestran los valores sugeridos por ellos con un caudal mínimo requerido de 0.76 m/s a una presión de 280 kpa (40 psi) y con una salida en los hidrantes de 63 mm (2 ½ in).

**Tabla 3.- Numero de hidrantes que se deben abrir para obtener un lavado eficiente dado el diámetro.**

Diámetro de la tubería		Mínimo caudal requerido		N°. de hidrantes requeridos
Pulgadas	Mm	GPM	L/s	
4	100	100	6	1
6	150	200	13	1
8	200	400	25	1
10	250	600	38	1
12	300	900	57	2
16	350	1600	100	2

En la metodología de (Alvarez, 2009) para la selección de los hidrantes se tuvo en cuenta la ubicación de las tuberías que deben lavarse dentro de la ruta, a fin de escoger los hidrantes cercanos a ésta que ayudan a incrementar la velocidad del flujo en dichas tuberías. (Schaezen, 2000) sugiere identificar el caudal máximo disponible en los hidrantes y compararlo con el caudal mínimo requerido para el lavado de las tuberías seleccionadas manteniendo la presión residual en los hidrantes superior a 14 m.c.a.

#### 2.4.3 Condiciones hidráulicas

En general, las condiciones hidráulicas que se buscan alcanzar al implementar un programa de lavado hidráulico es obtener un esfuerzo cortante con el que se obtenga una remoción de sedimentos deseada. Este efecto se ha medido también con velocidades en las tuberías. En general, aunque lo ideal sería trabajar con esfuerzos cortantes la mayor parte de investigaciones en lavado hidráulico tienen como objetivo alcanzar una velocidad determinada según el fin del lavado, por ejemplo, para remoción de biopelículas usualmente se busca alcanzar velocidades mayores a 1.5 m/s. A continuación se presenta una descripción de estos dos parámetros.



### 2.4.3.1 Esfuerzo cortante

El esfuerzo cortante es el responsable del desprendimiento de biopelículas y se rige por propiedades de la tubería y del flujo.

$$\tau_o = \frac{v^2}{\left[2.2 \ln \left(\frac{R}{k}\right) + 6.6\right]^2 \rho} \quad \text{Ecuación 2}$$

Como se observa en la Ecuación 2 el esfuerzo cortante es inversamente proporcional al diámetro de la tubería. De allí, que se requiera un mayor aumento de velocidad para tuberías de mayor tamaño para alcanzar esfuerzos cortantes altos que permitan la remoción de películas adheridas a las tuberías y que esta técnica sea más eficiente en tuberías con diámetros no mayores a 12”.

### 2.4.3.2 Velocidad de flujo

La velocidad de flujo durante el lavado es determinante en la calidad del agua obtenida, las altas velocidades en la red de distribución causan turbulencia dentro de la tubería y esfuerzos cortantes entre la biopelícula y el agua en movimiento, suficientes para causar desprendimiento. Dado que la investigación sobre el crecimiento de biopelículas es muy dinámica, diversos autores y estudios han sugerido diferentes velocidades de uso en lavados hidráulicos. (Friedman, 2002) propuso los siguientes valores para diferentes características de limpieza.

Tabla 4. Velocidades requeridas para diferentes características de limpieza.

Velocidad (m/s)	Características de limpieza
<0.9	Arrastra lógamo, sedimentos y se reduce la demanda de desinfectante
1.5	Elimina la biopelícula y se reduce la demanda de desinfectante
1.8	Transporta arenas en tuberías
4.0	Elimina la arena de sifones invertidos

Según la (AWWA, 2003) la velocidad mínima de remoción de sedimentos y biopelículas es de 1.8 m/s. A continuación se presentan otros valores sugeridos por otros autores.



**Tabla 5. Velocidades de remoción de biopelículas para varios autores. (Tomado de Escovar, 2009).**

Velocidad mínima para la remoción de biopelículas	Autor	Comentarios
1.5 m/s	Von Huben, 1999	
0.9 m/s a 1.5 m/s	Friesman, 2001	Límite inferior para tuberías muy lisas y límite superior para rugosidades altas.
1.5 m/s	Vreeburg&Boxall, 2007	Valor mínimo para Holanda
0.7 m/s (para diámetros de 50 mm) 1.3 m/s (para diámetros de 200 mm)	Vreeburg&Boxall, 2007	Valores para el Reino Unido

#### 2.4.4 Duración del lavado

La importancia de determinar la duración de lavado está relacionada con la obtención de costos asociados con el gasto de agua en un proceso de lavado; en general, este aspecto no está muy documentado en la literatura y la forma de realizarlo es teniendo en cuenta el aspecto del agua (niveles de turbiedad, desinfectante residual, color, etc) en los hidrantes de salida durante la realización del lavado. Sin embargo, múltiples autores y protocolos de lavado sugieren para la planeación considerar un tiempo para el cual dos tercios del agua hayan sido expulsados del sistema.

#### 2.4.5 Frecuencia de lavado

Las frecuencias de lavado se obtienen después de implementar un programa de lavado analizando el comportamiento de la calidad del agua a través del tiempo. Sin embargo, hay algunos valores que se pueden utilizar por defecto, para lavados unidireccionales se recomienda realizarlo dos veces al año en caso de no tener información adicional.

#### 2.4.6 Recomendaciones

En general lo que se encuentra en la literatura son recomendaciones para la realización del lavado que incluyen aspectos hidráulicos, operacionales, administrativos, entre otros. Con el seguimiento de estas recomendaciones se realiza la planeación de lavados. A continuación se muestra una recopilación de sugerencias de múltiples autores como (Antoun, 1999), (Schaetzen, 2000), (Fédération Canadienne des municipalités, 2005), (Carvajal, 2006), (Friedman, 2002).



- Antes de empezar la secuencia de lavado se debe verificar y adecuar los niveles de almacenamiento de la fuente y bombas en operación para brindar el caudal y duración adecuado.
- Antes de lavar se debe informar al departamento de bomberos para que ellos estén atentos a la ubicación general donde se realizaran los lavados y donde se cerraran válvulas que puedan reducir la demanda para incendios.
- El lavado se debe originar en la fuente y progresar hacia las tuberías cercanas. Esto permite el uso del agua de las tuberías que ya han sido lavadas.
- No se debe lavar de tubos pequeños a los grandes. La reducción de la velocidad en la tubería mayor disminuye la eficiencia. Esto puede ocasionar que se necesite re-direccionar el flujo cerrando y re-abriendo válvulas.
- Donde el cerrar válvulas se aísla estaciones de bombeo o en donde la operación de las bombas genere flujo contrario a la dirección deseada, se deben apagar las bombas.
- Se debe evitar reducir las presiones por debajo de 20 psi ( $\approx 14$  m).
- Los tiempos de lavado mostrados en los registros se estiman basados en el modelo hidráulico. El tiempo real requerido puede variar ya que cada hidrante debe lavarse hasta que el agua salga limpia.
- Al final del día se deben abrir las válvulas que se cerraron para proveer un caudal máximo de protección contra fuego en caso de emergencia, y luego, cerrarlas al día siguiente siguiendo las especificaciones.
- Se debe notificar a los usuarios.
- Monitorear las presiones del sistema (para evitar presiones negativas).
- Evaluar la calidad del agua después del lavado.
- Planear el manejo de tráfico en las cercanías de áreas de trabajo.
- Mantener la seguridad pública en especial en las áreas de descarga de los hidrantes.



- Desarrollar una guía que especifique minuciosamente la apertura y cierre de válvulas e hidrantes controlando la operación con un mapa individual.
- Realizar reparaciones necesarias a tuberías, válvulas e hidrantes.
- Realizar el UDF en altas horas de la noche o muy temprano en la mañana, (para evitar inconvenientes con los consumidores y además tener un promedio alto de presiones).
- Seguridad en la ejecución del LHU en lo que se refiere a equipos, personal técnico y público en general. (Este riesgo se incrementa cuando se usan velocidades mayores o iguales a 1.8 m/s).
- Para mejorar e incrementar la efectividad del programa de lavado se debe alimentar una base de datos con información de calidad de agua. Esto a fin de conseguir que a largo plazo el lavado se realice con parámetros de calidad y no de tiempos de lavado. Adicionalmente, esto puede ayudar a ajustar los tiempos requeridos de lavado.
- Combinar el programa de lavado con otros procedimientos preventivos.
- No realizar lavado en tuberías con diámetro mayor a 600 mm.
- Notificar a usuarios especiales: Prestar especial atención a estas notificaciones como hospitales, lavanderías, bomberos, etc.

#### 2.4.7 Optimización

El problema de optimización de lavado hidráulico involucra variables aleatorias como el número de válvulas y el número de hidrantes que deben ser operados para lograr velocidades deseadas en las tuberías. Los procesos de optimización encontrados en la literatura están más asociados con el lavado como respuesta a la identificación de un agente contaminante en la red; la optimización se usa para la localización de sensores en la red y para manejar las válvulas de forma que se aisle el agua contaminada disminuyendo o eliminando el riesgo para la población. El lavado unidireccional como herramienta de mantenimiento se puede solucionar mediante optimización estocástica, la cual comprende varias técnicas de programación como el uso de Algoritmos Genéticos y



Programación por Restricciones, técnicas que han sido estudiadas por el CIACUA. En el presente capítulo se resumen las metodologías de optimización de lavados hidráulicos investigadas en el CIACUA.

#### *2.4.7.1 Algoritmos Genéticos*

Los Algoritmos Genéticos (AG) constituyen un campo de la inteligencia artificial, denominada computación evolutiva, que se basa en los principios de la evolución natural y la genética de los seres vivos para hacer búsquedas optimizadas en problemas donde el conjunto de posibles soluciones puede llegar a ser bastante extenso. Los AG son una técnica de búsqueda basada en la teoría de evolución de las especies de Darwin y la estructura química del ADN. Estos conceptos indican que aquel individuo que esté mejor adaptado a su entorno tiene mayor probabilidad de reproducirse; así mismo, los genes que transmiten esa ventaja tienen mayor posibilidad de transmitirse entre generaciones de la población. Con el uso de procedimientos iterativos se aplica selección natural para encontrar posibles soluciones óptimas a un problema. La metodología empleada con el modelo de AG inicia con la selección de la población inicial de individuos asignados al azar dentro del espacio de optimización; luego, la convergencia de la solución se alcanza con procesos de reproducción, selección y mutación hasta alcanzar el criterio definido de finalización del algoritmo.

Este tipo de algoritmos trabaja con una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado. A cada individuo se le asigna un valor o puntuación, relacionado con la bondad de dicha solución. Mientras mayor sea la adaptación de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que el mismo sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de la misma manera. Este cruce produce nuevos individuos descendientes de los anteriores, los cuales comparten algunas de las características de sus padres. De esta manera se produce una nueva población que corresponde a una de las múltiples soluciones, la cual reemplaza a la anterior y se caracteriza porque contiene una mayor proporción de atributos deseables respecto a la generación anterior. Así, a través de las



generaciones, los nuevos individuos presentarán mejores características que les permitan sobrevivir gracias a una mejor adaptación al medio. Mediante el cruce de los individuos mejor adaptados, se exploran las áreas más prometedoras del espacio de búsqueda. Si el AG ha sido bien diseñado, la población convergerá hacia una solución óptima del problema.

A continuación se definen los principales elementos de un Algoritmo Genético:

- Espacio de búsqueda: es el rango que limita la solución del problema.
- Individuo: unidad que representa una posible solución al problema, caracterizada tanto por el fenotipo como por el genotipo. El genotipo es una serie de valores ya sea de tipo binario, números reales o caracteres, que corresponden a la información manifestada en el fenotipo.
- Generación: conjunto de individuos que se generan simultáneamente, en la misma iteración.
- Población: número de individuos que conforma cada generación.
- Tipo de algoritmo: determina la combinación de genes de los individuos que permite dar origen a una población mejorada.
  - Generacional: Crea una población en cada generación.
  - Generacional elitista: Mantiene un número determinado de soluciones inalteradas de la generación anterior, lo cual asegura que las mejores soluciones se mantengan.
  - Método de estado estable: Se reemplazan las soluciones más débiles en cada generación.
- Método de generación inicial: procedimiento utilizado en la producción de la primera población.
- Método de recombinación o reproducción: define la cantidad de información que se comparte entre individuos, permite combinar los genes de los individuos que se reproducirán generando así la nueva población mejorada.



- Método de selección: procedimiento seguido para escoger los individuos que deben reproducirse en una generación para obtener la siguiente población.
  - Ruleta: Se asigna una probabilidad de elección a cada individuo.
  - Competencia: Se comparan dos individuos que compiten con el valor de su función objetivo.
- Método de mutación: permite inducir cambios en el genotipo de algunos individuos facilitando así hacer una mejor exploración del espacio de búsqueda, esto se hace con el fin de evitar tener óptimos locales.
- Función objetivo: relaciona la aptitud del individuo con su capacidad de reproducción.

#### *2.4.7.2 Programación por restricciones*

La Programación por Restricciones es un campo de la programación informática a través de la cual es posible solucionar problemas de optimización a partir de la aplicación y propagación de restricciones o ecuaciones sobre sus variables, disminuyendo el espacio de búsqueda y validando los resultados. Hoy en día se utiliza con frecuencia como una de las tecnologías de software para la descripción y resolución de problemas combinatorios de especial dificultad.



### **3 METODOLOGÍA**

En el CIACUA la optimización del lavado hidráulico unidireccional como herramienta de mantenimiento se ha explorado con dos alternativas, una con Algoritmos Genéticos (Álvarez, 2009) y otra con Programación por Restricciones (Rothstein, 2011) a las que se les pretende dar continuidad en esta investigación. En el presente capítulo primero se presentaran las herramientas de software empleadas, posteriormente se explicarán las dos metodologías planteadas anteriormente con sus respectivas ventajas y desventajas, luego se propondrá una metodología mejorada teniendo en cuenta el análisis de las anteriores.

