

Desarrollo de un Modelo de Gestión Operacional para la Reducción de Pérdidas Técnicas y Comerciales en Sistemas de Acueducto. Caso de Estudio: Un Distrito Hidráulico del Acueducto de la Ciudad de Bucaramanga

Abner Alexey Rincón Suárez

Trabajo de Grado para Optar el título de Magister En Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Director

Luis Fernando Castañeda Galvis

Ingeniero Civil, Magister en Ingeniería Civil, Magister en Tecnologías De Información Geográfica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental

Bucaramanga

2021

Agradecimientos

El autor expresa sus agradecimientos a:

Luis Fernando Castañeda Galvis, M. Sc. Ingeniería Civil.

Katia Lorena Aldana Campos, M. Sc. Ingeniería Civil.

Silvia Ruggeri, Esp. Monitoreo Biológico.

Sergio Andrés Torres Martínez. Ingeniero Civil.

Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	1
1 Objetivos	7
1.1 Objetivo general.....	7
1.2 Objetivos Específicos.....	7
2 Marco Referencial.....	8
2.1 Marco conceptual.....	8
2.1.1 Las pérdidas de agua y su reducción.....	8
2.1.2 Hidráulica de las fugas.....	15
2.1.3 Análisis Estadístico Bayesiano	16
2.1.4 La uniformidad de presiones como aspecto importante en la reducción de presiones ..	19
2.1.5 La confiabilidad hidráulica de una red de distribución.....	22
2.1.6 Función objetivo	24
2.1.7 Desempeño financiero en proyectos de reducción de pérdidas de agua	25
2.2 Estado del arte.....	27
3 Metodología	32
3.1 Etapa Preliminar: Selección del distrito hidráulico objeto de atención	34
3.2 Fase 1: Precisión del volumen de entrada y estimación del IANC	35
3.2.1 Estimación del IANC.....	35
3.3 Fase 2: Reducción volúmenes autorizados no facturados y no medidos	36
3.4 Fase 3: Reducción de pérdidas comerciales por submedición.....	37

3.4.1	Consumo esperado por vivienda.....	37
3.4.2	Metodología de análisis de decisión multicriterio	38
3.5	Fase 4: Reducción de pérdidas técnicas por fugas.....	39
3.6	Fase 5: Estimación de relaciones beneficio / costo.....	40
4	Resultados y Discusión	41
4.1	Selección del distrito hidráulico.....	41
4.1.1	Insumos	41
4.1.2	Daños significativos y patrón espacial de los mismos.....	45
4.1.3	Análisis del patrón espacial de los daños.....	47
4.1.4	Clasificación de distritos hidráulicos mediante la prueba de autocorrelación espacial Gi* (análisis de puntos calientes)	49
4.1.5	Caracterización del distrito hidráulico	56
4.2	Precisión del volumen de entrada y estimación del IANC	58
4.2.1	Adecuada medición del volumen de entrada del distrito Morro Alto.....	58
4.2.2	Proyección de instalación de medidores en sitios con consumos autorizados no facturados, no medidos	60
4.2.3	Estimación del IANC	63
4.3	Reducción de pérdidas comerciales por submedición	63
4.3.1	Selección de variables del análisis de decisión multicriterio	64
4.3.2	Recopilación de la información existente	65
4.3.3	Análisis de la información existente	67
4.3.4	Depuración de los datos	73
4.3.5	Análisis de decisión multicriterio	74

4.4	Reducción de pérdidas técnicas por fugas	79
4.4.1	Análisis Estadístico Bayesiano	80
4.4.2	Análisis con base en la gestión de la presión	89
4.5	Estimación de relaciones beneficio/costo	103
4.5.1	Beneficio/costo por reposición de micromedidores (reducción de pérdidas aparentes)....	104
4.5.2	Beneficio/costo por proyectos de reposición de tuberías (reducción de pérdidas reales).....	105
4.6	Discusión de Resultados	107
5	Conclusiones	114
6	Recomendaciones	117
7	Referencias Bibliográficas	118

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Terminología estándar para el balance hídrico de acuerdo con la IWA.....	9
Tabla 2 Métodos para reducir el ANF	28
Tabla 3 Configuración de los atributos en la base de datos.....	43
Tabla 4 Agrupación de tipos de daños y servicios en categorías para fines del análisis.....	44
Tabla 5 Categorías de daños seleccionadas para el periodo 2014-2018.....	46
Tabla 6 Distritos con agrupaciones de daños altamente significativos	52
Tabla 7 Clasificación de distritos hidráulicos.....	54
Tabla 8 Índice de agua no contabilizada para el año 2016 del distrito morro alto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.....	63
Tabla 9 Estructura de datos de las variables más relevantes	66
Tabla 10 Distribución de cuentas por marca de medidor en el distrito de Morro Alto	71
Tabla 11 Estadística descriptiva de los datos de la variable EDAD.....	74
Tabla 12 Selección de condición crítica en cada variable	75
Tabla 13 Pesos de las variables críticas.....	76
Tabla 14 Valor de cada parámetro por variable	77
Tabla 15 Intervalos de clase elegidos para el análisis bayesiano	82
Tabla 16 Cálculo de la probabilidad de daño general en el Distrito.....	83
Tabla 17 Probabilidades a priori no condicionales – Distrito Morro Alto	83
Tabla 18 Probabilidades a priori condicionales – distrito Morro Alto	83

Tabla 19 Probabilidad de daño en las tuberías de acuerdo con el análisis Bayesiano.....	84
Tabla 20 Estadísticas iniciales (antes) del distrito Morro Alto.....	91
Tabla 21 Operación inicial (antes) de las válvulas reguladoras de comando del distrito Morro Alto	92
Tabla 22 Estadísticas finales (después) del distrito Morro Alto.....	98
Tabla 23 Operación final (después) de las válvulas reguladoras de comando del distrito Morro Alto	99
Tabla 24 Estimación de la eficiencia de la gestión de la presión en el distrito Morro Alto	102
Tabla 25 Estimación del valor de pérdidas anuales de agua para el distrito Morro Alto	103
Tabla 26 Flujo de caja neto y relación beneficio costo para el proyecto de reposición de micromedidores	104
Tabla 27 Flujo de caja neto y relación beneficio costo para el proyecto de reposición de tuberías	106
Tabla 28 Flujo de caja neto y relación beneficio costo para ambos proyectos resultantes	108
Tabla 29 Estimaciones de algunas magnitudes físicas - implementando Proyecto de reposición de Medidores	109
Tabla 30 Estimaciones de algunas magnitudes físicas - implementando Proyecto de gestión de presión e infraestructura	109
Tabla 31 Estimaciones de algunas magnitudes físicas – implementando ambos proyectos	110

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Agua no contabilizada en Latinoamérica.	3
Figura 2 Diagrama de Venn, Eventos en la Ley de Probabilidad Total.	18
Figura 3 Presión (m.c.a.) vs. nodo - estado 1.	20
Figura 4 Presión (m.c.a.) vs. nodo - estado 2.	20
Figura 5 Diagrama de Flujo de la metodología desarrollada para el modelo de gestión de pérdidas propuesto.	32
Figura 6 Metodología de ponderación de variables.....	39
Figura 7 Shapefile de daños 2014-2018 del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P.	41
Figura 8 Histograma de frecuencias para los daños registrados en el periodo 2014 – 2018.....	46
Figura 9 Análisis de proximidad de datos mediante la herramienta “Promedio del vecino más cercano” de ArcGIS, para las categorías de daños seleccionados.	47
Figura 10 Resultados del análisis estadístico del promedio de vecino más cercano en ArcGIS para los daños clasificados.	48
Figura 11 Agrupamiento (clustering) de daños para registros comprendidos entre los años 2014-2018.	50
Figura 12 Distancia de banda de las entidades para el análisis de puntos calientes.....	51
Figura 13 Resultados de análisis de autocorrelación espacial G_i^* (análisis de puntos calientes).	53

Figura 14 Clasificación cuantitativa de distritos con base en el valor $F(\bar{Z}_{(Gi*)})$	55
Figura 15 Líneas de distribución del distrito morro alto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.	56
Figura 16 Longitudes por diámetro de tuberías (pulgadas) del distrito Morro Alto.	57
Figura 17 Longitudes por tipos de material de tuberías del distrito Morro Alto.....	57
Figura 18 Ubicación de caudalímetro del distrito morro alto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.	59
Figura 19 Ubicación de parques del distrito Morro Alto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.	60
Figura 20 Ubicación de hidrantes seleccionados para la instalación de medidores del distrito Morro Alto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.	62
Figura 21 Ubicación espacial de los suscriptores del distrito de Morro Alto.....	65
Figura 22 Consumo promedio mensual por uso.	69
Figura 23 Distribución de suscriptores por edad del medidor.....	73
Figura 24 Índice de reposición por barrio.	78
Figura 25 Probabilidad de daño en las tuberías de acuerdo al análisis Bayesiano.	85
Figura 26 Daños incidentes en las tuberías a reponer por análisis bayesiano.	86
Figura 27 Nodos aferentes a las tuberías a renovar por análisis Bayesiano.	87
Figura 28 Modelo hidráulico Distrito Morro Alto.....	90
Figura 29 Tramos a reponer (en negro) de acuerdo al análisis de uniformidad de presiones y confiabilidad hidráulica.	93

Figura 30 Índice de resiliencia vs número de iteraciones (o cambio) para el escenario óptimo elegido.	94
Figura 31 Coeficiente de uniformidad de presiones vs número de iteraciones (o cambio) para el escenario óptimo elegido.	95
Figura 32 Presión promedio vs número de iteraciones (o cambio) para el escenario óptimo elegido.	96
Figura 33 Cota Embalse vs número de iteraciones (o cambio) para el escenario óptimo elegido.	97
Figura 34 Verificación de las nuevas presiones mínimas de tarado posibles (abajo) en las reguladoras Alarcón (Izq.) y Concordia (Der).	100
Figura 35 Costos y Beneficios por la implementación de los proyectos resultantes.	107
Figura 36 Costos y Beneficios por la implementación del proyecto de gestión de presión e infraestructura.	107
Figura 37 Costos y Beneficios por la implementación de ambos proyectos.	108
Figura 38 Evolución estimada del IANC por implementación de proyectos.	110

Resumen

Título: Desarrollo de un modelo de gestión operacional para la reducción de pérdidas técnicas y comerciales en sistemas de acueducto. caso de estudio: un distrito hidráulico del acueducto de la ciudad de Bucaramanga*.

Autor: Abner Alexey Rincón Suarez**

Palabras claves: Reducción de pérdidas de agua, agua no contabilizada, IANC, sectorización hidráulica, gestión de la presión, gestión de la infraestructura.