#### **3.1 Software utilizado para la Modelación Hidráulica**

##### **3.1.1 Redes**

Es un programa desarrollado en la Universidad de los Andes a través de proyectos de investigación del Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados CIACUA. Este programa permite la simulación y análisis de redes de distribución de agua; su código fuente (escrito en PASCAL) está disponible a estudiantes de investigación vinculados al CIACUA. En el momento, cuenta con un módulo de lavado desarrollado por (Rothstein, 2011) que hace uso de Programación por Restricciones.

##### **3.1.2 EPANET**

Es un programa gratuito que realiza simulaciones del comportamiento hidráulico y calidad de agua en redes de distribución a presión. EPANET está diseñado para ser una herramienta de desarrollo puede emplearse para diseño de programas de muestreo, calibración de modelos hidráulicos, entre otras aplicaciones. Este programa puede emplearse bajo sistemas operativos Windows y ofrece un entorno de trabajo integrado para la edición de datos de entrada de la red, cálculo hidráulico y simulaciones de calidad del agua y visualización de resultados.



### 3.1.3 GANetXL

Para la optimización por medio de Algoritmos Genéticos se usó el programa GANetXL (Savić, 2011). Este programa es un complemento de Excel que permite realizar optimizaciones con Algoritmos Genéticos de forma sencilla y también permite la fácil vinculación con EPANET.

El programa permite realizar optimización mono-objetivo y multi-objetivo y para cada modalidad se requieren los siguientes parámetros:

- Tamaño de la población: Afecta el tiempo de ejecución del problema y se recomienda que no sea mayor a 1000.
- Tipo de algoritmo: Se puede elegir entre tres tipos de algoritmo si es optimización mono-objetivo y se asigna un tipo si es multi-objetivo.
  - Generacional: En cada generación se crea toda la población.
  - Generacional Elitista: Se mantienen las mejores soluciones para la creación de la siguiente generación.
  - Estado estable: Para la nueva generación se reemplazan los individuos más débiles.
  - NSGA II (Multi-objetivo): Hace uso del frente de Pareto para crear la nueva generación.
- Método de reproducción: GANetXL permite elegir entre tres alternativas:
  - Punto simple: Se escoge una ubicación en el cromosoma.
  - Multipunto: Igual que el punto simple pero con la selección de varios puntos a lo largo del cromosoma.
  - Uniforme: Es una forma de método multipunto en el que cada gen se selecciona de manera aleatoria. Lo que genera que la distribución del material genético sea independiente de la posición del gen en el cromosoma.



- Método de selección: el método de selección depende del tipo de algoritmo usado. Para la optimización mono-objetivo se cuenta con tres métodos y para la multi-objetivo con uno.
  - Ruleta: A cada individuo se le asigna una probabilidad de ser elegido, la cual es proporcional a la relación entre el valor de su función objetivo y la suma de los valores de dicha función para todos los individuos de la población.
  - Ruleta por rango: Se ordena la población y a cada individuo se le asigna una probabilidad de ser seleccionado de acuerdo con el rango.
  - Torneo: Involucra una selección aleatoria de un número determinado de individuos.
  - Torneo (multi-objetivo): Sigue el mismo principio que el anterior.
- Método de mutación: funciona seleccionando a un gen del cromosoma y cambiándole el valor. El programa dispone de dos alternativas: simple y simple por gen; también permite la opción de usar una mutación adaptativa pero esta se recomienda cuando se tienen miles de generaciones.
- Método de combinación: la aplicación permite seleccionar entre varias alternativas que consisten para el algoritmo de estado estable.

### 3.2 Red utilizada en la investigación

Se seleccionó la red R28 teniendo en cuenta que esta red ha sido trabajada en estudios previos del CIACUA en temas de biopelículas y lavados, por lo que el uso de ésta, en el presente trabajo, permite la comparación de resultados con otras investigaciones.

Red hipotética creada en el CIACUA no dispone de sistemas de bombeo y tiene una fuente de abastecimiento. La red está conformada por 40 nudos y 67 tuberías de diámetros entre 50 mm y 200 mm y no tiene diferencia de altura entre los nudos, es decir que su topografía es plana. La red está compuesta por 28 circuitos cuya distribución permite una alta redundancia.

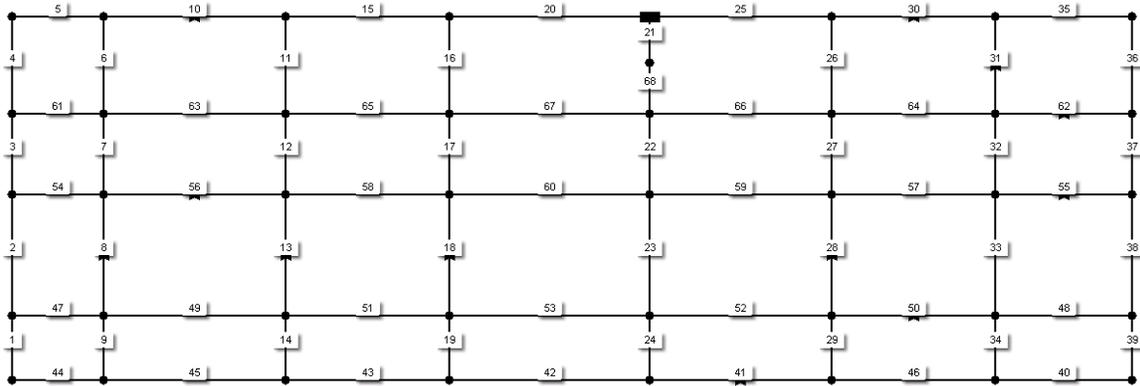


Ilustración 1. Esquema de la red R28.

### 3.3 Metodologías previas

A continuación se presentan las dos metodologías empleadas en el CIACUA para optimización de lavados hidráulicos unidireccionales.

#### 3.3.1 Modelo 1 – Algoritmos Genéticos

Esta metodología de solución fue desarrollada en el proyecto de grado en Maestría en Ingeniería Civil por (Álvarez, 2009). Usando esta técnica de optimización dadas las características de aleatoriedad no es posible garantizar que las soluciones encontradas son soluciones óptimas; sin embargo, evidencia empírica sugiere que esta metodología permite encontrar soluciones a un nivel aceptable en menor tiempo con respecto a algoritmos de optimización combinatoria.

La metodología desarrollada se basa en un Algoritmo Genético con reducción del espacio de búsqueda que parte de la identificación de las válvulas e hidrantes más cercanos a las tuberías que deben lavarse, los cuales se convierten en los accesorios a operar para el lavado de dichas tuberías. Estos accesorios se seleccionaron a partir de las rutas de lavado, las cuales se establecieron mediante un procedimiento que permite determinar la ruta por donde fluye el mayor caudal bajo el esquema de operación tradicional de la red y que agrupa la mayor cantidad de tuberías a lavar. Luego, mediante la ejecución de un Algoritmo Genético se buscó la mejor combinación de apertura de hidrantes y cierre de válvulas que lograra optimizar el proceso de lavado hidráulico unidireccional de las



tuberías seleccionadas. La optimización de la configuración de los accesorios a operar durante el lavado hidráulico se logró mediante una función objetivo definida para calificar el desempeño de cada individuo en términos de las variables de interés entre las cuales se encuentra la cantidad de agua empleada en el lavado, el número de accesorios operados y la afectación a los usuarios. Este algoritmo puede obtener soluciones parciales, ya que, lo más probable es que no se encuentren configuraciones de apertura y cierre de hidrantes y válvulas que logren lavar todas las tuberías establecidas y por lo tanto, es necesario ejecutar el algoritmo varias veces, a fin de obtener varias combinaciones de apertura y cierre de accesorios que en conjunto logren lavar todas las tuberías de las rutas.

De esta manera, la metodología propuesta consta de cuatro procedimientos: definición de rutas de lavado, selección de accesorios a operar, optimización del lavado hidráulico (a través del Algoritmo Genético) y combinación de reglas de operación del sistema que garanticen el lavado de todas las tuberías.

### *3.3.1.1 Definición de rutas de lavado*

En la metodología propuesta se utilizó la velocidad media del flujo correspondiente al esquema de operación habitual, para la condición de demanda promedio diaria del sistema, como criterio de selección de las tuberías que deben lavarse, ya que esta condición permite identificar los sitios donde se favorece la acumulación de material. Valores de velocidad inferiores a 0.76 m/s, indican una alta probabilidad de presencia de películas y sedimentos en el interior de las tuberías.

Las tuberías a lavar se agruparon formando rutas de lavado, las cuales deben aislarse a fin de direccionar el flujo hacia las tuberías que se pretenden limpiar. Estas rutas se construyeron teniendo en cuenta la distancia topológica de los nudos de las tuberías que deben lavarse a la fuente de abastecimiento, así como el valor de los trazadores inversos y directos calculados en los nudos adyacentes a aquellos que hacen parte de la ruta de lavado, buscando crear rutas cortas pero que agrupen la mayor cantidad de tuberías a lavar.



### *3.3.1.2 Selección accesorios a operar*

Las rutas de lavado son el punto de partida para escoger las válvulas y los hidrantes a operar durante el lavado, ya que para su aislamiento es necesario identificar las válvulas cercanas a fin de ocasionar la menor afectación del servicio en todo el sistema. Además, la localización de los hidrantes cerca a la ruta de lavado y a las válvulas a operar facilita las labores operativas a la hora de llevar a cabo el lavado hidráulico de la red.

Para la selección de los hidrantes se tuvo en cuenta la ubicación de las tuberías que deben lavarse dentro de la ruta, con el fin de escoger los hidrantes cercanos a ésta que ayudan a incrementar la velocidad del flujo en dichas tuberías. Por su parte, la selección de las válvulas a operar sólo se basa en su cercanía a la ruta, a fin de que ésta pueda aislarse del resto de la red dirigiendo así la mayor cantidad del flujo hacia las tuberías que deben lavarse. El procedimiento de selección de los accesorios a operar se resume en los pasos del diagrama de flujo presentado en la Ilustración 2.

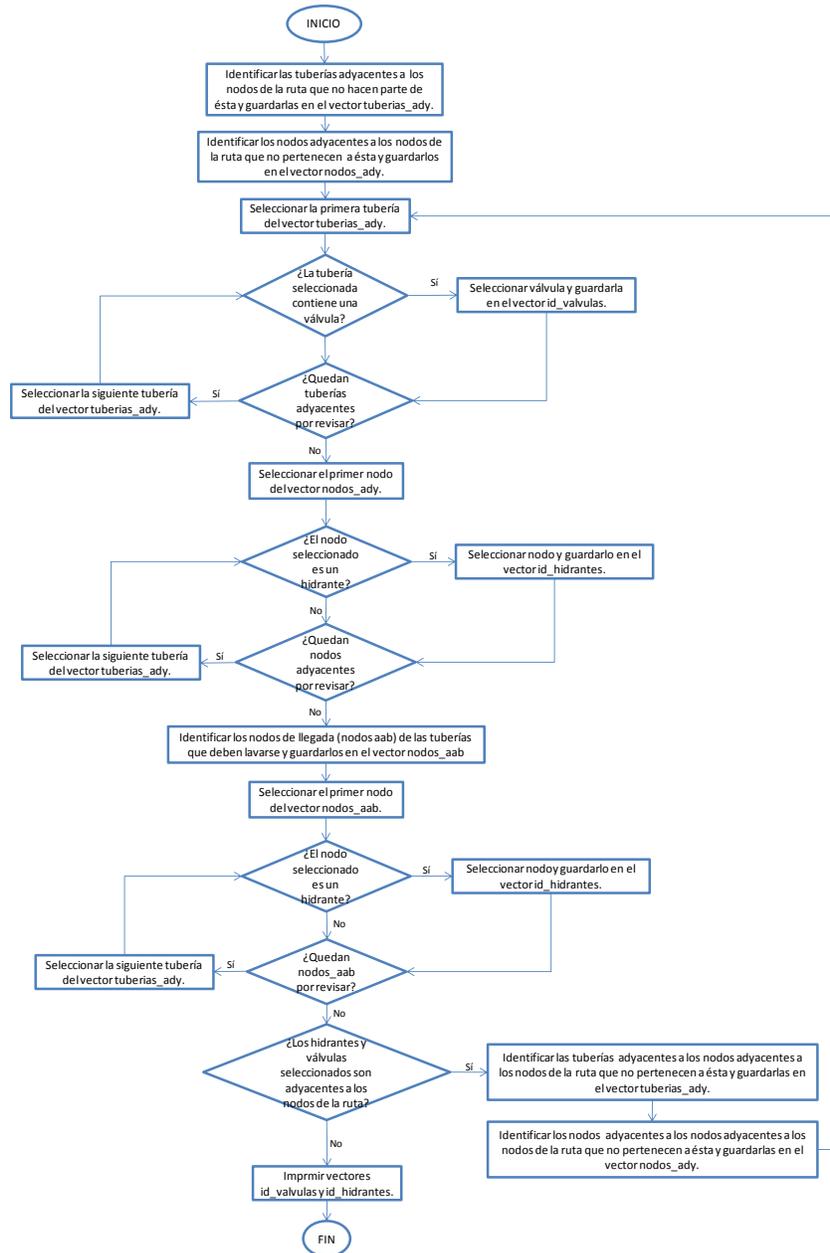


Ilustración 2. Diagrama de flujo para selección de los accesorios a operar (Álvarez, 2009), modelo 1.

### 3.3.1.3 Optimización del lavado hidráulico

Este procedimiento corresponde a la identificación óptima de operación de accesorios para realizar el lavado hidráulico, de manera que se obtengan los valores deseados de las principales variables que influyen en la ejecución de este tipo de procedimientos en RDAP.