Descripción:

El control del agua no contabilizada es un desafío importante para la gestión operacional de las empresas de acueducto ya que impacta negativamente la economía de las mismas y las condiciones ambientales de las fuentes de captación. Por tal motivo, la creación e implementación de métodos para la reducción del agua no contabilizada resulta en una actividad crucial para que dichas empresas sean rentables y ambientalmente sostenibles. Partiendo de este panorama, la presente tesis desarrolló un modelo de gestión operacional para la reducción de pérdidas de agua y se aplicó en el sistema de distribución de agua potable del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Dicho modelo inició con un análisis de puntos calientes de los registros de daños del sistema para la clasificación y selección de un distrito hidráulico. Posteriormente a la selección del distrito, se desarrollaron cinco (5) fases consecutivas, las cuales fueron: I) Cuantificación del volumen de entrada y estimación del Índice de Agua no Contabilizada, II) reducción de los volúmenes autorizados, no facturados y no medidos mediante el establecimiento de criterios para su cuantificación y posterior estimación, III) reducción de pérdidas comerciales por submedición, IV) reducción de las pérdidas técnicas por fugas y V) estimar las relaciones beneficio / costo de los proyectos resultantes. Como resultado, se obtuvo varios proyectos con diferentes viabilidades económicas y diferentes porcentajes de ahorro o reducción de las pérdidas totales para el distrito hidráulico seleccionado. Cabe resaltar que el presente estudio es una metodología aplicable para la adecuada disposición de recursos económicos y está orientada a la reducción de pérdidas de agua en empresas prestadoras del servicio de acueducto.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Director: M. Sc. Luis Fernando Castañeda Galvis.

Abstract

Title: Development of an operational management model to reduce technical and commercial losses in water distribution systems. Case study: a hydraulic district in the water distribution system of the city of Bucaramanga*.

Author: Abner Alexey Rincón Suarez**

Keywords: Water loss reduction, Non-revenue water, NRW, hydraulic sectorization pressure management, infrastructure management.

Description:

Controlling non-revenue water is a major challenge for the operational management of water utilities since it negatively impacts their economy and the environmental conditions of their intake water sources. Therefore, for these companies to become profitable and environmentally sustainable, it becomes crucial to create and implement methods that reduce non-revenue water. Based on this premise, this thesis was developed an operational management model to reduce water losses and it was applied to the drinking water distribution system of the Acueducto Metropolitano de Bucaramanga. Said model started with an analysis of hotspots of pipe breaks records to classify and select a hydraulic district. Subsequently, the following five (5) consecutive phases was developed: I) specification of the input volume and estimate non-revenue water, II) reduction of authorized, not-registered, not-measured volumes by establishing criteria to quantify and estimate said volumes, III) reduction of commercial losses due to submetering, IV) reduction of technical losses due to leakage and V) estimation of benefit /cost ratios of the resulting projects. As a result, several projects with different economic viabilities and different percentages of savings or reduction of total losses were obtained for the selected hydraulic district. It should be noted that the methodology proposed in this study may be applied to allocate appropriately economic resources and it is aimed at reducing water losses in water utilities.

* Research thesis

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Maestría en Recursos Hídricos y Saneamiento Ambiental. Director: M. Sc. Luis Fernando Castañeda Galvis.

Introducción

Si el volumen mundial de pérdidas de agua se redujera sólo en un tercio, los ahorros serían suficientes para abastecer a 800 millones de personas (asumiendo un consumo de 150 L/hab*día) (Liemberger & Wyatt, 2019).

El control de las pérdidas de agua o también llamada agua no contabilizada o agua no facturada, es entonces un claro reto y una labor relevante de los prestadores del servicio de acueducto.

Es un desafío bien entendido y conocido por la mayoría de las empresas de servicios públicos, pero pocas tienen éxito en reducirla a un nivel financieramente viable y manteniéndola baja (Pedersen & Klee, 2013). Todo técnico o profesional involucrado en la reducción del agua no contabilizada entiende las labores que hay que realizar para reducirla: sustituir y aumentar el parque de medidores, reducir fraudes y conexiones clandestinas, gestionar eficientemente bases de datos de clientes, buscar y reparar fugas, renovar redes y reducir la presión para reducir las fugas, entre muchas otras labores. Sin embargo, la reducción de pérdidas de manera óptima técnica y económicamente es lo que no parece ser el común denominador en los países no desarrollados. Gran parte del fracaso se debe a la complejidad de la gestión de las pérdidas, junto con una falta de comprensión de los beneficios potenciales (Pedersen & Klee, 2013).

La reducción del agua no contabilizada contiene y hace parte a la vez de políticas de uso racional del agua. En Colombia, la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA), ente regulador del sector, en su Resolución 688 de 2014 ha establecido los siguientes incentivos hacia el uso racional del agua:

1. Establecimiento del rango de consumo básico.

2. Reconocimiento de un nivel máximo de pérdidas de agua en el sistema a través de las tarifas.
3. Incentivos a la micromedición como derecho y deber de los usuarios y de los prestadores.

Vía tarifaria, se ha reconocido un nivel máximo de pérdidas aceptadas por el ente regulador correspondiente a un índice de agua no contabilizada (IANC) del 30%. Este nivel de pérdidas, establecido en la Resolución CRA N° 17 de 1995 (Comisión de Regulación de Agua y Saneamiento Básico, 1995) y hoy contenido en la Resolución CRA N° 151 de 2001 (Comisión de Regulación de Agua y Saneamiento Básico, 2001), constituye la meta actualmente vigente para las empresas prestadoras del servicio en Colombia. Dicho valor máximo de pérdidas establecido por el ente regulador es:

- a. Un valor agregado que no establece una desagregación entre pérdidas técnicas y pérdidas comerciales porque, entre otras razones, pocas empresas prestadoras cuentan con esta información desagregada para el caso colombiano.
- b. Una señal regulatoria de eficiencia, que implica que las pérdidas mayores a este porcentaje no son reconocidas en la tarifa y por tanto no son trasladadas al usuario.

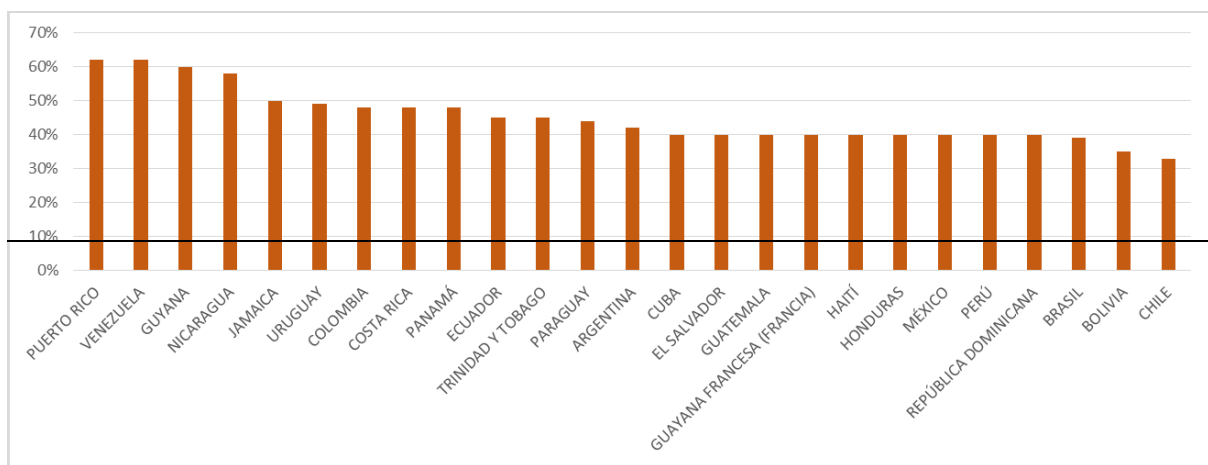
El último punto merece especial atención, ya que significa que la diferencia entre el nivel de pérdidas de agua de un prestador y el tope del 30% debe ser asumido por la empresa de acueducto, afectando las condiciones financieras del negocio.

En cuanto a los niveles de pérdidas en Colombia, el Informe de actualización de indicadores del sector de servicio de agua potable y alcantarillado y saneamiento básico realizado por la Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y Comunicaciones -ANDESCO- (2012), para el año 2012 reveló un IANC promedio nacional del 64% para el período 2003 –

2010 en 87 empresas prestadoras del servicio. Recientemente, Díaz (2019) expone que para el 2017 Colombia tuvo un nivel de pérdidas del 43,6% y que el 76 % de los departamentos del país contaban con niveles de pérdidas por encima de lo máximo permitido. En el contexto latinoamericano, Liemberger & Wyatt (2019) analizan las pérdidas de agua no contabilizada, en donde Puerto Rico se encuentra en primer lugar con aproximadamente el 60 % de pérdidas. En el caso de Colombia, el país se encuentra en el séptimo lugar con un porcentaje del 48% de pérdidas de agua, tal y como se puede ver en la Figura 1.

Figura 1

Agua no contabilizada en Latinoamérica.



Nota: Adaptado de Liemberger, R. & Wyatt, A. (2019).

En concordancia con la importancia demostrada de los planes de reducción de pérdidas, el ente Regulador en Colombia (CRA) establece en su Resolución 688 de 2014 la “Guía para la implementación de planes de reducción de pérdidas de agua en sistemas de acueducto”, la cual constituye un norte para su adopción por parte de las empresas prestadoras del servicio. Dicha guía acoge las directrices establecidas por el grupo de trabajo en pérdidas de agua de la Asociación Internacional del Agua (IWA, por sus siglas en inglés) en el año 2003, como por

ejemplo los cuatro métodos principales de intervención para combatir las pérdidas técnicas (Pilcher, 2003). A pesar de su corta extensión, dicha guía contempla muchos de los aspectos relacionados con la reducción del agua no contabilizada y constituye un buen documento base para la elaboración de planes de reducción de pérdidas en Colombia.

Adicionalmente, la Resolución CRA 688 de 2014 define y establece el llamado POIR (Plan de obras e Inversiones Regulado). El POIR es el conjunto de proyectos que la persona prestadora considera necesario llevar a cabo para disminuir las diferencias frente a los estándares del servicio exigidos durante el período de análisis en el área de prestación del servicio (APS) de cada uno de los municipios que atiende. Asimismo, la Resolución deja claro que los proyectos que permitan alcanzar las metas del programa de pérdidas deben hacer parte del POIR.

Finalmente, la citada resolución establece además que los planes de reducción de pérdidas deben ser de mínimo costo y que, para ello, las personas prestadoras, a partir de las condiciones iniciales de su sistema, definirán la ruta de mínimo costo para obtener las metas anuales de reducción de pérdidas, hasta alcanzar el nivel de pérdidas máximo aceptado por el ente regulador (CRA).

De lo descrito anteriormente se tienen varios aspectos claros:

1. El control de las pérdidas de agua es un claro reto y una labor relevante de los prestadores del servicio de acueducto.
2. Las empresas prestadoras del servicio de agua potable en Colombia, así como en gran parte de Latino América, presentan un nivel de pérdidas alto.
3. Como toda inversión, las inversiones en reducción de pérdidas deben hacerse de manera óptima técnica y financieramente.