Debido a la gran influencia que tienen los cambios de operación de válvulas e hidrantes en la hidráulica de la red, se consideró que el tipo de Algoritmo Genético más adecuado a utilizar es el generacional elitista, ya que en éste, la población correspondiente a cada nueva generación incluye los individuos con los mejores valores de la función objetivo de la generación anterior, sin alterarlos en ninguna forma. De esta manera se garantiza que las mejores soluciones se conservan a través de las generaciones. El AG diseñado para la optimización de lavados hidráulicos unidireccionales, consta de los elementos que se describen a continuación:

- Individuos: conjunto de las válvulas y de los hidrantes seleccionados a partir de la ruta de lavado. Cada uno de estos accesorios constituye un gen que establece una característica particular del individuo.
- Población inicial: primer conjunto de individuos obtenidos al variar la condición de apertura o cierre de las válvulas y de los hidrantes correspondiente al esquema operativo tradicional de la red. A cada uno de los accesorios se le asigna un valor de 0 ó 1, el cual indica que el accesorio se encuentra cerrado (cuando el valor es 0) o abierto (cuando el valor es 1).
- Población: corresponde al conjunto de individuos a evaluar en cada generación, los cuales se obtienen a partir de los métodos de selección y reproducción de los mejores individuos, de mutación y de generación aleatoria. Estos métodos establecen la distribución porcentual de la procedencia de los nuevos individuos.
- Método de reproducción: corresponde al método uniforme, en donde los genes de cada hijo se obtienen generando un patrón aleatorio que puede tomar el valor de 0 ó 1 y que indica cuál de los genes de los padres se transmite al hijo. En caso de que el patrón sea 0, se selecciona el gen del padre y en caso contrario, se asigna el de la madre.
- Método de selección: los individuos que sobrevivirán en las nuevas generaciones y que se reproducirán se escogen a través del método de ruleta según el cual, a cada individuo se le asigna una probabilidad de ser elegido, que es proporcional a la



relación entre su valor de la función objetivo y la suma de los valores de la función objetivo para todos los individuos de la población. Dicha probabilidad de selección corresponde a una porción de la ruleta, la cual se gira para determinar cuál es el individuo seleccionado.

- Método de mutación: funciona mediante la selección fortuita de uno de los genes del individuo, el cual cambia en forma aleatoria dentro de los valores frontera del gen. Para el problema estudiado, la mutación se realiza en un gen cuando un número entre 0 y 1, generado en forma aleatoria, es menor o igual a la tasa de mutación que se fijó igual al 10%.
- Función objetivo: al analizar los diferentes aspectos relacionados con el lavado hidráulico de redes de distribución de agua potable tales como la afectación a los usuarios, la facilidad y rapidez de la ejecución del lavado desde el punto de vista operativo y el uso eficiente de los recursos disponibles, se identificaron 14 variables de interés que deben tenerse en cuenta a la hora de calificar la efectividad de un lavado de esta naturaleza.
- Restricciones: el problema de optimización de lavados hidráulicos cuenta con tres restricciones (individuos con déficit de presión, que no laven ninguna tubería y para los cuales no se abra ningún hidrante) que deben incluirse dentro del diseño del Algoritmo Genético.
- Conservación de los mejores individuos: el algoritmo almacena la información sobre el individuo mejor calificado de cada generación. Esta información corresponde al valor de su función objetivo y su genotipo, es decir, el estado de apertura y cierre de hidrantes y válvulas.
- Índices de terminación del programa: el Algoritmo Genético desarrollado utiliza como instrucción de terminación el número de generaciones indicado por la persona que ejecuta el procedimiento de optimización.

Debido a la naturaleza aleatoria del algoritmo diseñado, lo más probable es que no se encuentre un solo individuo que logre lavar todas las tuberías requeridas en la ruta



especificada. Por esta razón, como parte de la solución al problema de optimización, se entrega una combinación de individuos con la cual se logre este objetivo. Para establecer dicha combinación, se escoge el individuo mejor calificado que logra lavar cada tubería. Luego se comparan entre sí los individuos seleccionados y se eliminan aquellos que sean redundantes, es decir, que laven las tuberías que logran lavar otros individuos.

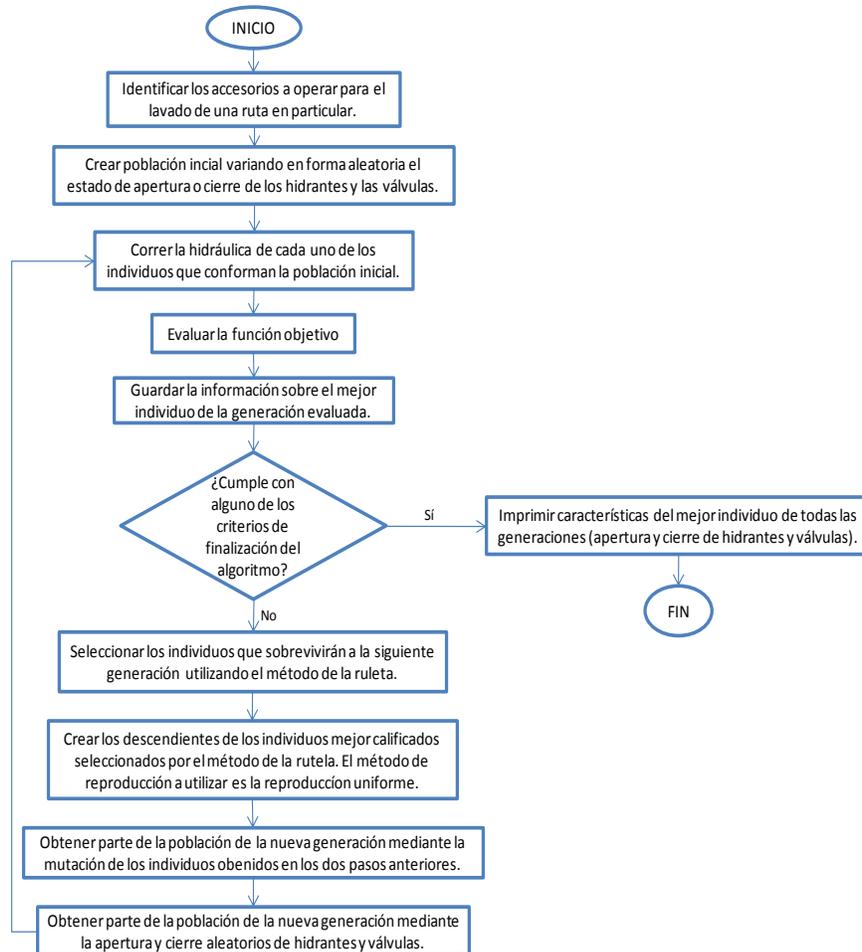


Ilustración 3. Diagrama de flujo del algoritmo genético de optimización (Álvarez, 2009), modelo 1.

### 3.3.1.4 Función Objetivo

Al analizar los diferentes aspectos relacionados con el lavado hidráulico de redes de distribución de agua potable tales como la afectación a los usuarios, la facilidad y rapidez de la ejecución del lavado desde el punto de vista operativo y el uso eficiente de los recursos disponibles, se identificaron 14 variables de interés a tener en cuenta a la hora de calificar la efectividad de un lavado. Estas variables son:



- Cantidad de tuberías lavadas (Ntl): número de tuberías a lavar en donde la velocidad iguala o supera el valor de 1.5 m/s.
- Cantidad de tuberías a lavar (Nal): número de tuberías que deben lavarse pertenecientes a la ruta de lavado.
- Caudal de lavado (Ql): suma de los caudales obtenidos en las tuberías lavadas, los cuales se calculan multiplicando el área de cada tubería lavada por la velocidad alcanzada en ésta.
- Caudal mínimo de lavado (Qml): caudal de menor magnitud que puede alcanzarse en las tuberías a lavar de la ruta en caso de que todas ellas se laven en forma simultánea. Se obtiene sumando los caudales calculados en estas tuberías cuando alcanzan la velocidad mínima de lavado.
- Caudal en los hidrantes (Qh): se obtiene a partir de la suma de los caudales correspondientes a los hidrantes operados durante el lavado de la ruta.
- Caudal total demandado (Qtd): suma de los caudales demandados en todos los nudos de la red al momento de realizar el lavado.
- Cantidad de hidrantes operados (Nh): número de hidrantes a través de los cuales sale el agua empleada durante el lavado.
- Cantidad de válvulas operadas (Nv): número de válvulas cerradas para aislar la ruta en la cual se desea encauzar el flujo.
- Cantidad total de hidrantes (Nht): número de hidrantes a operar para el lavado de las tuberías pertenecientes a ruta seleccionada.
- Cantidad total de válvulas (Nvt): número de válvulas a operar para aislar la ruta a la que pertenecen las tuberías que se pretende lavar.
- Presión mínima de lavado (Pmin): valor mínimo de la presión permitida en todos los nudos de la red durante la ejecución del procedimiento de lavado (14 m.c.a.).



- Presión inicial (Pini): valor de la presión para la condición precedente a la ejecución del lavado hidráulico en cada uno de los nudos que presentan déficit de presión cuando se lleva a cabo el procedimiento de limpieza.
- Presión mínima de déficit (Pmindéficit): valor más bajo de la presión en los nudos en que se presenta déficit de esta variable durante el lavado hidráulico.
- Presión de lavado (Plav): presión durante el lavado hidráulico en los nudos que presentan déficit para esta condición de operación de la red.
- Cantidad de nudos con déficit de presión (n): total de nudos cuya presión para la condición de lavado es inferior a la presión mínima de lavado.

A partir de la combinación de estas variables se definieron las siguientes funciones objetivo.

$$F.O.1 = \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \frac{Q_h}{Q_{td}} + \frac{C_2}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \frac{N_{al} - N_{tl}}{N_{al}} + \frac{C_3}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \frac{Q_{ml} - Q_l}{Q_{ml}} + \frac{C_4}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \sum_{i=1}^{nd} \frac{(P_{ini} - P_{lav})_i}{n(P_{ini} - P_{mindéficit})_i} \right)^a \quad \text{Ecuación 3}$$

$$F.O.2 = \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \frac{Q_h}{Q_{td}} + \frac{C_2}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \frac{N_{al} - N_{tl}}{N_{al}} + \frac{C_3}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \frac{Q_{ml} - Q_l}{Q_{ml}} + \frac{C_4}{C_1 + C_2 + C_3 + C_4} \sum_{i=1}^{nd} \frac{(P_{lav})_i}{(P_{min} - P_{minlavado})_i} \right)^a \quad \text{Ecuación 4}$$

$$F.O.3 = \left( \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_3} \frac{Q_h}{Q_{td}} + \frac{C_2}{C_1 + C_2 + C_3} \frac{N_{al} - N_{tl}}{N_{al}} + \frac{C_3}{C_1 + C_2 + C_3} \frac{Q_{ml} - Q_l}{Q_{ml}} \right) \left( \sum_{i=1}^{nd} \frac{(P_{ini} - P_{lav})_i}{n(P_{ini} - P_{minlavado})_i} \right) \right)^a \quad \text{Ecuación 5}$$

$$F.O.4 = \left( \left( \frac{N_h}{N_{ht}} \frac{Q_h}{Q_{td}} + \frac{N_v}{N_{vt}} \left( \frac{N_{al} - N_{tl}}{N_{al}} + \frac{Q_{ml} - Q_l}{Q_{ml}} \right) \right) \left( \sum_{i=1}^{nd} \frac{(P_{ini} - P_{lav})_i}{n(P_{ini} - P_{minlavado})_i} \right) \right)^a \quad \text{Ecuación 6}$$

$$F.O.5 = \left( \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_3} \frac{Q_h}{Q_{td}} + \frac{C_2}{C_1 + C_2 + C_3} \frac{N_{al} - N_{tl}}{N_{al}} + \frac{C_3}{C_1 + C_2 + C_3} \frac{Q_{ml} - Q_l}{Q_{ml}} \right) \left( \sum_{i=1}^{nd} \frac{(P_{lav})_i}{(P_{min} - P_{minlavado})_i} \right) \right)^{a + \frac{1}{N_v}} \quad \text{Ecuación 7}$$

donde  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$  son constantes adimensionales definidas mediante un proceso de ensayo y error y  $a$  es:

$$a = \frac{1}{N_h}$$



Para definir los coeficientes con los cuales se observa el mejor comportamiento de las funciones objetivo establecidas para la optimización, se realizaron varias corridas de una aplicación desarrollada en Matlab. En cada corrida se analizó la convergencia de la función objetivo evaluada en términos de rapidez y estabilidad, así como el individuo seleccionado de acuerdo con el valor obtenido de dicha función y con base en estos resultados se establecieron los valores de las constantes correspondientes a cada término de las funciones objetivo propuestas. Luego, se hizo un análisis de los resultados obtenidos al utilizar las 5 funciones objetivo definidas y se encontró que la función objetivo 3 (Ecuación 8) no sólo permite obtener los individuos que logran los mejores valores de las variables de interés para el lavado (altas velocidades de flujo en las tuberías a lavar, mínima cantidad de accesorios operados, nudos sin déficit de presión y poca cantidad de agua utilizada en el lavado), sino que también converge rápidamente.

$$F.O.3 = \left( \left( \frac{1}{4} \frac{Q_h}{Q_{td}} + \frac{2}{4} \frac{N_{al} - N_{tl}}{N_{al}} + \frac{1}{4} \frac{Q_{ml} - Q_l}{Q_{ml}} \right) \left( \sum_{i=1}^{nd} \frac{(P_{ini} - P_{lav})_i}{n(P_{ini} - P_{minlavado})_i} \right) \right)^a \quad \text{Ecuación 8}$$

### 3.3.2 Modelo 2 - Programación por restricciones.

Los métodos usados para la simulación de planes de lavado tienen limitaciones que requieren como parámetro de entrada algo que debería ser parte de la solución (el usuario debe determinar las válvulas e hidrantes a operar), el uso de Algoritmos Genéticos no permite garantizar una buena solución y el uso de Sistemas de Información Geográfica puede limitar la capacidad de la metodología. En el trabajo de (Rothstein, 2011) se desarrolló un algoritmo que evita estos problemas y consiste en determinar si existe un plan de lavado para una red de distribución de agua potable siguiendo unas restricciones hidráulicas y de ser así mirar cómo se implementa en campo.