Reducir las pérdidas de agua es entonces una cuestión que se debe trabajar de manera inteligente en lugar de hacerlo de manera desorganizada. De esta manera, se plantea un modelo que sea un aporte inteligente a la reducción de pérdidas mediante acciones que apunten hacia las imprecisiones de medidores y hacia las fugas en la red, que son los componentes frecuentemente más representativos de las pérdidas. Asimismo, se hace uso de diversos campos del conocimiento y la ingeniería (Sistemas de información geográfica, estadística espacial, análisis estadístico multivariado, probabilidad, optimización multiobjetivo, modelamiento hidráulico, principalmente) con el fin de obtener soluciones con relaciones beneficio/costo atractivas para las empresas, pues serán éstas últimas finalmente los factores de decisión de la implementación o no del presente modelo de reducción de pérdidas desarrollado.

El modelo inicia con la priorización de atención a los distritos con base a la ocurrencia de daños y a través de un análisis de puntos calientes de los registros de daños en tuberías del área de prestación del servicio atendida por la empresa. La finalidad de esta etapa preliminar es la priorización y selección de aquel(los) distrito(s) hidráulico(s) que será(n) objeto de la reducción de sus pérdidas. Posteriormente a la selección del distrito, se desarrollan cinco (5) fases consecutivas las cuales son: I) precisión del volumen de entrada y estimación del IANC, II) reducción de los volúmenes autorizados, no-facturados y no-medidos mediante el establecimiento de criterios para cuantificación y estimación de dichos volúmenes, III) reducción de pérdidas comerciales por submedición, IV) reducción de pérdidas técnicas por fugas y V) estimación de las relaciones beneficio / costo de los proyectos resultantes, donde el modelo propuesto finalmente muestra su viabilidad.

Para la aplicación del modelo anteriormente descrito se elige el sistema de acueducto de la ciudad de Bucaramanga, principalmente por la accesibilidad a los datos necesarios para la

aplicación del modelo como: catastro de suscriptores, catastro de medidores, abundante registro de daños de toda el área de prestación del servicio, catastro del sistema de acueducto, sistema de acueducto sectorizado, modelo hidráulico calibrado de los sectores y distritos hidráulicos del sistema.

Los datos anteriores definen el alcance de aplicación del modelo a aquellas empresas que dispongan de ellos. No obstante, la Resolución 330 de 2017 y el título B del Reglamento Técnico para el sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS) comprenden los anteriores requisitos, los cuales son exigencias en dichos documentos y no insumos “exorbitantes” que no puedan ser alcanzados. Además, cuanta más información y datos estén disponibles, más fácil será priorizar las inversiones, reducir las pérdidas y asegurar un rápido retorno de la inversión (Pedersen & Klee, 2013).

El presente documento está conformado por seis (6) capítulos: el capítulo uno (0) corresponde a los objetivos planteados de la tesis, el capítulo dos (0) contiene el marco referencial, el cual se divide en el marco conceptual y estado del arte, en donde se consigna la revisión bibliográfica y conceptos importantes para el desarrollo del proyecto; el capítulo tres (0) corresponde a la metodología del proyecto, la cual muestra brevemente las acciones para el desarrollo del documento; el capítulo (0) comprende los resultados y la discusión del desarrollo del proyecto y finalmente en los capítulos cinco (0) y seis (0) se presentan las conclusiones y recomendaciones procedentes del desarrollo de la tesis.

Objetivos

1.1 Objetivo General

Desarrollar un modelo de gestión operacional para la reducción de pérdidas técnicas y comerciales con el fin de contribuir en la planeación y diseño de programas de reducción de pérdidas en general en un distrito hidráulico del acueducto de la ciudad de Bucaramanga.

1.2 Objetivos Específicos

- Seleccionar un distrito hidráulico a partir de una jerarquización o clasificación, mediante un análisis de puntos calientes con base en el registro de daños del área de estudio y desarrollar una caracterización del distrito.
- Estimar el índice de agua no contabilizada y establecer criterios para la estimación de consumos no medidos, prácticas para cuantificar estos consumos y criterios de instalación de medidores para dichos consumos.
- Definir las variables que mejor influyen en la submedición y desarrollar un análisis estadístico multivariado de micromedidores existentes con el fin de estimar prioridades de reposición y con ello reducir las pérdidas comerciales por submedición.
- Proponer y aplicar un algoritmo de reposición preventivo – predictivo de tuberías basado en técnicas estadísticas y de análisis de confiabilidad hidráulica y uniformidad de presiones, que estime prioridades de reposición, con el fin de reducir las pérdidas técnicas por fugas en el distrito hidráulico seleccionado.
- Estimar relaciones beneficio / costo de cada uno de los proyectos resultantes.

Marco Referencial

1.3 Marco conceptual

1.3.1 Las pérdidas de agua y su reducción

Lo que comúnmente se conoce como pérdidas de agua corresponde al agua no contabilizada (ANC), agua no facturada (ANF) o agua no registrada. La Asociación Internacional de Agua (IWA, por sus siglas en inglés), entidad que, entre otras cosas, estandariza conceptos y procesos en sistemas de abastecimiento de agua, define el agua no facturada (ANF) como el volumen que permanece no facturado y por lo tanto no genera ningún ingreso para la empresa de agua (Lambert & Hirner, 2000). Se puede expresar como la diferencia de volumen de ingreso al sistema de almacenamiento y distribución, con el consumo autorizado facturado o como la suma de consumo autorizado no facturado y las pérdidas de agua.

Con el fin de entender todos los elementos que contribuyen al agua no facturada, la IWA propone un modelo de balance hídrico como herramienta estratégica para la generación de estadísticas, categorización, cuantificación de los tipos de pérdidas de agua y obtención de un panorama completo del costo que representa los niveles de agua no contabilizada. Este modelo de balance ligeramente modificado se muestra en la Tabla 1, el cual también ha sido adoptado por el ente regulador del sector en Colombia (CRA), (Comisión de regulación de agua y saneamiento básico, 2014).

Tabla 1

Terminología estándar para el balance hídrico de acuerdo con la IWA

		Agua facturada exportada			Agua Facturada	
Consumo autorizado Qa	Consumo autorizado facturado Qaf	Consumo medido	facturado			
		Consumo medido	facturado	no		
Volumen de entrada al sistema Qi		Consumo no facturado medido			Agua no facturada	
		Consumo autorizado no facturado Qanf	Consumo no facturado no medido			
			Consumo no autorizado			
	Pérdidas aparentes Qpa	Inexactitudes de los medidores y errores de manejo de datos				
	Pérdidas de agua Qp	Fugas en las tuberías de aducción, conducción y distribución				
	Pérdidas reales Qpr	Fugas y reboses en tanques de almacenamiento				
		Fugas en conexiones de servicio hasta el punto del medidor del cliente				

Nota: Adaptado de Lambert, A. O. Y Hirner, W. (2000). Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. International Water Association (p. 5).

El balance hídrico de la Tabla 1 constituye una herramienta para la evaluación de la pérdida y se centra en la clasificación de las pérdidas de agua. En correspondencia, el balance hídrico es el primer paso para combatir la pérdida de agua, pues en cuanto mayor sea la incertidumbre existente sobre el consumo real de agua, más difícil será combatir la pérdida de agua (Kampstrup, 2018).

Es necesario aclarar que el agua no registrada no se elimina nunca, debido a la existencia de los consumos autorizados no facturados que no pueden eliminarse de ninguna manera. Por esta razón siempre existirán pérdidas en los sistemas de acueducto. Además, existe un umbral inferior natural para el nivel mínimo alcanzable de pérdida de agua, que resulta rentable

económicamente (Kampstrup, 2018). Para acercarse lo máximo posible a ese umbral, es necesaria la priorización del trabajo dedicado a la prevención de la pérdida (Kampstrup, 2018)

En el balance hídrico anterior se identifican tres (3) grandes componentes del agua no facturada, los cuales a su vez derivan o se dividen en 7 componentes más específicos:

1. El consumo autorizado no facturado, el cual se divide en el consumo medido y el consumo no medido.
2. Las pérdidas aparentes o comerciales, las cuales se dividen en consumos no autorizados (comúnmente conocidos como fraudes) y los errores de medición, bien sea por defectos en los aparatos de medición o por errores en el manejo de la información de datos de lecturas.
3. Las pérdidas reales o técnicas, las cuales se dividen en fugas en las tuberías desde los tanques de almacenamiento hasta las redes menores del sistema, fugas y reboses en los tanques del almacenamiento, y fugas existentes desde los puntos de conexión (acometidas) hasta el medidor del suscriptor.

El consumo autorizado no-facturado no-medido es el agua utilizada para los servicios de extinción de incendios, los sistemas de riego públicos, para la purga de tuberías, etc., pero que no se mide. A pesar de ser autorizado o aceptado, es importante registrar seguidamente este volumen de agua, de lo contrario, este volumen se incluye como pérdida de agua. Es significativo la elaboración de acuerdos con los servicios locales de extinción de incendios y otros servicios que tengan acceso al agua no facturada autorizada para la realización de una buena estimación de su consumo, y de esta manera se pueden evitar acciones para la reducción de la pérdida de agua que no son necesarias.

El consumo autorizado no-facturado medido es el agua utilizada para los servicios de extinción de incendios, los sistemas de riego públicos, para la purga de tuberías, etc., y que se mide.

El consumo no autorizado hace parte de las pérdidas comerciales y es el volumen de agua que se pierde debido a robos, conexiones ilegales a la red, casos de desconexión del contador, etc. Para combatir estos consumos existen estrategias como la implementación de medidores electrónicos inteligentes, una estrategia de alta tecnología que representa una meta a alcanzar, para la eliminación de la manipulación de los medidores mecánicos tradicionales (Kampstrup, 2018). Existen también estrategias como la implementación de unidades antifraude que se encargan de la búsqueda activa de conexiones ilegales, bien sea a través de labores directas en campo o mediante la implementación de tecnología, como por ejemplo software de modelamiento hidráulico con herramientas para la estimación de consumos no autorizados mediante la comparación de los datos de modelamiento con mediciones de caudal y presión al interior de la red.

Las imprecisiones o errores en la medición corresponden al agua que se pierde debido a una lectura errónea realizada por los operarios, a errores en el manejo de la información de lecturas o a la imprecisión de los contadores. Con respecto a los errores en la medición, la empresa danesa Kamstrup, fabricante líder en medición inteligente para sistemas de suministro de energía y agua, demuestra con base en su experiencia que los contadores mecánicos proporcionan mediciones insuficientes a lo largo de su vida útil, ya que sufren desgaste con el tiempo a la vez que el caudal de inicio va en ascenso (Kamstrup, 2018). Las pérdidas por inexactitud del medidor son frecuentemente la pérdida más común y representativa de las pérdidas comerciales o aparentes (Fallis, Hübschen, et al, 2011).

Las fugas en la red de conducción y de distribución son el agua que se pierde en las partes de la red de distribución con un estado inadecuado debido al deterioro o mala condición de las tuberías, accesorios y elementos de control, presión de funcionamiento excesiva y a los saltos de presión. Una forma eficiente de calcular la pérdida derivada de las fugas consiste en analizar el consumo nocturno. El análisis del consumo nocturno en sectores donde predomine el uso residencial del suelo, cubre el consumo de agua del sistema durante las horas de menor demanda, y en consecuencia puede considerarse que proviene de fugas. Las fugas en la red son el mayor componente de las pérdidas técnicas o reales (Lambert, Trow, et al, 2015). Y a su vez las fugas imperceptibles son el mayor componente de las fugas en la red con un 90% estimado (Kampstrup, 2018).