#### 3.3.2.1 Modelo

La metodología planteada modela la RDAP como una 6-tupla (N,T,V,H, P<sub>v</sub>, P<sub>h</sub>) donde:



- N: Conjunto de todos los nudos.
- T: Conjunto de tubos.
- V: Conjunto de las válvulas.
- H: Conjunto de los hidrantes.
- $P_v$ : Conjunto de las posibles aperturas de las válvulas.
- $P_h$ : Conjunto de las posibles aperturas de los hidrantes.

Un nudo es un punto donde hay consumo de agua dentro de la RDA. Cada nudo tiene una demanda  $d$ , un número de identificación único  $id$  y coordenadas espaciales  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Las fuentes son nudos en los cuales hay agua disponible para la distribución y no hay consumo de agua; estos tienen como características un identificador único  $id$ , coordenadas espaciales  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , y altura piezométrica  $h$ .

Un tubo es un arco que conecta dos nudos de la red y tiene como característica un identificador único  $id$ , diámetro  $\Phi$ , rugosidad  $k_s$ , un coeficiente de fricción  $k_f$  y un coeficiente de pérdidas menores  $k_m$ .

Las válvulas son accesorios que se agregan a un tubo para regular el flujo de agua. Y tienen como características el tubo donde se ubica  $t$  y la función de comportamiento  $C_f$ . Las posibles aperturas de las válvulas son un número entre 0 y 1.

Un hidrante es un accesorio ubicado en un nudo para generar una diferencia de presión al abrirse. La influencia de un hidrante sobre el cambio de presión es determinada por su coeficiente y exponente de emisor. Un hidrante se representa mediante el nudo donde se ubica  $n$ , el coeficiente del emisor  $k_h$  y el exponente del emisor  $e$ . Las posibles aperturas de los hidrantes son un número entre 0 y 1.

Adicionalmente para la modelación de la red se cuenta con diferentes configuraciones, donde una configuración es un estado particular de apertura de válvulas e hidrantes.

Se plantea la planeación de lavados unidireccionales como un problema de decisión, en el cual dada una RDAP, un conjunto de tubos a lavar, un conjunto de válvulas, un conjunto



de hidrantes y un conjunto de restricciones hidráulicas se decide si es posible o no lavar los tubos al modificar los estados de las válvulas e hidrantes. Las restricciones usadas son velocidades mínimas y máximas en cada tubería y presiones mínimas deseadas en los nudos.

(Rothstein, 2011) demostró que es posible encontrar una solución de tipo exacto exponencial para este problema de decisión, pero esta no es una solución eficiente ya que requiere una cantidad de tiempo exponencial para su solución. Por esta razón, propuso un algoritmo de aproximación que debe encontrar la solución similar a la del algoritmo exacto en un tiempo polinomial, lo que se consigue optimizando el conjunto de configuraciones para poder guiar la búsqueda.

#### 3.3.2.1.1 Solución aproximada

Para el planteamiento de la solución aproximada se hace uso de dos conceptos la influencia y la zona de influencia.

**Influencia:** Sirve para medir que tanto afecta una configuración a la RDAP. Para una configuración dada este valor se calcula como  $1 +$  las velocidades de los tubos a lavar. Si alguna de las tuberías supera la restricción de velocidad máxima el valor de la influencia sería  $-\infty$ . A continuación se muestra un diagrama de flujo con el proceso de cálculo del valor de la influencia.

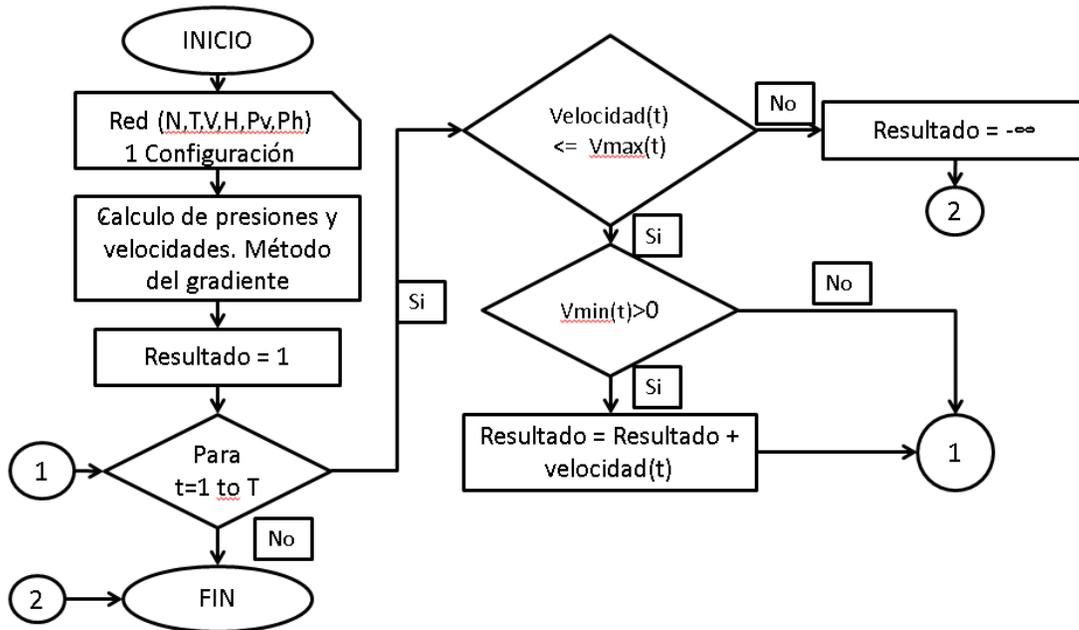


Ilustración 4. Diagrama de flujo para el cálculo del valor de influencia modelo 2. (Adaptado del algoritmo presentado en Rothstein, 2011).

**Zona de Influencia:** El valor de la influencia tiene una desventaja y es que no asegura que dos configuraciones con un mismo valor de influencia sean configuraciones similares ya que no hace distinción entre las velocidades de los tubos. Por esta razón se introduce el término de zona de influencia; este término permite comparar las velocidades de todos los tubos para dos configuraciones diferentes y las clasifica en la misma zona de influencia, si para cada tubería el valor dado por cada configuración no difiere mucho (este valor lo establece el usuario como un parámetro de precisión  $\epsilon$ ). A continuación se muestra un diagrama de flujo con el proceso de cálculo del valor de la zona de influencia.

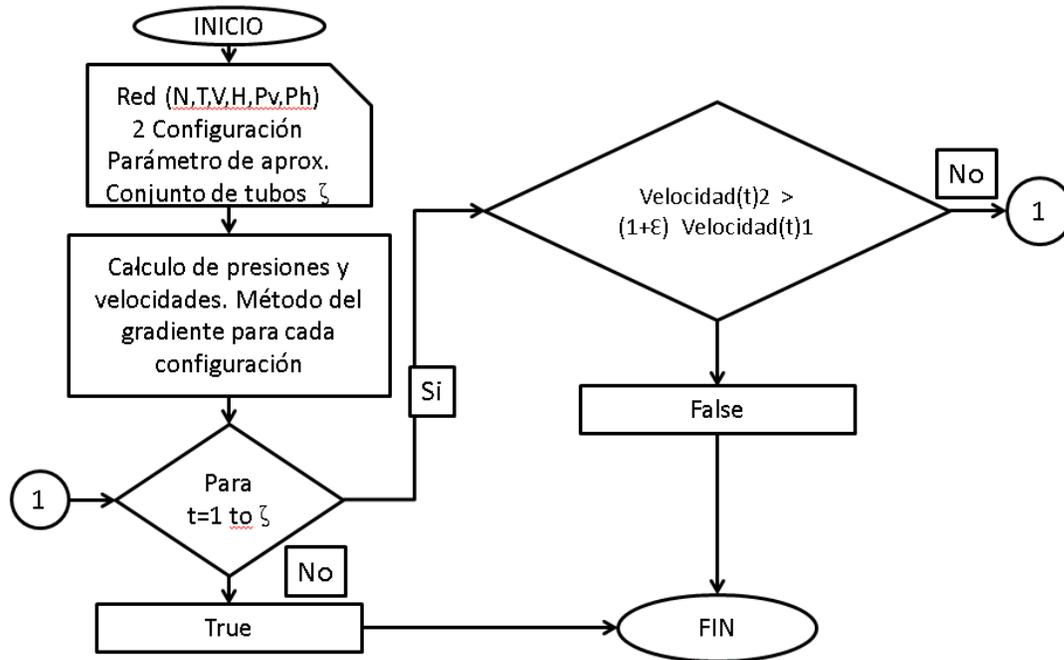


Ilustración 5. Diagrama de flujo para el cálculo de la condición de la zona de influencia modelo 2. (Adaptado del algoritmo presentado en Rothstein, 2011).

A continuación se presenta un diagrama de flujo con el proceso del algoritmo de solución aproximada.

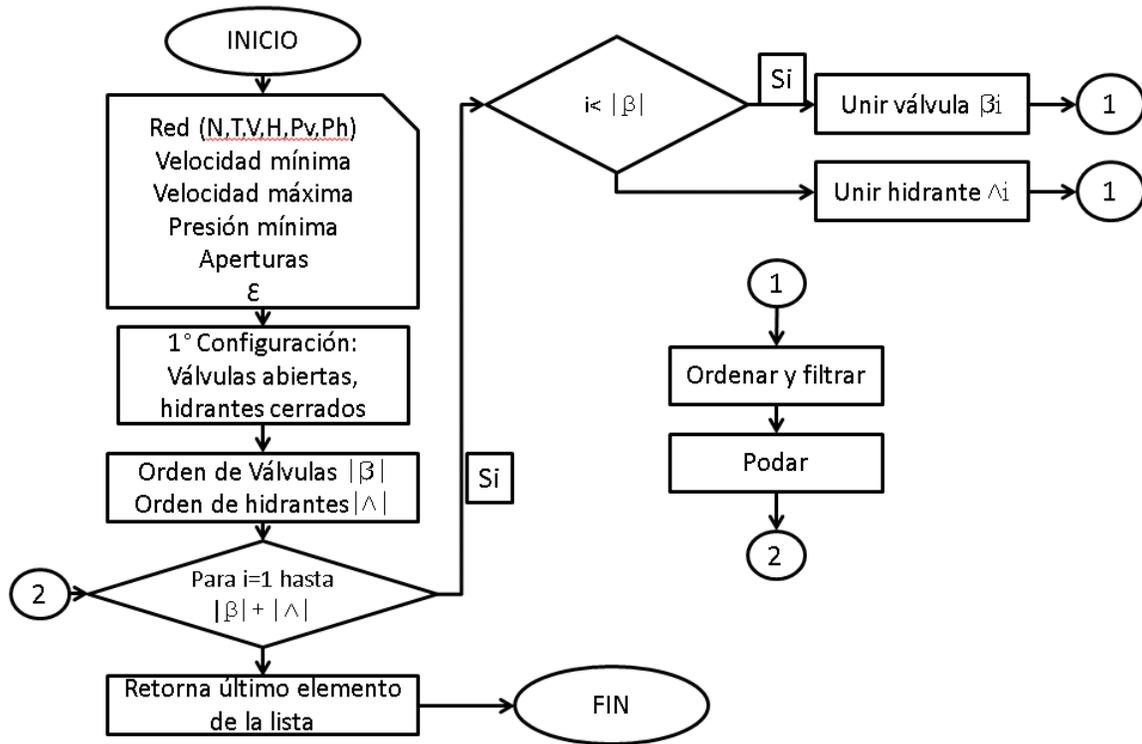


Ilustración 6. Diagrama de flujo que describe el algoritmo de solución aproximada modelo 2. (Adaptado del algoritmo presentado en Rothstein, 2011).

En este esquema se puede observar el uso de algunas funciones estas son:

**Ordenar:** Requiere el cálculo hidráulico y ordena válvulas e hidrantes según el impacto que estos elementos causen en las presiones de la red.

**Unir:** Contiene una lista con todas las configuraciones previas unida a la condición de válvula o hidrante agregado.

**Ordenar y filtrar:** Función que ordena ascendentemente la lista de configuraciones respecto al valor de la influencia. Elimina las configuraciones que no cumplen con las restricciones. Finalmente, reemplaza las configuraciones que desconectan nodos por configuraciones similares. Diagrama mostrado a continuación.