Las fugas y reboses en los tanques de almacenamiento son pérdidas de agua causadas por controles de nivel deficientes o dañados, filtración de las paredes de concreto o de la construcción que no son herméticas (Fallis, Hübschen, et al, 2011). A menudo se subestiman las pérdidas de agua desde tanques y aunque son fáciles de detectar, la reparación a menudo es complicada y costosa.

Las fugas en las conexiones de servicios hasta los puntos de medición de los suscriptores suelen producirse antes de facturar la medición, por lo que se incluyen en el cálculo de pérdida de agua. Las conexiones de servicios son reconocidas como los puntos débiles de las redes de suministro de agua porque sus uniones y accesorios exhiben tasas de falla altas (Fallis, Hübschen, et al, 2011). Estas fugas son difíciles de detectar debido a sus tasas de flujo comparativamente bajas y por lo tanto tienen tiempos de fuga largos. Además, es más difícil detectar las fugas en esta parte de la red de distribución, ya que el prestador suele tener acceso limitado a la conexión del servicio y al contador, que normalmente está ubicado dentro de los

hogares. La reparación de las fugas también puede suponer un desafío, ya que el propio consumidor debe pagar la reparación y el proveedor de agua debe documentar la pérdida de agua (Kampstrup, 2018).

Respecto de la magnitud global de las pérdidas, según datos de la IWA para el año 2015, a nivel global el nivel de agua no registrada se encuentra entre el 25 y 50% y en países emergentes se ha observado un 75% en promedio (International Water Association, 2018). Así mismo, datos del Banco Mundial estiman para América Latina un promedio de agua no registrada del 45% (Banco Mundial, 2018). Por otro lado, estudios del IWA afirman que para el balance de agua en sistemas de distribución más del 65% del agua no contabilizada proviene de fugas y errores de medición (Open International, 2017).

Por todo lo anterior, el presente modelo de gestión propuesto centra su objetivo en la reducción de las pérdidas técnicas por fugas (a través de la gestión de la infraestructura y la presión) y en la reducción de la submedición (a través de la reposición de medidores) por ser estos dos usualmente los componentes de mayor aporte del agua no facturada. Además, se busca cuantificar de mejor manera el valor del agua no contabilizada a través de la implementación de protocolos de mantenimiento y/o reposición de macro medidores, mejorar las estimaciones de consumos no medidos y estimular la instalación priorizada de medidores para aquellos consumos no medidos. Con esto último se busca desestimular la mala práctica de no medir los consumos, bien sea facturados y no facturados.

Una estrategia fundamental para el control y reducción de las pérdidas, y que además es requisito para la aplicación del presente modelo de reducción de pérdidas; es la sectorización hidráulica. La sectorización hidráulica y la adecuada medición comprende el primer paso para el desarrollo de planes para la reducción de perdidas (Morrison, Tooms, & Hall, 2007). El título B

de RAS define a la sectorización hidráulica como la división del área total de una red de distribución, en zonas de estudio que permiten determinar diferencias en los factores de pérdidas de manera más detallada, y tomar acciones operativas. Es la división de una red de distribución en dos o más sectores hidráulicos, en la que cada sector con puntos definidos de alimentación o entrada de agua, opera independientemente, garantizando la prestación óptima del servicio a los usuarios comprendidos dentro de cada sector. Los llamados sectores son denominados también Distritos. Si en cada una de las entradas y salidas de un sector o distrito hidráulico se mide el flujo, se habla de un sector o distrito hidrométrico.

Son múltiples las ventajas de la sectorización: mejor control de pérdidas (con todo lo que esto significa), mejor control de presiones, racionalizar el servicio, reducir el área de inspección para la detección de anomalías, y hasta prever la concesión de la operación del sector a otra empresa prestadora, por ejemplo. De otro lado, la desventaja más importante de la sectorización es la pérdida de redundancia de rutas por las que el fluido pueda llegar al usuario, ya que la llegada del fluido al sector queda limitada por uno o unos pocos puntos de alimentación. Además, sectorizar una red conlleva, en términos generales, una fuerte inversión inicial. No obstante, una sectorización bien concebida y diseñada debe prever estas desventajas, por ejemplo, que los sectores estén preparados para poderse alimentar desde otras entradas alternativas que en condiciones normales permanezcan cerradas.

1.3.2 Hidráulica de las fugas

Como se menciona anteriormente, las fugas en un sistema de distribución se traducen en pérdidas reales del mismo y comprenden un porcentaje relevante en las pérdidas totales de agua.

La expresión general del caudal de fugas se establece de la siguiente manera:

$$Q_f = C_d A \sqrt{2gH} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde Q_f es el caudal de fuga, A es el área del orificio, C_d es el coeficiente de descarga (adimensional), g la aceleración de la gravedad y H es la altura piezométrica que ejerce sobre el orificio.

En la actualidad, dicha expresión se transforma en una expresión que agrupa los parámetros C_d , A y $(2g)^{0.5}$ en un coeficiente C , resultando así la siguiente expresión.

$$Q_f = CH^\alpha \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde Q_f es el caudal de fuga, C coeficiente de fuga, H presión y α exponente de fuga.

Fallis, Hübschen, et al. (2011) afirman que el caudal de fugas es altamente sensible a la presión. Paralelamente el exponente de fuga α resulta en el parámetro de mayor influencia en el caudal de fugas gracias a su asignación como exponente de la expresión, presentando valores desde 0.5 a 2.79 (Thornton & Lambert, 2005).

1.3.3 Análisis Estadístico Bayesiano

La teoría de conjuntos sirve como base para el trazado de los axiomas para la teoría de probabilidades. El teorema de Bayes se basa en la propiedad conmutativa de la intersección de conjuntos. Su importancia radica en que vincula la probabilidad de A dado B con la probabilidad de B dado A. Es decir, sabiendo la probabilidad de que una tubería (con registro de daño) tenga cierto material, es posible conocer (con datos adicionales) la probabilidad de daño de la tubería, debido a su presencia en determinado material.

Con base en los registros de daños en las redes de distribución de agua, resulta viable entonces la construcción de un modelo de predicción apoyado en el mismo principio, el cual establece una probabilidad de daño a una tubería, dado que la tubería tiene ciertas características topológicas específicas (material, diámetro, edad, zona, longitud, etc.).

1.3.3.1 Conceptos en Estadística Bayesiana

Bernardo & Smith (2009) afirman los siguientes conceptos en estadística bayesiana:

Eventos mutuamente excluyentes o disyuntos. Dos o más eventos son mutuamente excluyentes o disyuntos, si no ocurren simultáneamente. O sea, la ocurrencia de un evento impide automáticamente la ocurrencia del otro evento (o eventos). De este modo se dice que A y B son mutuamente excluyentes si y sólo si $A \cap B = \emptyset$

Por ejemplo, en el lanzamiento de un dado, se consideran los eventos A: Sacar un número par y B: Sacar un número impar. Tales eventos son mutuamente excluyentes.

Eventos Independientes. Dos o más eventos son independientes, cuando la ocurrencia o resultado de un evento no tiene efecto sobre (y no es afectado por) la ocurrencia o resultado de otro(s) evento(s).

Por ejemplo, en el lanzamiento de un dado, el resultado no depende de ninguno de los lanzamientos anteriores. Por lo tanto, cada lanzamiento es un evento independiente.

Axiomas de Probabilidad. Denotando $P(X)$ como la probabilidad de ocurrencia del evento X :

1. $0 \leq P(X) \leq 1$ Para cualquier evento X
2. Si A y B son eventos disyuntos, entonces $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$
3. $P(S) = 1$ donde S es el espacio muestral.

Teoremas de Probabilidad.

1. $P(\emptyset) = 0$
2. $P(X) + P(X^c) = 1$

Corolario: $P(A \cup B) + P(A^c \cap B^c) = 1$

3. Sean A y B eventos cualesquiera, entonces $P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B)$

Corolario:

$$P(A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) - P(A_1 \cap A_2) - P(A_1 \cap A_3) - \dots - P(A_1 \cap A_n) - P(A_2 \cap A_3) - P(A_2 \cap A_4) - \dots - P(A_2 \cap A_n) - \dots - P(A_{n-1} \cap A_n) + P(A_1 \cap A_2 \cap A_3) + \dots + P(A_{n-2} \cap A_{n-1} \cap A_n) - P(A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap A_4) - \dots - P(A_{n-3} \cap A_{n-2} \cap A_{n-1} \cap A_n) \dots$$

4. A y B son eventos independientes, si y sólo si $P(A \cap B) = P(A)P(B)$

Probabilidad Condicional. Dados A y B eventos cualesquiera:

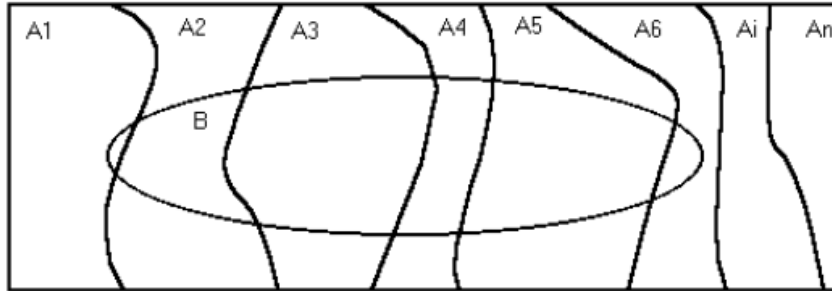
$P(A|B) = P(A \cap B)/P(B)$, donde $P(A|B)$ es la probabilidad de que ocurra A dado que ha ocurrido B

Teorema de Probabilidad Total. Sean eventos mutuamente excluyentes y exhaustivos (conforman una partición del espacio muestral) y B un evento cualquiera del que se conocen las probabilidades condicionales, entonces:

$$P(B) = \sum_{i=1}^n P(B|A_i) P(A_i)$$

Figura 2

Diagrama de Venn, Eventos en la Ley de Probabilidad Total.



Nota: Adaptado de <http://www.uv.es/ceaces/base/probabilidad/total.htm>. Consultado en agosto de 2018.