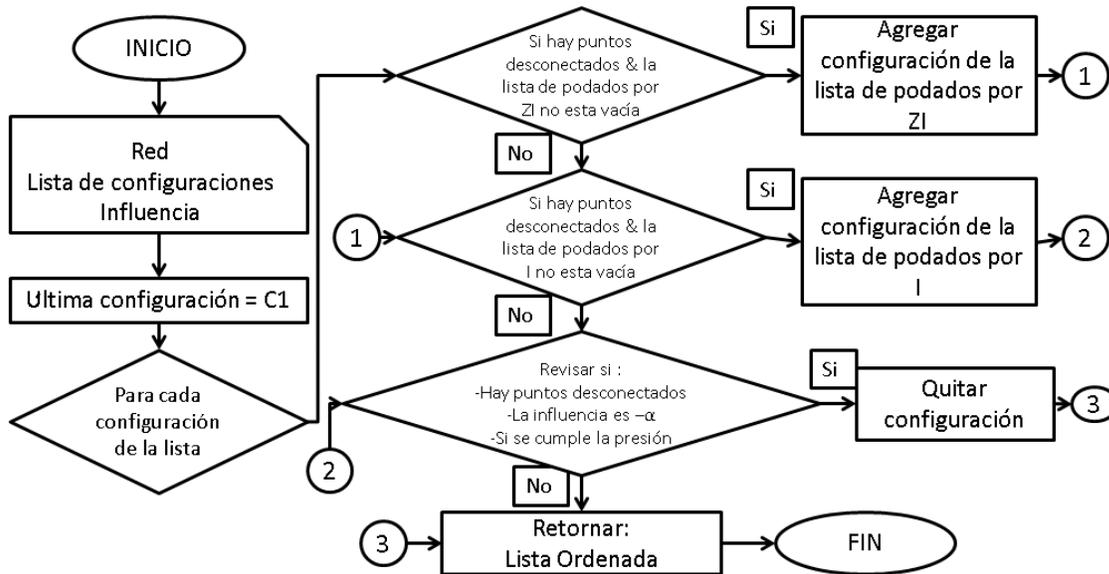


Ilustración 7. Diagrama de flujo que describe la función de ordenar y filtrar modelo 2. (Adaptado del algoritmo presentado en Rothstein, 2011).

Podar: Función que almacena cada nudo que se puede de forma que en el paso anterior se pueda hacer remplazos cuando exista una desconexión de nudos. Diagrama mostrado a continuación.

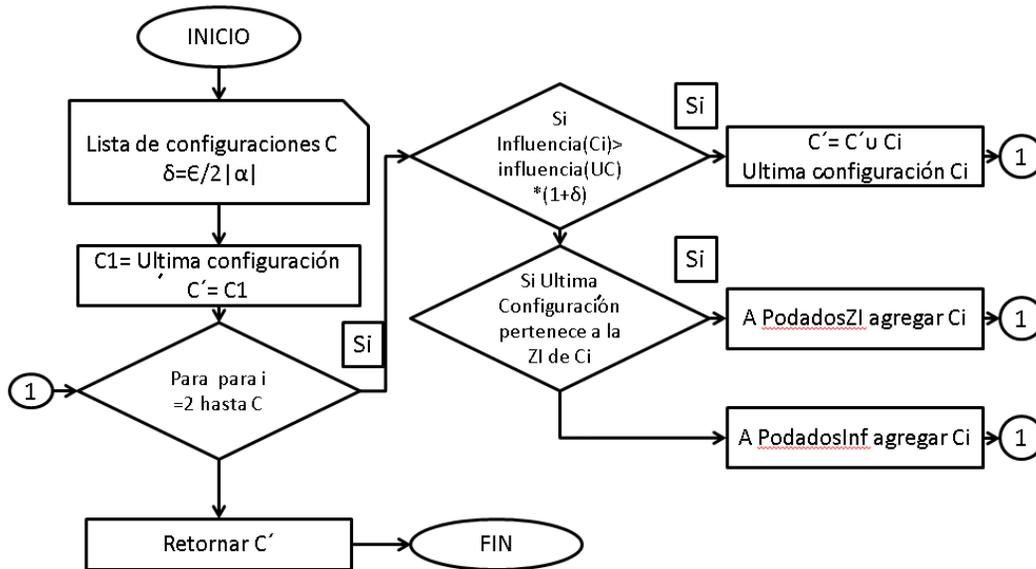


Ilustración 8. Diagrama de flujo que describe la función de poda modelo 2. (Adaptado del algoritmo presentado en Rothstein, 2011).

### 3.3.2.2 Función Objetivo

Para esta metodología la función objetivo implementada es la maximización de la suma de las velocidades de todas las tuberías a lavar.

### 3.3.2.3 Implementación

Se desarrollo un módulo en Redes (ver Ilustración 9) que cuenta con los siguientes elementos:

- Tubos a Lavar: en esta Sección se indican que tubos se deben lavar definiendo las funciones de velocidad mínima y máxima.
- Aproximación: en este lugar se define el valor del parámetro de aproximación  $\epsilon$  que define la calidad de la solución, pero a su vez aumenta el número de escenarios a evaluar.
- Hidrantes: REDES modela los hidrantes cómo nudos que tienen exponente y coeficiente de emisor. En esta sección se determina cuánto valdrían cada uno de esos atributos si el hidrante se encontrara abierto. Un coeficiente de emisor 0 implica que el hidrante no está abierto o que no hay un hidrante en ese nudo.



- Presión Mínima: aquí se determina el valor mínimo de presión en los nudos en todo momento. Si únicamente se quiere asegurar que el modelo sea físicamente factible entonces se utiliza como valor mínimo 0.
- Apertura de las Válvulas: Es recomendable definir los valores de apertura para las válvulas de manera que el personal de campo pueda abrir las válvulas con precisión. Se restringen entonces los intervalos de apertura a fracciones que resultan cómodas para reproducir en campo.
- Función Objetivo: El algoritmo de aproximación trabaja con la suma de velocidades en los tubos a lavar. Hay una opción en el programa para el manejo de la función objetivo pero actualmente está deshabilitado.
- Reporte de Lavado: En este espacio se determina donde guardar el plan de lavado. Este reporte incluye datos de interés para reproducir el lavado en campo, incluyendo los tubos que aumentan su velocidad por más de un factor de 1;5 y los tubos en los que el flujo cambia de dirección debido al cambio de presiones.

A continuación se presenta la interfaz del programa de lavado.

**Tubos a Lavar**

	Vel_Min	Vel_Max
1	0	3
10	0	3
11	0	3
12	0	3
13	0	3
14	0	3
15	0	3
16	0	3
17	0	3
18	0	3
19	0	3

**Hidrantes**

	Coef_Emisor	Exp_Emisor
1	0	0.5
10	0	0.5
11	0	0.5
12	0	0.5
13	0	0.5
14	0	0.5
15	0	0.5
16	0	0.5
17	0	0.5
18	0	0.5
19	0	0.5

**Función Objetivo**

Maximizar

Número de Válvulas    Número de Hidrantes

Presión en el nodo...    Velocidad en el tubo...

Potencia ( $x^y$ )    Valor Absoluto  $|x|$

**Reporte de Lavado**

Guardar en:

C:\Users\Uandes\Documents\Reporte.txt

Cambiar

**Aproximación**

Nivel de Aproximación (%): 75

**Presión Mínima**

Presión Mínima (Pa): 0

**Apertura Válvulas**

Intervalos de Apertura: 1/1

Lavar

Ilustración 9. Interfaz del módulo de lavado del programa REDES modelo 2.



En esta interfaz se observan dos tablas de datos. En la primera tabla titulada “tubos a lavar” aparece la identificación de todos los tubos de la red y el usuario puede seleccionar cual es la velocidad mínima para los tubos que desea lavar y la velocidad máxima para cualquiera de los tubos de la red. En la segunda tabla titulada “hidrantes” aparece el número de identificación de los nudos de la red y el usuario debe definir en cual de estos se encuentran los hidrantes asignando a estos un coeficiente de emisor. Adicionalmente, el usuario puede decidir en donde guardar el reporte de lavado en el recuadro “Reporte de Lavado”; puede seleccionar el Nivel de aproximación que es el que define la calidad de la solución en el recuadro de “Aproximación”; puede definir una presión mínima para la red en el recuadro de “Presión Mínima” y finalmente puede seleccionar los intervalos de aperturas de las válvulas en el recuadro de Apertura de Válvulas; en este recuadro se introduce un número entero que indica el porcentaje de apertura que puede tener cada válvula, por ejemplo, si se selecciona 1/2 los porcentajes de apertura serían 0%, 50% y 100% esto se realiza a fin de tener intervalos discretos para facilitar la operación en campo. El recuadro “Función Objetivo” se encuentra deshabilitado; este recuadro se desarrolló para darle la posibilidad al usuario de elegir la función objetivo para optimizar el proceso de lavado.

### **3.4 Modelo 3 – Algoritmos Genéticos Propuesto**

Para realizar el proceso de lavado, se debe contar con el modelo hidráulico de una red así como con la ubicación de las válvulas e hidrantes en el sistema. Posteriormente, se debe determinar cuales son las tuberías que se desean lavar, para a partir de estas establecer los accesorios a operar; luego se debe determinar cual es la función objetivo y finalmente se realiza la optimización haciendo uso de AG para encontrar la forma de operar los accesorios seleccionados.



#### 3.4.1 Formulación del problema

- a) Como datos de entrada se debe tener una red con todas las características de sus tuberías y nudos, adicionalmente se debe contar con la ubicación de las válvulas e hidrantes.
- b) Se debe contar previamente con un modelo que simule la hidráulica de la red. Para esta investigación se cuenta con los programas REDES y EPANET.
- c) El problema consiste en dadas condiciones topológicas de la red determinar el estado de los accesorios (válvulas e hidrantes) que permita alcanzar objetivos de lavado como una velocidad de desprendimiento requerida.

#### 3.4.2 Selección de rutas y accesorios

Como se explicó en el Numeral 2.4.2 la selección de rutas o circuitos de lavado es uno de los pasos que se considera en lavados unidireccionales a fin de dirigir el flujo a la tubería deseada y evitar que el agua sucia producida por lavado quede almacenada en el sistema, además para permitir una maximización de las velocidades al dirigir el flujo por tuberías específicas. En cierta medida, este procedimiento de selección de ruta lo que busca es facilitar la identificación de los accesorios que deben manipularse en el lavado.

En esta investigación se espera obtener una combinación de accesorios que permita maximizar las velocidades; al realizar esa selección de ruta se incluye subjetividad al modelo, por lo que se plantea que este procedimiento de selección de ruta no se lleve a cabo. En cambio, se propone manejar estos objetivos directamente con la selección de accesorios.

- Objetivo 1: Expulsar el agua sucia del sistema.

Se propone controlar este objetivo con la selección de hidrantes, identificando el hidrante aguas abajo de la tubería a lavar para diámetros menores a 300 mm o identificando 2 hidrantes aguas abajo en caso de diámetro mayores (como se pudo observar en la Tabla 2 y la Tabla 3 para diámetros menores a 300 milímetros es suficiente con abrir 1 hidrante para obtener las velocidades de lavado).

- Objetivo 2: Velocidades de lavado e identificación de accesorios.



Este es el objetivo que se piensa alcanzar directamente con la optimización. En caso de ser necesario reducir el número de válvulas a operar por motivos operacionales (limitación de personal para las cuadrillas) o por tamaño del problema se propone en lugar de seleccionar una ruta y después las válvulas que la delimitan darle un nivel de importancia a cada válvula según la afectación que tiene en la tubería a lavar y seleccionar el número de válvulas deseadas.

### 3.4.3 Metodología de optimización

Una vez seleccionados los accesorios se va a simular la red dejando el hidrante o hidrantes identificados abiertos, luego se seleccionará el estado de las válvulas mediante la aplicación de optimización por AG. Es importante tener en cuenta que en algunos casos puede presentarse un cambio de dirección entre la condición inicial y la condición encontrada para el lavado, por lo que se debe hacer una revisión al final de la optimización para verificar que el lavado se esté llevando a cabo correctamente, en caso de que la dirección de flujo cambie y el hidrante no este funcionando se debe seleccionar otro hidrante y volver a realizar el proceso de optimización.

#### 3.4.3.1 Definición de los parámetros

Para la selección de la función objetivo se utilizaron los siguientes criterios:

- a) Criterio 1: operacional, donde se incluye el número de accesorios a operar y daños en el sistema por altas velocidades.
- b) Criterio 2: hidráulico, se incluyen las velocidades de las tuberías.
- c) Criterio 3: servicio, tiene en cuenta la presión en los nodos del sistema.

Se encontró que la mejor forma para realizar la optimización consiste en incluir la velocidad en la función objetivo y las presiones, cantidad de válvulas operadas y velocidades máximas como restricciones. Estas restricciones se ingresan al programa como un costo no como una condición de frontera que elimine la solución en caso de no cumplirse.



Los valores y parámetros empleados para la creación del AG se seleccionaron a partir de la revisión bibliográfica del tema.

- Tamaño de la población: se emplea un tamaño de la población de 50 y 100 individuos. (se evalúa la influencia de este parámetro en la solución).
- Tipo de algoritmo: se usa un algoritmo de generación elitista para conservar así las mejores soluciones de cada generación.
- Método de reproducción: debido a la influencia de los cambios operacionales en la hidráulica de la red, donde las variaciones de aperturas de hidrantes y válvulas pueden alterar significativamente el comportamiento del sistema, se considera que el mejor método para obtener individuos es por reproducción uniforme.
- Método de selección: Se trabaja con los métodos de ruleta y de torneo (se evalúa la influencia de este parámetro en la solución).
- Método de mutación: Se tendrá un porcentaje de mutación del 10%.



## 4 RESULTADOS

### 4.1 Análisis solución modelo 1

Para validar la metodología (Alvarez, 2009) realizó un ejemplo en la red R28 ubicando válvulas e hidrantes como se muestra en la Ilustración 10. Usando el criterio de bajas velocidades de flujo se identificaron las siguientes tuberías a lavar.

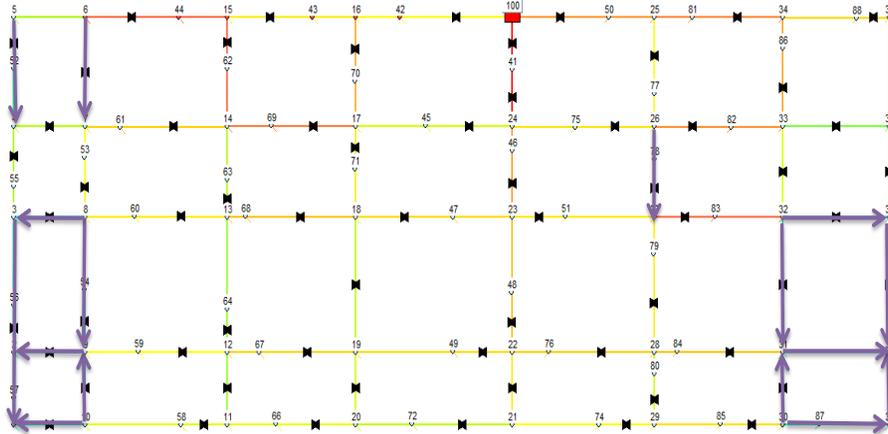


Ilustración 10. Tuberías a lavar modelo 1.