Teorema de Bayes. Sean $A_1, A_2, \dots, A_n$ eventos mutuamente excluyentes y exhaustivos, (conforman una partición del espacio muestral) y B un evento cualquiera del que se conocen las probabilidades condicionales $P(B|A_i)$, entonces:

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{P(B)} \quad \text{Ecuación 3}$$

1.3.3.2 Formulación del análisis

Kleiner & Rajani (2001) argumentan que la premisa básica del modelo estadístico Bayesiano de la probabilidad de falla en una tubería es posible que se relacione en tres factores:

1. La probabilidad de falla del sistema P_F
2. La probabilidad de observar características específicas c sobre una tubería que presenta un daño $P(c|f)$

3. La probabilidad de observar las mismas características c sobre una tubería que no ha fallado $P(c|nf)$

Estos tres factores se relacionan mediante el Teorema de Bayes como se presenta en la siguiente ecuación:

$$P(fallar | caracter\ especif.) = \frac{P(c|f)P_F}{P(c|f)P_F + P(c|nf)(1 - P_F)} \quad \text{Ecuación 4}$$

1.3.4 La uniformidad de presiones como aspecto importante en la reducción de presiones

El título anterior “Hidráulica de las fugas” deja clara la incidencia de la presión en las fugas: a mayor presión, más fugas y viceversa. Es claro entonces el beneficio que trae la reducción de la presión en las pérdidas de agua. Adicionalmente, Araque & Saldarriaga (2005) demostraron que una de las condiciones importantes para una gestión eficiente de la presión es la uniformidad las presiones del sector o distrito hidráulico.

Para explicar lo anterior, supóngase un sector o distrito hidráulico con 20 nodos de consumo y que entrega el servicio en todos sus nodos a una presión mayor o igual a la mínima requerida, que supóngase sea 10 m.c.a. Ahora, considérese dos estados iniciales de presión de los 20 nodos de dicho sector, y que se muestran en la Figura 3 y Figura 4.

Figura 3

Presión (m.c.a.) vs. nodo - estado 1.

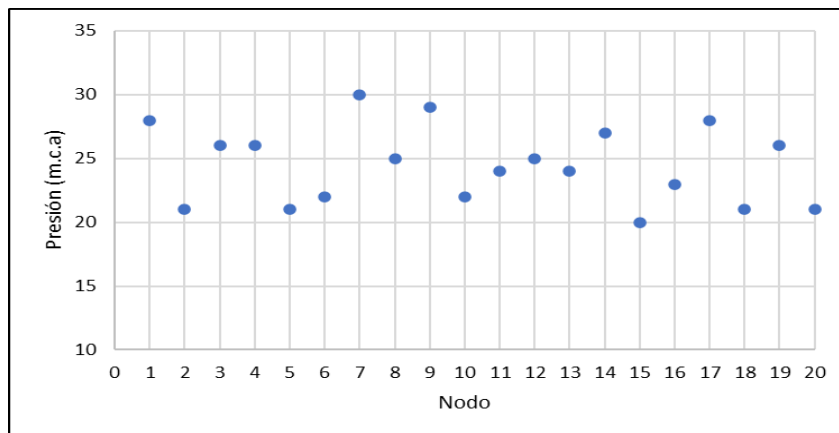
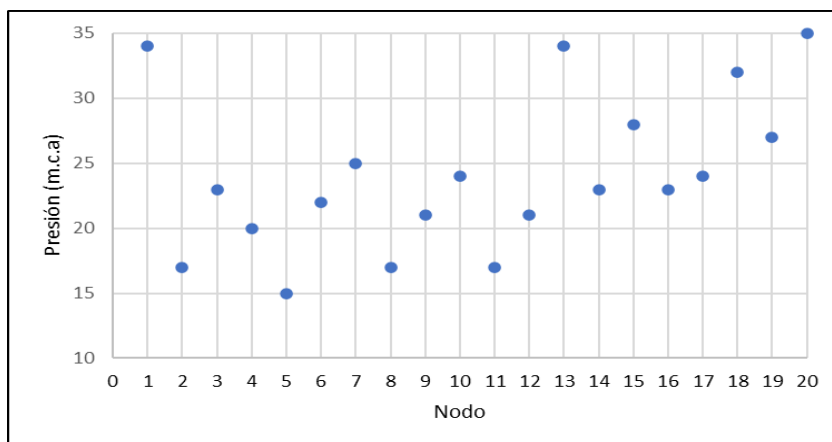


Figura 4

Presión (m.c.a.) vs. nodo - estado 2.



Se cumple que ambos estados operan a la misma presión promedio (24,3 m.c.a), ambos estados satisfacen el requisito de presión mínima (10 m.c.a), y el estado uno (1) presenta presiones más uniformes (o menos dispersas) que el estado dos (2). Entonces, si se planea reducir la presión en la entrada del sector hidráulico, ¿cuál de los dos estados de presión implicaría una mayor reducción de fugas?

La magnitud de la disminución de la presión viene condicionada por el nodo de menor presión y por la presión mínima requerida. El nodo de menor presión en el estado uno (1) tiene 20 m.c.a mientras en el estado dos (2) tiene 15 m.c.a, lo que implica que en el estado uno (1), la presión podría reducirse hasta en 10 m.c.a mientras el estado dos (2) podría reducirse hasta en cinco (5) m.c.a. Con lo anterior y por el hecho de que la reducción de la presión de entrada no altera la dispersión de las presiones dentro del sector, la presión promedio del estado uno (1) llegaría a los 14.3 m.c.a ($24.3 - 10$ de reducción) mientras que para el estado dos (2) llegaría a los 19.3 m.c.a ($24.3 - 5$ de reducción) y de esta manera las fugas serían menores si el estado inicial de presiones fuera el estado uno (1), pues podría operar a una presión promedio menor y ya es sabido que a menor presión promedio, menos fugas.

Lo anterior demuestra que la uniformidad de las presiones aumenta la eficiencia de la reducción de la presión, pues un sector o distrito hidráulico con presiones más uniformes, implica poder realizar una mayor reducción de presión y con ello una mayor reducción de fugas. Dicho de otra forma, un sector o distrito con presiones más uniformes, es un candidato más apto o mejor preparado para la reducción del nivel de presiones.

Con el propósito de maximizar la uniformización de presiones en un sistema, Araque (2006). propone el coeficiente de uniformidad de presiones (CU)

$$CU = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} P_j}{n_n \max(P_j)} = \frac{\bar{P}}{\max(P_j)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde P_j es la presión en el nodo j , n_n el número de nodos y $\bar{P}$ la presión promedio en los nodos. Se puede ver que:

$$\bar{P} \leq \max(P_j) \quad \text{entonces } 0 \leq CU \leq 1$$

Adicionalmente, CU es adimensional.

1.3.5 La confiabilidad hidráulica de una red de distribución

La disminución del nivel de presiones trae muchas ventajas y a la vez trae desventajas. La principal desventaja a priori es la disminución de la confiabilidad hidráulica, pues la disminución de presiones reduce la suficiencia de energía de la red.

La confiabilidad hidráulica es un concepto que ha cobrado gran importancia en los últimos años, principalmente en los problemas de diseño y rehabilitación óptima de redes. Así mismo, es un concepto aún algo disperso sobre el que no hay una definición única, acabada y precisa. Históricamente, la confiabilidad hidráulica y sus indicadores o medidas se han asociado fuertemente a dos aspectos que deben coexistir: redundancia de rutas de la red y suficiencia de energía (redundancia energética). De esta manera, la redundancia de rutas provee caminos alternativos para el fluido y la suficiencia de energía provee la entrega del servicio a una presión adecuada (Torres, 2011). La suficiencia de energía significa tener un superávit de energía en la red disponible para ser disipado durante la ocurrencia de eventos adversos.

En un intento por presentar una definición de confiabilidad hidráulica que reúna diversas interpretaciones que se han dado, bien se podría decir que es la fortaleza de una red para mantener un nivel de servicio adecuado (en términos de disponibilidad de caudal y presión) frente a eventos adversos, como aumentos drásticos de la demanda, rotura o cierre de tuberías, paradas en las bombas, rotura de válvulas, fugas en la red, aumento de la rugosidad de las tuberías, entre otros (Torres, 2011).

El RAS en su edición del año 2014, incluyó el concepto de Confiabilidad de la red de distribución. En su título B (Sistemas de Acueducto), Capítulo 7 (Redes de distribución),

subcapítulo 7.3, establece las condiciones técnicas generales con las que deben contar las redes de distribución. Al respecto incorpora en su numeral 7.3.11 el concepto de Confiabilidad de la red de distribución y menciona:

“Con el fin de aumentar la confiabilidad en la distribución del servicio de acueducto, para los niveles de complejidad del sistema medio alto y alto debe incorporarse en el diseño de redes nuevas de distribución o ampliación a redes existentes el concepto de resiliencia de la red. En general se deben preferir aquellos diseños, que presenten niveles de evaluación socioeconómicas apropiados, sean los que representen redes con resiliencias superiores al 50%. De esta manera, se logran tener redes con respuestas más apropiadas ante eventos de falla de algunas de sus tuberías” (Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2014).

Asociado al hecho de que la confiabilidad hidráulica es un concepto muy general que contempla muchas variables, no existe universalmente una única medida y tampoco se ha establecido un único nivel de confiabilidad que deben alcanzar las redes de distribución. Esto es entendible solo imaginando el alto grado de complejidad matemática y algorítmica de una hipotética formulación que tuviese en cuenta todas las variables.

No obstante, el RAS ha adoptado un indicador para evaluar la confiabilidad de la red llamado índice de resiliencia. El Índice de resiliencia (I_r) de Todini (2000) es una medida que indica el grado de eficiencia energética de la red. Está basado en la noción de que las pérdidas de energía interna incrementarán cuando la demanda incremente o cuando se inhabiliten tuberías, por lo tanto, es deseable que exista un superávit suficiente de energía (redundancia energética) para ser disipada internamente en caso de inhabilitación de tuberías o incrementos de la demanda. De este modo una red con bajas pérdidas internas (red eficiente) es una red que “ahorra” energía y

que tal “ahorro” constituye el superávit de energía mencionado. El índice de resiliencia de Todini (2000) viene dado por la ecuación mostrada a continuación:

$$I_R = \frac{\sum_{j=1}^{n_n} (Q_j + Q_{f,j})(H_j - H_j^*)}{\left[\sum_{i=1}^{n_e} (Q_e H_e)_i + \sum_{k=1}^{n_{pu}} \frac{P_k}{\gamma} \right] - \sum_{j=1}^{n_n} (Q_j + Q_{f,j}) H_j^*} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde: Q_e y H_e son el caudal y la altura piezométrica suministrada por el embalse (tanque) i respectivamente, n_e es el número de embalses, γ el peso específico del agua, P_k es la potencia suministrada por la bomba k, n_{pu} es el número de bombas en la red. La potencia que suministra una bomba k en términos de caudal y cabeza piezométrica dada es $P_k = \gamma h_k Q_k$, Q_j es el caudal entregado al nodo j, H_j^* la altura piezométrica mínima permitida para el nodo j, H_j la altura piezométrica real de entrega en el nodo j y $Q_{f,j}$ es el caudal de fuga en el nodo j (Todini, 2000).

1.3.6 Función objetivo

La utilización de una función objetivo se desarrolla para la calificación de qué tan optima resulta una determinada tarea. Dicha implementación también se conoce como optimización multi objetivo. En la actualidad existen múltiples métodos para funciones objetivo y aunque no existe una respuesta contundente a que método es mejor, es recomendable el uso de métodos que facilitan las condiciones para hallar soluciones (Marler & Arora, 2004). Uno de dichos métodos es el Método de la suma ponderada exponencial de Athan & Papalambros (1996), la cual adicionalmente comprende una combinación de los parámetros u objetivos que se desean. Dicho método resulta simple, eficaz y sencillo de programar, cuya expresión es:

$$FO = \sum_{i=1}^Z (e^{pw_i} - 1) e^{pf_i(x)} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde FO es la función objetivo ponderada, Z es el número de objetivos, f_i corresponde a la función objetivo i , w_i es el factor de peso o importancia del objetivo i entre los demás y p es un parámetro propio del método. De manera adicional y por conveniencia es necesario que se cumpla que

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad w_i \geq 0 \quad w_1 = w_2 = 0.5 \quad \text{Ecuación 8}$$

$w_i \geq 0$ Es decir que, si se tienen dos funciones objetivo f_1 y f_2 a analizar f_1 y f_2 , se les asigna $w_1 = w_2 = 0.5$, traduce que ambos objetivos tienen la misma relevancia, o en su defecto si $w_1 = 0.7$ entonces es $w_2 = 0.3$, lo que traduce que f_1 recibe un peso más alto que f_2 .

Con base en lo anteriormente expuesto, se tiene entonces para el presente trabajo de grado que la función objetivo a maximizar es:

$$FO = (e^{pw_1} - 1)e^{pI_r} + (e^{pw_2} - 1)e^{pCU} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde I_r corresponde al índice de resiliencia de la red, CU el coeficiente de uniformidad de presiones, w_1 el peso o importancia que se va a maximizar I_r , w_2 el peso o importancia que se da a maximizar CU , cumpliendo que $w_1 + w_2 = 1$ y $w_{1,2} \geq 0$ p es el parámetro del método.

1.3.7 Desempeño financiero en proyectos de reducción de pérdidas de agua

Partiendo de las estimaciones del agua no facturada, Fallis, Hübschen, et al (2011) afirman que es posible el establecimiento de un sencillo indicador con base en los tres parámetros más relevantes del agua no facturada mediante la siguiente expresión:

$$PA = (Q_{AuNF} + Q_{AP})C_{PV} + Q_{PR}C_P \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde, PA corresponde al valor de las pérdidas anuales (COP), Q_{AuNF} el volumen anual de consumo autorizado no facturado (m^3), Q_{PA} el volumen anual de perdidas aparentes (m^3), Q_{PR} el volumen de perdidas reales (m^3), C_{PV} precio de ventas (COP/ m^3) y C_P costo de producción (COP/ m^3).

Debido a que las pérdidas anuales no son reducibles en su totalidad, el valor del beneficio de reducción de pérdidas siempre es inferior al valor de pérdidas anuales.

1.3.7.1 Costos por renovación de tuberías

Para la renovación de tuberías existen varias funciones de costo las cuales dependen de la longitud y el diámetro de tubería de instalación, cuya expresión es:

$$C_j = K_{\text{costo}} L_j (D_j)^{n_{\text{costo}}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde, C_j corresponde al costo (COP) de la tubería j , L_j y D_j sobre la longitud y el diámetro igualmente de la tubería j . K_{costo} es el coeficiente de costo y n_{costo} es el exponente de costo. Dichos coeficientes se obtienen mediante un análisis de regresión de los valores (D_j , L_j y C_j) los cuales dependen de precios de los tipos de tubería, mano de obra y materiales de construcción del lugar donde se realiza la renovación. Lo que traduce que cada distrito o sector comprende su única ecuación de costo.

1.4 Estado del arte

Para la reducción de las pérdidas de agua se han implementado a lo largo de los años diversas estrategias y, en términos generales, las pérdidas de agua se resuelven con gestión y uso de tecnologías. Estas estrategias o métodos varían desde herramientas gerenciales simples hasta métodos de optimización altamente sofisticados. Sin embargo, su aplicación a sistemas reales de distribución se ha encontrado que es limitada (Mutikanga, Sharma, & Vairavamoorthy, 2013).

Se han establecido directrices generales para la planificación y ejecución de proyectos de reducción de pérdidas. A nivel mundial, por ejemplo, expertos en el ámbito de la reducción de pérdidas han publicado documentos directrices recientes. Una de tales directrices generales es la Guía para la reducción de las pérdidas de agua – Un enfoque en la gestión de la presión, realizado por la Corporación Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ) y la Empresa Alemana VAG Armaturen, por encargo del Ministerio Federal de Cooperación económica y desarrollo (Fallis, et al, 2011). Esta guía se centra sobre la gestión de la presión para reducir las fugas (pérdidas técnicas) bajo la premisa que la gestión de la presión no repara ni una sola fuga, pero puede reducir considerablemente las tasas de flujo de las fugas. Ofrece una visión de muy amplio alcance sobre la pérdida de agua y es enormemente valiosa para los planificadores en lo referente a la gestión estratégica para la reducción de la pérdida de agua.

La guía para la reducción de las pérdidas de agua de GIZ (Fallis, et al, 2011), en su tabla 4.7 mostrada en la Tabla 2 del presente trabajo de grado, reconoce y expone unas medidas claras para combatir el agua no facturada (ANF). Allí se contemplan 24 medidas para la reducción del agua no contabilizada en todas sus formas. Para el caso de la inexactitud de la medición, la guía plantea establecer demografía de la población de medidores, realizarles pruebas regularmente e introducir rotación de estos, así como un programa de mantenimiento. Para el caso de las fugas

se plantea, entre otros, conducir campañas para reparación de roturas, implementar la gestión de la presión (en el corto plazo) y desarrollar una estrategia de rehabilitación (a largo plazo). De igual forma, la mencionada guía, en su capítulo 5 establece los requisitos básicos de datos para la administración de las pérdidas, como un sistema de información geográfico, un catastro de la red, un modelo hidráulico, una base de datos de fallas y un sistema de información sobre los suscriptores.

Tabla 2

Métodos para reducir el ANF

Componente	Medidas de contraataque
Consumo autorizado no facturado	incrementar tasa de cobranza
	reducir consumo autorizado dentro y fuera de la empresa de agua
	observar y reducir número de clientes no facturados
Inexactitudes de la medición	establecer demografía de población de medidores
	hacer pruebas de exactitud de medidores regularmente
	introducir rotación de medidores y programa de mantenimiento
Errores de lectura de medidores y transferencia de datos	analizar registros de facturación buscando patrones de consumo inusuales y lecturas de medidores faltantes
	auditar muestras de cuentas sospechosas
	cambiar de lectura manual a lectura automática de medidores (LAM)
Errores manejo de datos	flujograma del sistema de proceso de facturación
	conducir análisis del proceso de facturación
	introducir uso de sistemas de facturación computarizados
	adoptar la anualización correcta de datos de consumo
	mejorar manejo de cuentas de clientes
Consumo autorizado no	compilar datos demográficos de cuentas de clientes y buscar anomalías en consumo
	conducir inspecciones de medidores que han sido manipulados o evitados y de conexiones ilegales
	reprimir la mala utilización de grifos contra incendios y otras formas de consumo ilegal
	evitar el fraude por lectura de medidores de la empresa de agua
Fuga de estallidos y roturas	usar estructuras prepago
	conducir campaña para reparar acumulación de roturas de tubos reportada/visibles
	reducir número de estallidos y fugas: -implementando gestión de presión (corto plazo)

Componente	Medidas de contraataque
detectables	-desarrollando estrategia de rehabilitación (largo plazo)
	reducir tiempo de ocurrencia de fugas:
	-introduciendo monitoreo continuo de la red
	-mejorando control activo de fugas
	-mejorando rapidez y calidad de reparaciones
Fuga de fondo	implementar gestión de presión
	desarrollar estrategia de rehabilitación de largo plazo

Nota: Adaptado de Fallis, P., Hübschen, K., et al. (2011). Guía para la reducción de las pérdidas de agua - Un enfoque en la gestión de la presión. Corporación alemana para la cooperación internacional (GIZ) GmbH. Tabla 4.7.

En el ámbito nacional, la Comisión de Regulación de Agua y Saneamiento Básico (2014), en su Resolución 688 de 2014 ha publicado una guía para la implementación de planes de reducción de pérdidas. Esta guía, a pesar de ser ínfima en comparación con la guía GIZ, recopila las medidas más relevantes para la reducción de pérdidas de la Guía GIZ. Allí, para las pérdidas comerciales se plantea la reducción de la submedición mediante la optimización de la micro medición, la facturación, el seguimiento y reducción de los consumos no facturados. Para las pérdidas técnicas, se establece el control y optimización de la macro medición, el control activo de fugas, el mejoramiento de la velocidad y calidad en las reparaciones, la instalación y/o renovación de dispositivos y accesorios de medición y control, la sectorización, los sistemas de gestión de presión y la renovación y/o reposición de redes.

Mutikanga, Sharma, & Vairavamoorthy (2013) exponen que para la reducción de pérdidas hay dos componentes principales 1) gestión de fugas y 2) gestión de pérdidas aparentes. La gestión de fugas está comprendida por 4 por cuatro bloques: I) cuantificación de las pérdidas de agua, II) monitoreo de fugas, III) detección de fugas, localización y reparación, y IV) presión de la red y gestión de activos. La gestión de pérdidas aparentes está conformada por 4

componentes: I) precisión en la medición de los clientes, II) error de lectura del medidor, III) manejo de datos y errores de facturación y IV) control del consumo no autorizado.

Fontana & Morais (2016) desarrollan un modelo de decisión para controlar las pérdidas, el cual, en un primer paso, reconoce las alternativas preventivas a implementar para la reducción de pérdidas tales como: uso de equipos para detección de fugas (geófono electrónico, barras acústicas electrónicas, sensores térmicos, inyección de trazadores), educación sobre uso eficiente del agua (campañas publicitarias, campañas educativas en escuelas), control del fraude, sectorización e instalación de válvulas reductoras, implementación y mantenimiento de sistemas de monitoreo continuo en la red (data logger, Tubo de pilot, Sistemas de cámaras termo gráficas, sistemas de automatización), inspección visual de fugas aparentes y reducción de la sub medición (calibración de medidores, implantación y/o reemplazo de medidores). En segundo lugar, se identifican los atributos que deben ser considerados para la evaluación de cada alternativa: Costo total de la implementación de la alternativa, eficiencia de la alternativa en el control de las pérdidas, tiempo necesario para producir el primer resultado efectivo, potencial de reducción de aguas residuales, necesidad de contratar mano de obra calificada para implementar la acción y vida útil de la alternativa.

Posteriormente, se realiza la evaluación de cada alternativa sobre cada atributo y posteriormente se eliminan las alternativas dominadas. En seguida se evalúa la alternativa en todos sus atributos mediante una función objetivo lineal ponderada y finalmente cada alternativa tendrá una calificación. Con esto se establece un listado ordenado de alternativas según su prioridad e implementación.