Luego, usando la metodología de selección de ruta se plantaron ocho diferentes rutas que abarcan la totalidad de las tuberías a lavar, a continuación se muestra una de las rutas.

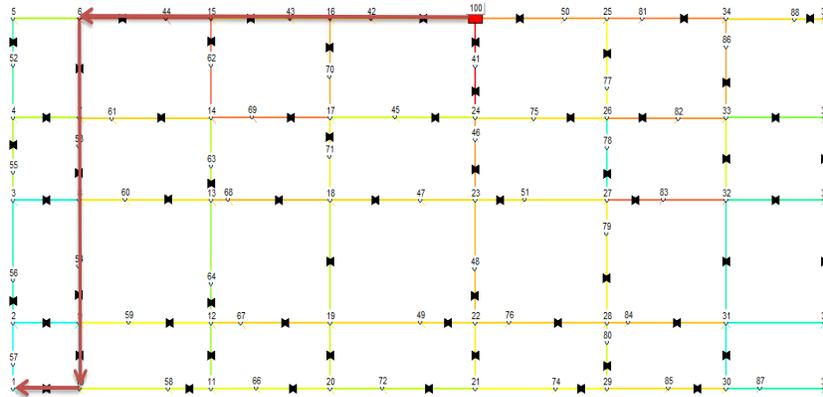
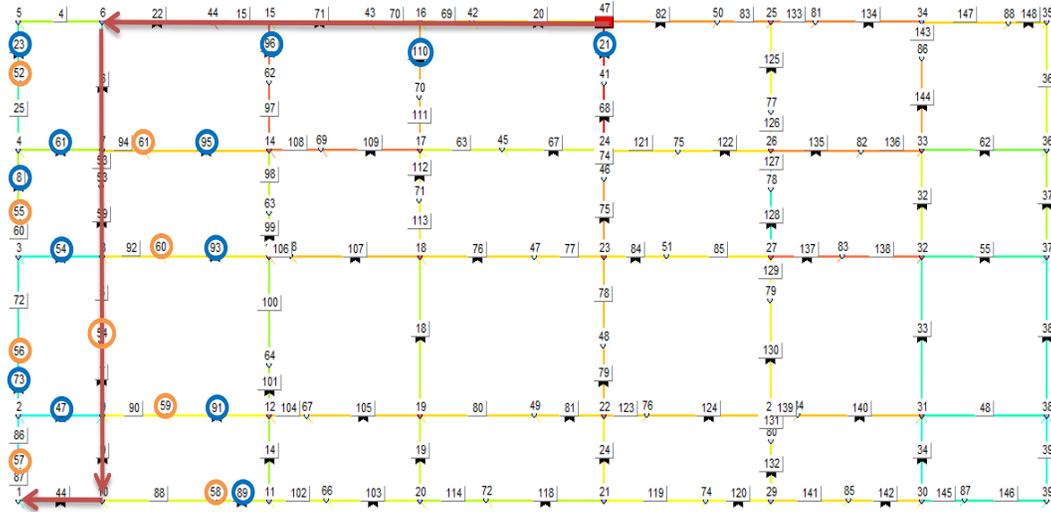


Ilustración 11. Ruta de lavado N°1 para modelo 1.

Posteriormente se seleccionan los accesorios que deben operarse (Ilustración 12) los cuales se encuentran encerrados en círculos de color azul y naranja, según el tipo de accesorio: las válvulas se encuentran en círculos azules y los hidrantes en círculos naranja.



**Ilustración 12. Ruta de lavado N°1 y accesorios a operar modelo 1.**

Finalmente se aplica el proceso de optimización; en la Tabla 6 se presenta el estado de las válvulas y de los hidrantes a operar para el lavado de la ruta N°1 de la Red R28. Esta combinación de apertura de hidrantes y cierre de válvulas corresponde al mejor individuo obtenido a partir del procedimiento de optimización de lavados hidráulicos.

**Tabla 6. Estado de hidrantes y válvulas para lavado de la ruta N°1 Modelo 1.**

Hidrantes			Válvulas		
Accesorios	Genes	Estado	Accesorios	Genes	Estado
H54	0	Cerrado	V21	1	Abierta
H57	1	Abierto	V110	0	Cerrada
H58	0	Cerrado	V96	0	Cerrada
H59	0	Cerrado	V23	1	Abierta
H60	0	Cerrado	V61	1	Abierta
H61	0	Cerrado	V54	1	Abierta
H52	0	Cerrado	V95	1	Abierta
H55	0	Cerrado	V93	0	Cerrada
H56	1	Abierto	V91	1	Abierta
			V89	0	Cerrada
			44	1	Abierta
			47	1	Abierta
			8	1	Abierta
			73	0	Cerrada



En la Tabla 7 se presentan las velocidades alcanzadas en las tuberías que deben lavarse pertenecientes a la ruta N°1 de la red R28.

**Tabla 7. Velocidad de lavado en las tuberías de interés de la ruta N°1 Modelo 1.**

<b>Id tubería</b>	<b>V</b>
<b>[-]</b>	<b>[m/s]</b>
44	1.75
9	2.49
7	2.59
5	2.59
6	1.99

A continuación se presenta un análisis de los resultados del lavado al emplear esta metodología.

#### *4.1.1.1 Definición de rutas de lavado y selección de accesorios.*

Con este ejemplo se puede ver como al realizar la selección de los accesorios a partir de la limitación de una ruta de lavado se le induce un factor de subjetividad a la modelación, en especial porque en redes reales no todas las tuberías del sistema tienen una válvula que las pueda aislar; además, aunque con este procedimiento se están obteniendo los valores de velocidades deseadas no se garantiza en ningún momento que los hidrantes que están abiertos son por los que se expulse el agua proveniente de tuberías lavadas.

También se puede observar que al seleccionar las válvulas con este criterio, entre más dispersas estén las válvulas el modelo es más propenso a tener fallas como cambios de dirección. Esto se debe a la subjetividad de la elección de estos accesorios.

#### *4.1.1.2 Optimización del lavado*

Con esos resultados se comprueba que efectivamente la optimización mediante AG se puede utilizar eficientemente para encontrar la combinación de estados en los accesorios que permitan alcanzar velocidades de lavado.



#### 4.1.1.3 Función objetivo

La función objetivo parece servir para este caso, pero dado la forma en que se calcula no se debe usar esta función en cualquier red ya que va a depender de la topología de la red que se esté empleando.

Otra desventaja de esta función objetivo es que las constantes que se usan no tienen un valor físico real por la forma en que se calcularon, lo que puede generar errores al tratar de implementarla para otros casos. Si estas constantes se tomarán como pesos de los diferentes parámetros de la ecuación se estaría nuevamente incluyendo algo de subjetividad al modelo.

Finalmente, se puede observar que esta función no parece ser parsimoniosa debido a la cantidad de parámetros empleados.

#### 4.1.1.4 Implementación

Esta metodología se implementó haciendo uso de los programas Excel y REDES (selección de rutas) y EPANET con Matlab (optimización). La desventaja que se encontró en la implementación realizada es que gran porcentaje de los procedimientos se debían hacer manualmente para el caso de selección de rutas.

## 4.2 Análisis solución modelo 2

Para validar la metodología de (Rothstein, 2011) se realizó un ejemplo en la red R28 con 1 hidrante y 12 válvulas como se observa en la Ilustración 13.

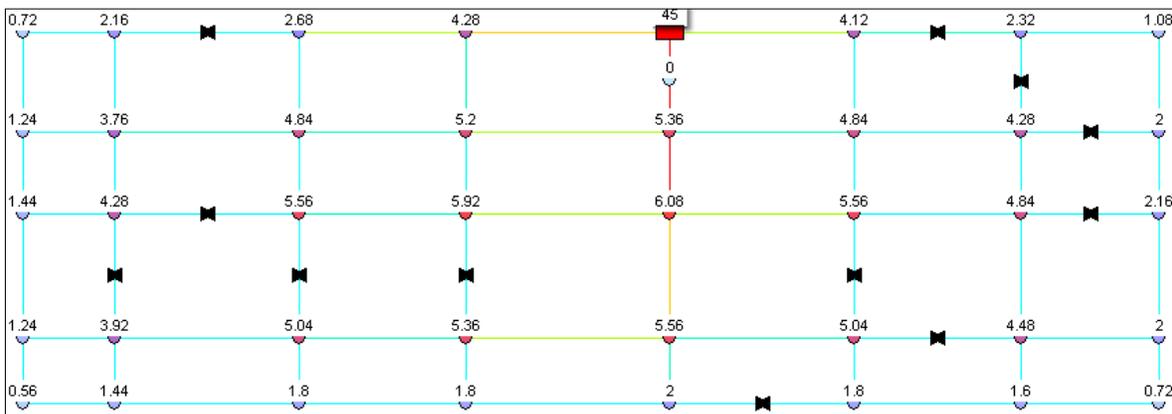


Ilustración 13. Accesorios de la red empleados modelo 2.



Se utilizó la metodología de optimización para realizar el lavado en las tuberías 33 y 37 mostradas en la Ilustración 14.

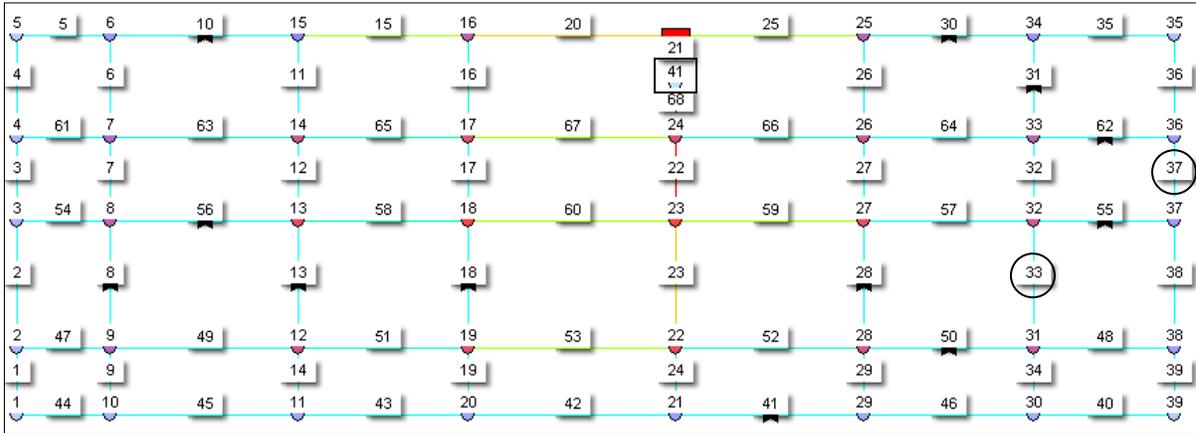


Ilustración 14. Tuberías a lavar modelo 2.

A continuación se muestra el resultado obtenido al utilizar un parámetro de aproximación del 1% (máxima precisión del modelo), con lo que se evaluaron 10664 escenarios. El procedimiento de lavado consistió en cerrar las válvulas 55, 18, 13, 28, 10 y abrir el hidrante.

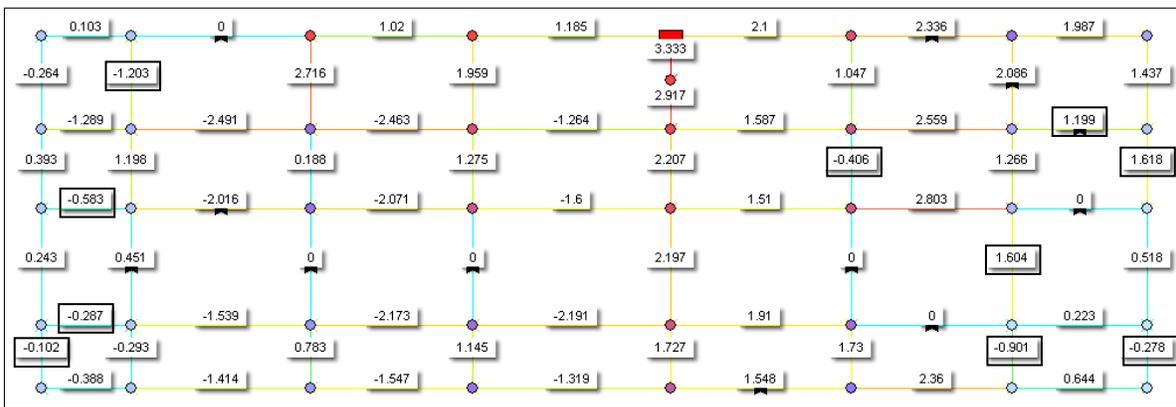


Ilustración 15. Velocidades obtenidas modelo 2.

A continuación se presenta un análisis de los resultados del lavado al emplear esta metodología.