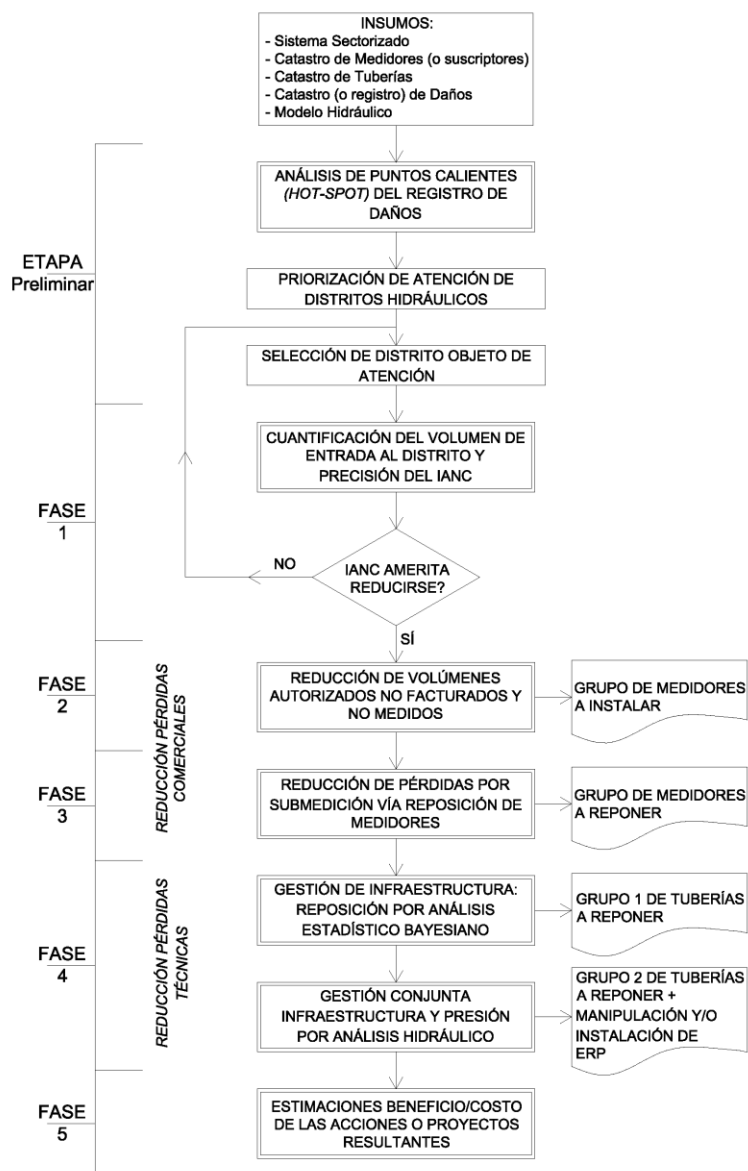
Como ejemplo de aplicación de métodos de control de pérdidas en Colombia, las Empresas Municipales de Cali han emprendido un “Plan de Recuperación de Agua”. Dicho plan se

encuentra estructurado en dos fases, las cuales contienen acciones administrativas y técnicas. Entre estas acciones se encuentran la implementación de la sectorización hidráulica, aseguramiento de la medición, gestión del parque de medidores, atención oportuna de daños, detección y reparación de fugas no visibles, reducción de consumos no medidos, reducción de conexiones fraudulentas, optimización del plano de presiones y reposición de tramos con alto nivel de fugas (EMCALI, 2017).

Metodología

Figura 5

Diagrama de Flujo de la metodología desarrollada para el modelo de gestión de pérdidas propuesto.



Para la aplicación del presente modelo de gestión de pérdidas propuesto, se desarrolló una metodología que puede visualizarse fácilmente en la figura anterior. Como punto de partida es necesaria la existencia de ciertos insumos como lo son el catastro de medidores (o suscriptores), el registro (o catastro) de daños, el catastro del sistema de redes, y el(los) modelo(s) hidráulico(s) de las redes. Además, se requiere que el sistema a analizar se encuentre sectorizado.

Ante el anterior paquete de exigencias, la aplicación del modelo de gestión parece estar bastante limitada, y ciertamente es así puesto que la realidad muestra que estos datos sólo están disponibles completamente en las empresas prestadoras de las grandes ciudades, más no para Municipios y Ciudades intermedias o pequeñas. No obstante, el modelo de gestión precisamente se ha desarrollado bajo la premisa que, cuanta más información y datos estén disponibles, más fácil será priorizar las inversiones, reducir las pérdidas y asegurar un rápido retorno de la inversión (Pedersen, J. B., & Klee, P. 2013). Además, dichos datos finalmente son requisitos exigidos en la vigente Resolución 330 de 2017 y en el título B del RAS, como la exigencia de referenciar todos los componentes (Art. 41), contar con un catastro actualizado de redes (Art. 42), contar con modelo hidráulico (Art. 57), tener el sistema sectorizado (Art. 58), tener registro de los daños (RAS B.6.11.4), por ejemplo.

Con la existencia de dichos insumos se da inicio a la metodología propiamente dicha. La misma, consta de una etapa preliminar, donde se realiza un análisis estadístico espacial de los daños, se prioriza y selecciona el distrito hidráulico objeto de atención. Posteriormente inicia una primera fase donde se precisa el valor de las pérdidas (IANC) del distrito anteriormente seleccionado y se decide si el distrito amerita que sus pérdidas sean reducidas o no. Una vez decidido que el distrito seleccionado amerita reducción de sus pérdidas, se da paso a una

segunda y tercera fase donde se direcciona hacia reducción de las pérdidas comerciales. En la segunda fase se propone la medición de aquellos volúmenes autorizados no facturados no medidos que se presentan en el distrito. En la tercera fase, luego de un análisis estadístico multivariado del parque de medidores, se propone un proyecto de reposición de un conjunto de medidores. En una cuarta fase se procede con la reducción de las pérdidas técnicas del mismo distrito seleccionado. Allí se propone un proyecto de renovación de un grupo de tuberías (gestión de la infraestructura) luego de realizar un análisis estadístico bayesiano de las tuberías del distrito. Así mismo se propone un proyecto de renovación de otro grupo de tuberías (gestión de la infraestructura) así como un proyecto de instalación y/o manipulación de estaciones reguladoras de presión (ERP), luego de un análisis de uniformidad de presiones y confiabilidad hidráulica de la red, haciendo uso del modelo hidráulico. Finalmente, en una quinta y última fase se procede con la estimación de los costos y beneficios de los proyectos resultantes.

1.5 Etapa Preliminar: Selección del distrito hidráulico objeto de atención

La selección del distrito hidráulico objeto de atención se desarrolló mediante un análisis de estadística espacial, a partir de los registros de daños y servicios del área de prestación de servicio en formato (*.shp).

El análisis de estadística espacial se desarrolló mediante el estadístico G_i^* de Getis & Ord (1995) o análisis de puntos calientes en ArcGIS 10.3, el cual se utilizó para la determinación de la correlación espacial local de los daños en el área de estudio (área de prestación de servicio) mediante un valor para cada objeto geográfico (distrito hidráulico). Una vez finaliza esta etapa preliminar se obtiene una calificación para cada distrito en función de la cual se prioriza la atención de cada uno.

1.6 Fase 1: Precisión del volumen de entrada y estimación del IANC

Para el distrito objeto de atención, se realiza en seguida la cuantificación del volumen de entrada al distrito con el fin de precisar el valor de sus pérdidas y decidir cualitativamente si amerita o no reducirse su valor. La medición de los volúmenes de entrada en el sistema es una de las labores de mayor relevancia para llevar a cabo planes para la reducción de las pérdidas de agua. Pues, antes de cualquier medida para la reducción del agua no contabilizada, es necesario el conocimiento de dicho volumen de la manera más precisa posible. Adicionalmente, se entiende que, a menor número de macro y micromedidores instalados en el sistema, más bajo será el nivel de precisión del balance hídrico.

Por lo tanto, para una adecuada cuantificación del volumen del agua no contabilizada, se desarrolló un protocolo preventivo para reposición y/o adecuación de macromedidores para la estimación de volúmenes de entrada y un protocolo para la instalación de medidores en sitios del sistema que contengan consumos autorizados no facturados, no medidos.

El presente trabajo de grado se apoyó en las labores realizadas por el amb S.A E.S.P para la preservación de la hermeticidad de sus distritos hidráulicos y las mediciones de caudal de volumen de entrada al sistema que corresponden a los procedimientos que se explican en el Anexo 2-2

1.6.1 Estimación del IANC

Se entiende como índice de agua no contabilizada (IANC) un indicador que refleja la eficiencia de la prestación de servicio en el sistema de acueducto. Dicho índice corresponde de al porcentaje del volumen de entrada al sistema que no es medido ni facturado para un determinado intervalo de tiempo (comúnmente un año) y se estimó mediante la siguiente expresión:

$$IANC (\%) = \frac{\text{Volumen producido} - \text{Volumen facturado}}{\text{Volumen producido}} 100 \quad \text{Ecuación 12}$$

Calculado el IANC del distrito, se procede finalmente a decidir cualitativamente si las pérdidas del distrito ameritan reducirse o no. Si bien en esencia la decisión se toma de manera cualitativa, se debe tener en cuenta aspectos como los siguientes.

1. Tamaño del distrito
2. Valor del IANC del distrito respecto al mínimo reglamentario
3. Valor del IANC del distrito respecto al valor del IANC de toda el área de prestación de servicio.

En términos generales, un distrito de gran tamaño con un valor de pérdidas por encima del mínimo reglamentario y por encima del promedio en el área de prestación; amerita reducirse, pues su impacto en la reducción de las pérdidas totales del área de prestación es mayor.

1.7 Fase 2: Reducción volúmenes autorizados no facturados y no medidos

El presente trabajo de grado hace referencia a los consumos autorizados no facturados, no medidos que están comprendidos por fuentes de agua, parques y puntos de abastecimiento de bomberos.

La proyección de instalación de medidores en estos puntos se llevó a cabo en parques o fuentes con ausencia de medidores y en determinados hidrantes para el abastecimiento de carros de bomberos, estratégicamente seleccionados en el distrito hidráulico (Amplitud de la vía para el abastecimiento, cercanía a distritos colindantes y tanques de almacenamiento).

1.8 Fase 3: Reducción de pérdidas comerciales por submedición

Debido a que la inexactitud en la medición de los micromedidores corresponde a la pérdida aparente más frecuente y representativa en sistemas de acueducto (Fallis, Hübschen, et al, 2011), se determinaron los medidores que necesitan reemplazarse a partir de un análisis estadístico multivariado, esto con el fin de reducir la submedición en el componente de pérdidas aparentes.

Para el desarrollo de dicho análisis se llevó a cabo la caracterización de los micromedidores comprendidos en el distrito de estudio y se indagó en la confiabilidad de las lecturas con respecto a ciertas variables del medidor (estrato socioeconómico, uso, consumo, lectura acumulada, edad y marca), con el propósito de establecer la relevancia de cada uno para la reposición del medidor.

Posteriormente a la caracterización del parque de medidores del distrito en estudio, se elaboró el análisis estadístico multivariado, el cual calificó los medidores y generó un listado o clasificación, de acuerdo con su prioridad de reemplazo.