#### 4.2.1.1 Definición de rutas de lavado y selección de accesorios.

En este modelo no se tiene en cuenta ninguna metodología de selección, y funciona bien para casos en los que la cantidad de accesorios es poca y además se tiene pocas tuberías a



lavar. De lo contrario el espacio de solución es muy grande y a pesar de que con la solución aproximada se reduce el tamaño de este, no es suficiente y la aplicación se bloquea por falta de memoria. Por esta razón, el que se consideren todos los accesorios en la modelación es positivo en cuanto que se elimina la subjetividad, pero inconveniente para el tamaño de búsqueda de soluciones. Adicionalmente, el incluir los hidrantes genera el mismo problema que en el modelo 1, no se garantiza uno de los principales objetivos del UDF que es expulsar el agua de lavado del sistema. En particular para el ejemplo seleccionado (Ilustración 13), la ubicación del hidrante no permitiría que se lograra un lavado eficiente para la red porque este está ubicado aguas arriba de la mayoría de tuberías. El programa no garantiza el recorrido desde la fuente de abastecimiento guiado por válvulas progresivamente hasta aguas abajo de las tuberías a lavar, por lo que pueden generar eventos de decoloración.

#### *4.2.1.2 Optimización del lavado*

Con esos resultados se comprueba que efectivamente la optimización para encontrar la combinación de estados en los accesorios que permitan alcanzar velocidades de lavado mediante esta metodología se puede realizar eficientemente.

#### *4.2.1.3 Función objetivo*

La función objetivo seleccionada (maximizar la sumatoria de las velocidades a lavar) es adecuada para el fin que se busca alcanzar en este ejemplo. Además, es una función simple que permite alcanzar el principal objetivo y en conjunto con las restricciones de velocidad y presión garantiza que se tengan las condiciones hidráulicas deseadas. Tiene la desventaja de no incluir la minimización de accesorios a operar.

#### *4.2.1.4 Implementación*

La implementación de esta metodología en REDES permite un fácil manejo del problema, tiene como desventajas que muestra sola la mejor solución por lo que en el caso de no encontrar solución no permite identificar una solución alternativa con la que se pueda



realizar un lavado si se permite romper una restricción (por ejemplo ver si hay un lavado en el que se obtengan velocidades adecuadas así algún punto de la red quede con una presión inferior a la mínima).

### 4.3 Resultados y Análisis solución modelo 3

Para ejemplificar el funcionamiento de la metodología propuesta se hace uso de la red R28; se usa la misma distribución de válvulas e hidrantes del modelo 2, pero se deja el nudo 66 como un hidrante ya que la ubicación del hidrante 41 es inadecuada para la mayoría de escenarios.

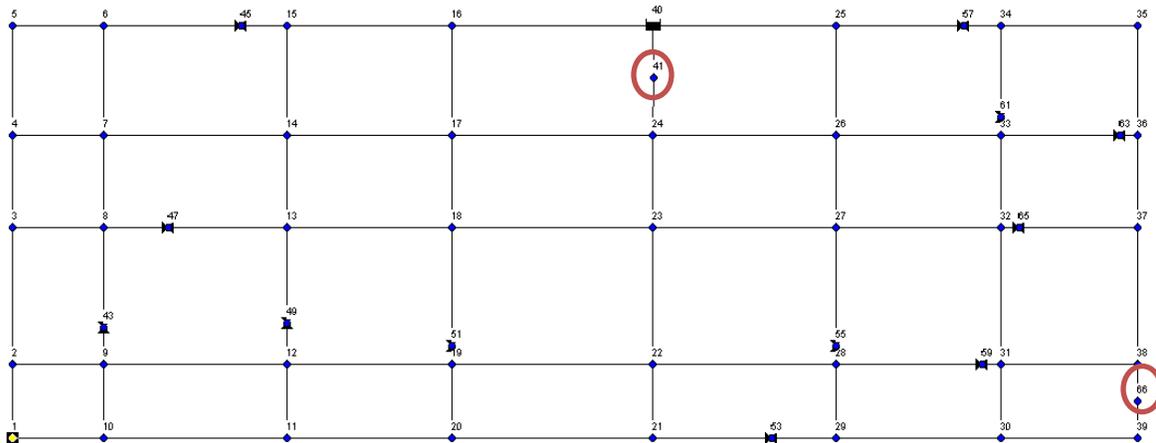
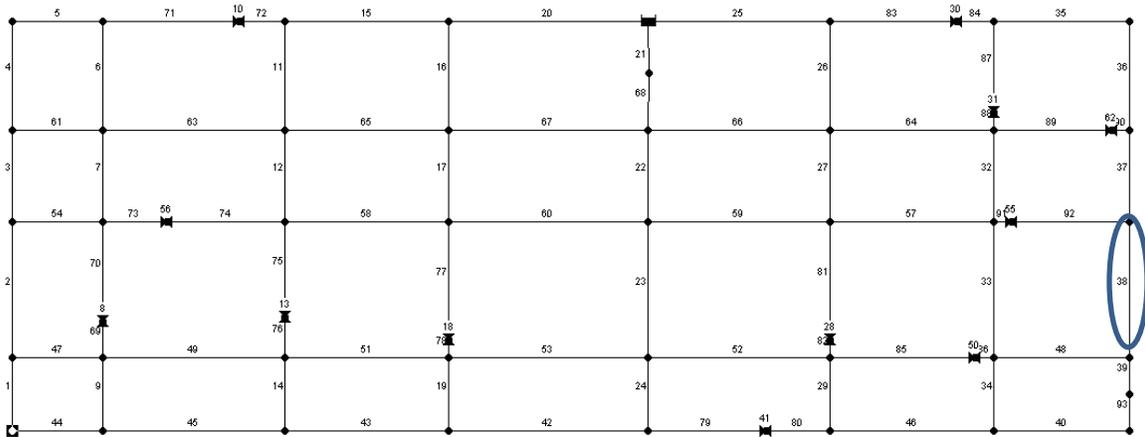


Ilustración 16. Distribución de accesorios modelo 3.

A continuación se explican paso a paso las etapas de la metodología.

#### 4.3.1.1 Seleccionar las tuberías a lavar.

Se escoge como tubería a lavar la tubería 38 (ver Ilustración 17) la cual tiene una velocidad de aproximadamente 0.36 m/s. Esta selección, como se dijo anteriormente se debe realizar para las tuberías con menores velocidades o esfuerzos cortantes de la red; en este ejemplo se eligió únicamente una tubería para ver con mayor claridad los pasos de la metodología.



**Ilustración 17. Tuberías a lavar modelo 3.**

#### 4.3.1.2 Accesorios a operar.

Se selecciona como hidrante el nudo que se encuentra más cercano al nudo aguas abajo de la tubería a lavar más alejada de la fuente (en este caso nudo 66), y en caso de no querer usar todas las válvulas del sistema se clasifican las válvulas según la afectación que tienen en cada una de las tuberías a lavar. Cada válvula se evalúa cerrándola y dejando todas las demás válvulas abiertas y los hidrantes cerrados, luego se mira el efecto en las velocidades de las tuberías a lavar y se les da un valor de importancia siendo la más importante (Importancia 1) la que genera una mayor velocidad (Tabla 8).

**Tabla 8. Nivel de importancia de las válvulas Modelo 3.**

Válvula	Velocidad en la tubería 38 (m/s)	Importancia
10	0,381	5
13	0,376	7
18	0,378	6
28	0,498	4
30	0,635	2
31	0,216	10
41	0,541	3
50	0,888	1
55	0,023	12
56	0,374	8
62	0,128	11
8	0,374	9



En caso de querer reducir el número de válvulas que se tendrán en la modelación se deberían empezar a sacar aquellas válvulas con mayor valor de importancia. Para este ejemplo se considerara la modelación con todas las válvulas ya que son pocos accesorios.

#### 4.3.1.3 Optimización.

Se evaluaron 3 funciones objetivo, primero se realizaron corridas del programa para cada función con valores de la población de 50 y 100 (máxima permitida por el programa) y generaciones de 200 y 500 sin tener en cuenta restricciones. Después se realizó el mismo procedimiento pero incluyendo restricciones, estas restricciones las considera el programa como una penalización o costo de cada individuo, en todos los casos la restricción consistió en 1 unidad de penalización para los nudos con presiones por debajo de la mínima, 1 unidad de costo para tuberías con velocidades mayores a la máxima lo que se puede asociar con daños en la red y finalmente 1 unidad de costo por accesorios operados lo que representa el costo de operar una válvula para la empresa. Adicionalmente, se utilizo optimización multi-objetivo (velocidades y presiones) para algunos escenarios teniendo mejores resultados con las funciones mono-objetivo con restricciones. A continuación se presenta la descripción de cada función evaluada:

- F1: Función empleada en el modelo 2, que consiste en maximizar las velocidades de las tuberías a lavar.
- F2: Función que busca que los valores de las velocidades de las tuberías a lavar sean cercanos a la velocidad de lavado deseada.

$$FO = \text{Min } \text{abs}(Vel_{tuberia} - Vel_{lavado})$$

- F3: La función utilizada en el modelo 1 de (Álvarez, 2009), ver Ecuación 8.
- F4: Función F1 con restricciones.
- F5: Función F2 con restricciones.
- F6: Función F3 con restricciones.
- F7: Optimización multi-objetivo que incluye como primer objetivo la función F1 y como segundo la minimización de los puntos con déficit de presión.



- F8: Optimización multi-objetivo que incluye como primer objetivo la función F1 y como segundo la minimización de los puntos con déficit de presión, con restricciones.
- F9: Optimización multi-objetivo que incluye como primer objetivo la función F2 y como segundo la minimización de los puntos con déficit de presión.
- F10: Optimización multi-objetivo que incluye como primer objetivo la función F2 y como segundo la minimización de los puntos con déficit de presión, con restricciones.

También se probaron funciones multi-objetivo minimizando el número de accesorios y con la función F3, pero para todos estos casos no se alcanzó la velocidad de lavado deseada. En la Tabla 9 se muestra un resumen de los principales resultados obtenidos.



Tabla 9. Prueba función objetivo Modelo 3.

Función	Población	Generación	Selector	Genes-Válvulas (1 abierto, 0 cerrado)													Velocidad (m/s)	Puntos Baja Presión	Puntos alta velocidad	Accesorios operados
				0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0				
F1	50	500	Ruleta	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	3.850	33	4	6	
F1	100	500	Ruleta	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	3.850	21	2	5	
F1	50	200	Ruleta	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	3.850	33	4	6	
F1	100	200	Ruleta	0	0	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	3.850	33	4	6	
F1	50	500	Torneo	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	3.850	21	2	6	
F1	100	500	Torneo	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	3.850	21	2	6	
F1	50	200	Torneo	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	3.850	21	2	6	
F1	100	200	Torneo	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	3.850	21	2	6	
F2	50	500	Ruleta	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1.595	31	3	10	
F2	100	500	Ruleta	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1.595	31	3	10	
F2	50	200	Ruleta	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1.595	31	3	10	
F2	100	200	Ruleta	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1.595	31	3	10	
F2	50	500	Torneo	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1.595	31	3	10	
F2	100	500	Torneo	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1.595	31	3	10	
F2	50	200	Torneo	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1.595	31	3	10	
F2	100	200	Torneo	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1.595	31	3	10	
F3	50	500	Ruleta	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.891	4	0	3	
F3	100	500	Ruleta	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.891	4	0	3	
F3	50	200	Ruleta	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.891	4	0	3	
F3	100	200	Ruleta	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.891	4	0	3	
F3	50	500	Torneo	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.891	4	0	3	
F3	100	500	Torneo	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.891	4	0	3	
F3	50	200	Torneo	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.891	4	0	3	
F3	100	200	Torneo	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0.891	4	0	3	
F4	50	500	Ruleta	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	3.850	21	2	4	
F4	100	500	Ruleta	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	3.850	21	2	4	



F4	50	200	Ruleta	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	3.850	21	2	4
F4	100	200	Ruleta	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	3.850	21	2	4
F4	50	500	Torneo	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	3.850	21	2	4
F4	100	500	Torneo	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	3.850	21	2	4
F4	50	200	Torneo	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	3.850	21	2	4
F4	100	200	Torneo	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	3.850	21	2	4
F5	50	500	Ruleta	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1.677	20	3	4
F5	100	500	Ruleta	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1.677	20	3	4
F5	50	200	Ruleta	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1.677	20	3	4
F5	100	200	Ruleta	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1.677	20	3	4
F5	50	500	Torneo	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1.677	20	3	4
F5	100	500	Torneo	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1.677	20	3	4
F5	50	200	Torneo	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1.677	20	3	4
F5	100	200	Torneo	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1.677	20	3	4
F6	50	500	Ruleta	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1.757	21	4	3
F6	100	500	Ruleta	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1.757	21	4	3
F6	50	200	Ruleta	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1.757	21	4	3
F6	100	200	Ruleta	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1.757	21	4	3
F6	50	500	Torneo	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1.757	21	4	3
F6	100	500	Torneo	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1.757	21	4	3
F6	50	200	Torneo	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1.757	21	4	3
F6	100	200	Torneo	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1.757	21	4	3
F7	50	200	Torneo	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1.049	21	4	4
F8	50	200	Torneo	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1.727	21	4	4
F9	50	500	Torneo	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0.529	10	0	5
F10	50	200	Torneo	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	0.379	19	3	7



Se puede observar que el método de selección no afecta los resultados al igual que el número de individuos de cada población, adicionalmente en la mayoría de los casos la solución converge en menos de 25 generaciones. Ver Ilustración 18.

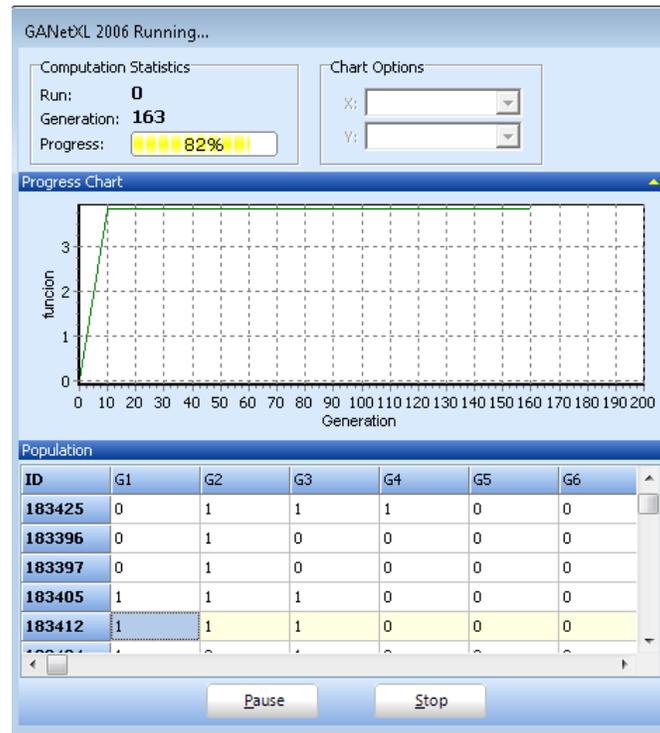


Ilustración 18. Convergencia F1 modelo 3.

Como se observa en la Tabla 9 la función objetivo mas adecuada es la función F2 con restricciones, en la Ilustración 19 se puede ver el costo de las funciones con las que se obtuvo una velocidad de lavado adecuada si se considera como 1 unidad de costo el daño a una tubería por alta velocidad, un punto de presión baja (implica gastos de notificación a los usuarios), o una válvula operada.

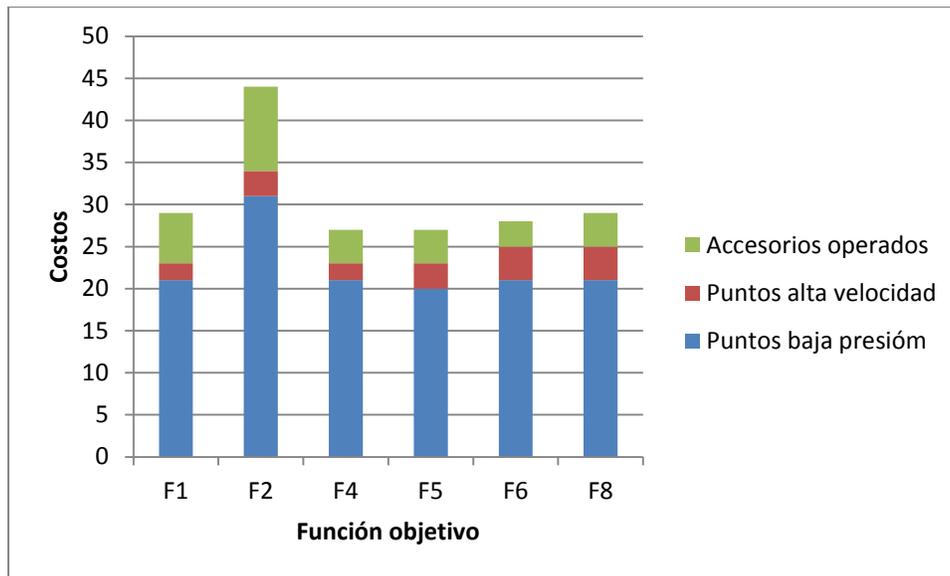


Ilustración 19. Comparación costos de funciones objetivo modelo 3.

En la Ilustración 19 se puede ver que la mejor función objetivo es la F5, ya que tiene un costo bajo y con esta se obtiene la mejor velocidad de lavado de la tubería deseada, para el caso de mantenimiento preventivo esta sería la mejor alternativa. Sin embargo, una de las ventajas de esta metodología es la flexibilidad que se tiene para la selección de funciones objetivo y restricciones lo que es útil, ya que dependiendo de las necesidades de la empresa el objetivo del lavado o la priorización de los costos puede variar.

En este ejemplo el punto mas crítico fueron los nudos con déficit de presión, a pesar de que este número de nudos fue alto se considera que se obtuvo una buena alternativa de lavado, ya que para el ejemplo la mayoría de presiones estaba cerca a la mínima 10 m.c.a en el estado inicial (válvulas abiertas, hidrantes cerrados).

Otra de las ventajas de usar la implementación con el programa GANetXL es que se puede tener el registro de las soluciones lo que permite ver si hay alguna que funcione mejor para el usuario según sus necesidades. Como desventajas se tiene la garantía del óptimo global del problema y que para los casos en los que se quiere que las restricciones se cumplan estrictamente no necesariamente encuentra solución.



## 5 CONCLUSIONES

- Se formuló una metodología útil para la selección de lavados hidráulicos unidireccionales haciendo uso de optimización con Algoritmos Genéticos.
- Se desarrolló una herramienta sencilla y fácil de usar que hace uso del software EPANET en conjunto con GANetXL ambos de carácter gratuito, vinculados a Excel.
- Con esta metodología se brinda a las empresas prestadoras del servicio de agua potable una herramienta práctica para el mantenimiento de redes.
- El lavado de redes de distribución se realiza mediante mecanismos que consisten en aumentar la velocidad para que el agua arrastre sedimentos y limpie los tubos afectados. El tema de lavado ha sido abordado principalmente partiendo de la calidad del agua requerida. Por un lado, se han investigado diversos factores que influyen en la formación de biopelículas y, por otro, se ha estudiado cómo la formación de estas biopelículas afecta la hidráulica del sistema. El tema también ha sido abordado desde un enfoque operacional, en el que se busca encontrar las estrategias adecuadas para que lavado sea eficiente y no genere desprendimiento indeseado de biopelículas.
- El grado de planeamiento y desarrollo de un programa de lavado depende de aspectos como cual es la calidad del agua deseada, como son la topología de la red, la dinámica de crecimiento de la biopelícula y las características hidráulicas del sistema.
- El agua potable obtiene niveles de calidad adecuados para el consumo en su paso por las plantas de tratamiento pero ésta se degrada en su recorrido por las redes debido a la presencia de películas biológicas y minerales y acumulación de sedimentos en los conductos, llegando a los consumidores con una calidad inferior a la inicial. Los eventos de decoloración son una representación de la disminución de la calidad de agua debido a cambios en las condiciones hidráulicas en el sistema de distribución que generan el desprendimiento de películas cohesivas



compuestas por distintos tipo de materiales como lo son minerales y microorganismos.

- La aceptación de una función objetivo en particular no sólo depende de su capacidad para valorar los individuos evaluados de acuerdo con los objetivos perseguidos, sino también de su efectividad en la eliminación de los individuos que no cumplan con las restricciones establecidas para el problema de optimización.
- En la evaluación de la efectividad de los lavados hidráulicos deben tenerse en cuenta variables de tipo técnico, operativo y económico entre las cuales se encuentran la velocidad de lavado, la cantidad de agua utilizada en el procedimiento y el número de accesorios operados.
- A través de la función objetivo, la metodología propuesta permite optimizar el procedimiento de lavado hidráulico a la luz de las principales variables que influyen en la ejecución de dicho procedimiento, entre las cuales se encuentra el número de accesorios operados, la cantidad de tuberías lavadas y la afectación del servicio en términos del cambio de presiones en todos los nudos de la red.



## 6 Bibliografía

- Ahn, J. C., Lee, S. W., Choi, K. Y., & Koo, J. Y. (2011). Application of unidirectional flushing in water distribution pipes. *Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA*, 1(60), 40-50.
- Aleán Ruiz, I. (2004). *Optimización técnico-económica del manejo del recurso hídrico en la sabana de Bogotá*. Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Bogotá.
- 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*, 1(136), 48-58.
- Alvarez, L. (2009). *Propuesta de una metodología para el diseño optimizado de lavados hidráulicos unidireccionales en redes de distribución de agua potable*. Tesis, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Andel, S., Price, R., Lobbrecht, A., & Kruijning, F. (June 2010). Modeling Controlled Water Systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 392- 404.
- Antoun, E. N., Dyksen, J. E., & Hildebrand, D. J. (1999). Unidirectional flushing: A powerful tool. *American Water Works Association. Journal*, 7(91 ), 62-71.
- Arboleda, A. (2009). *Procesos de lavado en biopelículas en redes de distribución de agua potable*. Tesis de grado en Ingeniería Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Awwa. (2003). *Investigation of Pipe Cleaning Methods*. U.S.A.
- Awwa. (2004). *Cost and Benefit Analysis of Flushing*. U.S.A.
- Baranowski, T., & LeBoeuf, E. (2008). Optimal Hydraulic Response to a Water Distribution System Contamination Event. *World Environmental and Water Resources Ahupua'a*.
- Barbeau, B., Gauthier, V., Julien, K., & Carriere, A. (2005). Dead-end flushing of a distribution system: Short and long term effects on water quality. *Journal of Water Supply*, 6(54), 371-383.
- Boxall, J. &. (2005). Modeling discoloration in Portable Water Distribution Systems. *Journal of Environmental Engineering ASCE*, 5(131), 718-726.
- Buchberger, S., Blokker, M., & Vreeburg, J. (2008). Sizes for self-cleaning pipes in municipal water supply systems. *Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA2008*.



- Carvajal, L., Gómez, A., & Ochoa, S. (2007). Simulación de un lavado hidráulico en tuberías para el control del crecimiento de biopelícula. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe*, 74(152), 73-72.
- Cliff, W. (2011). Sustainable distribution system asset management: Risk mitigation through control point management. *American Water Works Association. Journal*, 5(103), 100-103.
- Donoso R., A. M. (2009). *Efecto de los materiales de las tuberías en la generación de biopelículas en redes de distribución de agua potable*. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Escovae, M. A. (2011). *Calibración de redes de alcantarillado utilizando algoritmos genéticos*. Tesis de Maestría, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Escovar, M. A. (2009). *Reglas de operación para evitar el desprendimiento de biopelículas minerales en sistemas de distribución de agua potable*. Tesis Ingeniería Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Friedman, M., Kirmeyer, G. J., & Antoun, E. (2002). Developing and implementing a distribution system flushing program. *American Water Works Association. Journal*, 7(97), 48-56.
- Gómez, D. (2010). *Técnicas para el Lavado de Redes de Distribución de Agua Potable*. Tesis de grado en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Hernandez, E., & Jesús, Y. (2006). *Influencia de la Velocidad de Lavado en el desprendimiento y regeneración de Biopelículas en Tuberías de Agua a Presión*. Tesis de Maestría, Bogotá.
- Huben, H. (2005). *Water Distribution Operator Training Handbook American Water Works Association*. United States of America.
- Husband, S., & Boxall, J. (January 2010). Studies of Discoloration in Water Distribution Systems: Model Verification and Practical Implications. *Journal of environmental engineering*, 87-94.
- (s.f.). *Introducción a la Optimización Multiobjetivo*. XXI Seminario Anual de Ingeniería Química, Instituto Tecnológico de Celaya.
- Poulin, A., Mailhot, A., Grondin, P., Delorme, L., Periche, N., & Pierre, V. &. (2008). Heuristic Approach for Operational Response to Drinking Water Contamination. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 457-465.
- Poulin, A., Mailhot, A., Periche, N., Delorme, L., & Villeneuve, J.-P. (November-December 2010). Planning Unidirectional Flushing Operations as a Response to Drinking Water Distribution System Contamination. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 647-656.



- Preis, A., & Ostfeld, A. (2008). Multiobjective contaminant response modeling for water distribution systems security. *Journal of Hydroinformatics*, 10(4), 267-274.
- Reyes, P. (2004). *Aspectos hidráulicos para el lavado de redes de distribución de agua potable. Estado del Arte*. Tesis de grado en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Reyes, P., & Saldarriaga, J. (2005). Comportamiento de biopelículas luego de lavados sucesivos en tuberías de agua a presión. *Revista de ingeniería. Universidad de los Andes*(22 ), 142-150.
- Richter-Steever, E. (2005). *Implementing a Hydraulic Model to Develop a Unidirectional Flushing Program*. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Master of Science, South Dakota State University.
- Ripoll, V. (2004). *Optimización de redes de distribución de energía eléctrica con un modelo de optimización multiobjetivo*. Tesis de grado en Ingeniería Eléctrica, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Rojas H., M. (2008). *Lavado de redes de agua potable aplicabilidad en Chile*. Tesis de grado en Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago de Chile.
- Rothstein, E. G. (Enero 2011). *Planeación de Lavado Unidireccional en Redes de Distribución de Agua: Una Aproximación*. Tesis de Maestría no publicada, Universidad de los Andes.
- Saldarriaga, J. (2007). *Hidráulica de Tuberías. Abastecimiento de agua, Redes, Riegos*. Bogotá, Colombia: Alfaomega. ISBN: 978-958-682-680-8.
- Savić, D. A., Bicik, J., & Morley, M. S. (2011). A DSS Generator for Multiobjective Optimisation of Spreadsheet-Based Models. *Environmental Modelling and Software*, 551-561.
- Schaetzen, W., Beach, B., & Todd, M. (10 de Octubre de 2012). *UDF analysis using hydraulic modeling*. Obtenido de <http://www.nationalbenchmarking.ca/public/docs/infra%202005%20paper%20de%20schaetzen.pdf>
- Vargas, A. (2004). *Factores que favorecen el desarrollo y el crecimiento de biopelículas en las tuberías de los sistemas de distribución de agua potable*. Tesis de grado en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes, Bogotá.
- Vreeburg, J., & Boxall, J. (2006). Discolouration in potable water distribution systems: A review. *Water Research*(41), 519-529.
- Vreeburg, J., Schaap, P., Bergmans, B., & Dijk, J. (2008). How Effective is Flushing of Cast Iron Pipes. *Water Distribution Systems Analysis*, 559-570.



Diva Patricia Rubio Patiño  
Universidad de los Andes  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados



Walski, T., Yi Wu, Z., Hartell, W., & Culin, K. (2008). Determining the Best Way to Model Distribution Flushing. *World Environmental and Water Resources Congress Ahupua'a*.

Zhang, Y., & Edwards, M. (2007). Anticipating effects of water quality changes on iron corrosion and red water. *Journal of Water Supply: Research and Technology AQUA*, 1(56).