1.8.1 Consumo esperado por vivienda

En la realización del análisis del consumo esperado por vivienda, se utilizaron los datos de la Resolución 0330 de 2017 y del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE) para la estimación del valor. La Resolución 0330 en su artículo 43 indica que la dotación neta máxima para zonas cuya altura promedio sobre el nivel del mar es menor de 1000 m.s.n.m corresponde a 140 litros / hab*día (Ministerio de vivienda, ciudad y territorio, 2017).

$$\text{Dotación bruta} = \frac{\text{Dotación neta}}{(1 - \%pérdidas)} \quad \text{Ecuación 13}$$

1.8.2 Metodología de análisis de decisión multicriterio

Para la aplicación del análisis de decisión multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés), el autor se basó en la Técnica simple de calificación de múltiples atributos (SMART) de Risawandi & Rahim (2016), para la asignación de una ponderación a cada variable independiente y así indicar su contribución relativa a una única variable criterio. Esta última se basó en la fórmula matemática de SMART y para el presente proyecto se llamó índice de reposición (IR), cuyo valor permitió la priorización de la reposición de los medidores y se define como se muestra a continuación:

$$IR = \sum_{i=0}^n (W_i)(u_i) \quad \text{Ecuación 14}$$

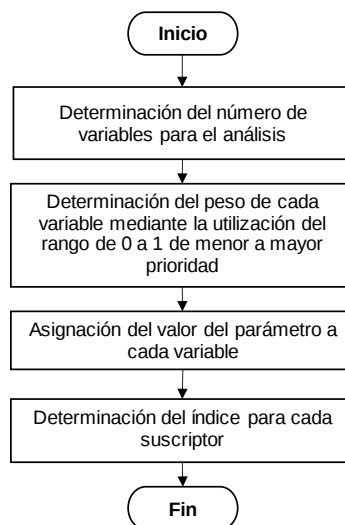
Donde,

W_j es el peso de la variable j y u_i : es el valor del parámetro i dentro de la variable j .

El modelo SMART utiliza una escala de 0 a 1, donde 1 es el mayor valor que obtiene el individuo (suscriptor). Por lo tanto, se asignó la prioridad de reposición al suscriptor con el mayor IR, mientras que aquel con un valor de cero se le asignó la menor prioridad.

Figura 6

Metodología de ponderación de variables.



Nota: Adaptado de Risawandi & Rahim, R. (2016). Study of the Simple Multi-Attribute Rating Technique for Decision Support. International Journal of Scientific Research in Science and Technology, vol. 2

1.9 Fase 4: Reducción de pérdidas técnicas por fugas

Para la reducción de las pérdidas técnicas por fugas se implementó la gestión de la presión e infraestructura. Para tal fin, se aplicó un análisis estadístico bayesiano sobre las tuberías del distrito hidráulico seleccionado, alimentado con los registros de daños utilizados para el análisis de estadística espacial. Este análisis predijo las probabilidades de daño de cada tubería según las características encontradas en la misma (diámetro, edad, material y longitud). Con base en estas probabilidades, se determinó un primer conjunto de tuberías objetivo de reposición.

Posteriormente, se incorporó un análisis con base en la gestión de la presión, que priorizó la renovación de aquellas tuberías que optimizan la uniformidad de la presión y la confiabilidad hidráulica del sistema a partir del modelo hidráulico del distrito definido.

Finalmente, se priorizó la renovación mediante la intersección de los dos conjuntos de tuberías existente en dichos conjuntos.

1.10 Fase 5: Estimación de relaciones beneficio / costo

Finalmente, con el propósito de evaluar el modelo de gestión propuesto, se realizó una estimación de costos y beneficios derivados de la implementación de los proyectos resultantes de la aplicación de las anteriores etapas. Dichos proyectos consistieron principalmente en la instalación de medidores y reposición de tuberías. Con esto, se estimaron los beneficios económicos mediante la aplicación de las expresiones expuestas en el capítulo 1.3.7.

Para el caso de la estimación del beneficio de los proyectos resultantes de reposición de medidores, se desarrolló mediante la diferencia del volumen anual de cada suscriptor del plan de reposición y volumen promedio anual según su tipo de uso.

Resultados y Discusión

1.11 Selección del distrito hidráulico

La selección del distrito hidráulico se desarrolló mediante el análisis de estadística espacial aplicando el estadístico G_i^* de Getis & Ord (1995) o análisis de puntos calientes.

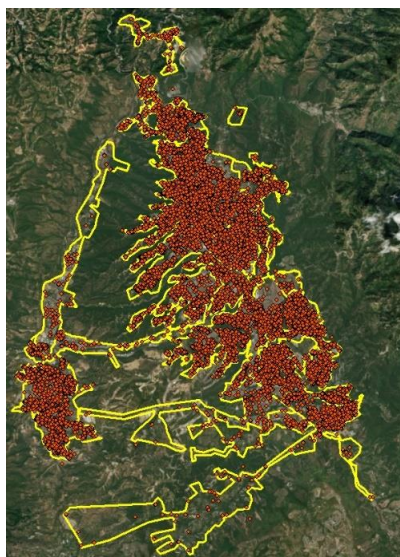
1.11.1 Insumos

Para el desarrollo del análisis de puntos calientes tal y como se mencionó en el numeral 1.5, se utilizó el registro de daños y servicios del amb S.A. E.S.P. desde enero de 2014 hasta septiembre de 2018 (Figura 7).

Debido a que la información de los registros de daños y servicios para los años de estudio presentó diferentes formatos y estructura de almacenamiento, fue necesaria la unificación de los datos a partir de los atributos mínimos requeridos para dicho análisis.

Figura 7

Shapefile de daños 2014-2018 del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A E.S.P.



1.11.1.1 Definición de atributos mínimos

Para la inclusión de los registros de daños en la base de datos geográfica para el desarrollo del análisis de autocorrelación espacial y estadístico Bayesiano, fue necesaria la determinación de los atributos mínimos de los registros de daños, los cuales incluyeron:

1. Ubicación espacial del daño: coordenadas (x, y) del daño en el sistema de referencia local (Magna Colombia Bucaramanga Santander).
2. Tipo de daño o resultado: descripción del tipo de daño reportado por el usuario.
3. Fecha del daño: día, mes y año del reporte del daño.

1.11.1.2 Unificación de atributos

Una vez se establecieron los atributos mínimos para el análisis, se procedió a la consolidación de la información existente en un único formato de archivo. En este caso el formato shapefile (*.shp) de ESRI fue el utilizado para configurar los campos correspondientes a la información de interés.

Con el propósito de que se permitiera la agrupación de los daños en categorías de daños más generales, las cuales son necesarias para el análisis, se creó un campo adicional en la base de datos denominado como “CATEGORIA”. Adicionalmente, se conservó información adicional presente que sirviera de apoyo para futuros análisis.

Los atributos de la base de datos para el análisis son los que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Configuración de los atributos en la base de datos

CAMPO	TIPO
MUNICIPIO	TEXTO
ORDEN	ENTERO LARGO
DIRECCION	TEXTO
BARRIO	TEXTO
RESULTADO	TEXTO
FECHA SOLICITUD	FECHA
USUARIOS AFECTADOS	ENTERO CORTO
X	DOBLE
Y	DOBLE
CATEGORIA	TEXTO

Como resultado de dicho proceso, se consolidó y estructuró la información de 18430 reportes de daños.

1.11.1.3 Agrupación de las tipologías de daño

Los registros de los daños para el análisis se encontraron con múltiples tipologías, de las cuales algunas presentaron imprecisiones semánticas en su definición. Con base en lo anterior, se desarrolló una agrupación en categorías de daño a partir del tipo de red afectada (red principal y domiciliaria) y el tipo de daño o anomalía reportada.

En la Tabla 4 se muestran las categorías de daños conformadas y los tipos de daños y servicios originales que se incluyeron.

Tabla 4

Agrupación de tipos de daños y servicios en categorías para fines del análisis

CATEGORÍA DE DAÑO Y TIPOS DE DAÑOS INCLUIDOS	# DAÑOS REPORTADOS	CATEGORÍA DE DAÑO Y TIPOS DE DAÑOS INCLUIDOS	# DAÑOS REPORTADOS
TUBO ROTO ACOMETIDA	4547	SIN AGUA ACOMETIDA	217
PERFORACION-ACOMETIDA	8	SIN AGUA-ACOMETIDA	217
REPARAR ACOMETIDA ESTALLADA	1069	TAPONAR ACOMETIDA	208
REPARAR ACOMETIDA OCASIONADA	257	TAPONAR ACOMETIDA	81
TUBO ROTO ANTES DEL MEDIDOR	1	TAPONAR-ACOMETIDA	127
TUBO ROTO ESTALLADO-ACOMETIDA	2739	DAÑO INTERNO	145
TUBO ROTO OCASIOND-DOMICILIARI	473	DAÑO INTERNO	145
TUBO ROTO RED	4478	TAPONAR RED	56
REPARAR RED ESTALLADA	2058	TAPONAR RED	29
REPARAR RED OCASIONADA	347	TAPONAR-RED	27
TUBO ROTO DAÑOS	1	ANOMALIAS PRESION ACOMETIDA	53
TUBO ROTO ESTALLADO-RED	1816	POCA PRESION-ACOMETIDA	53
TUBO ROTO-OCASIONADO-MATRIZ	256	ESCAPE EN ELEMENTO RED	41
AJUSTE SECTORIZACION Y REGISTROS	3516	ESCAPE EN HIDRANTE-RED	4
AJUSTAR SECTORIZACION HIDRAULICA	1	ESCAPE EN VALVULA-RED	37
CAMBIAR REGISTRO	1150	REFORMAR ACOMETIDA	40
CAMBIAR REGISTRO-ACOMETIDA	2361	REFORMAR ACOMETIDA	5
MARCACION DE LA RED	4	REFORMAR INSTALACION-ACOMETIDA	35
ANULADO/NO VERIFICADO	869	REUBICAR MEDIDOR-ACOMETIDA	38
ANULADO	2	REUBICAR MEDIDOR-ACOMETIDA	36
ATENDIDO-EJECUTADO	245	SACAR MEDIDOR A LA CALLE-ACOME	2
NO SE ENCONTRO DAÑO	212	REUBICACIÓN RED	36
NO SE ENCONTRO DIRECCION	1	DESVIAR TUBERIA-RED	15
NO SE PUDO REVISAR	12	PROFUNDIZAR RED-RED	5
PREDIO ABANDONADO	1	PROLONGAR RED	10
SERVICIO NORMAL	309	REUBICAR RED	6
USUARIO NO AUTORIZA	2	ANOMALIAS PRESION RED	36
VISITA DE EMPALMES	1	POCA PRESION-RED	13
YA ESTABA ARREGLADO	84	PRESION FUERA DE RANGO	23
REEMPLAZO ACOMETIDA	670	INSTALAR ELEMENTOS RED	34
CAMBIAR ACOMETIDA	187	INSTALAR HIDRANTE	5
CAMBIAR TUBERIA-ACOMETIDA	483	INSTALAR TAPA DE MEDIDOR	2
EMPALMAR RED	592	INSTALAR TAPA DE VALVULA	1
EMPALMAR RED	472	INSTALAR TAPA PARA VALVULA-RED	9
EMPALME-RED	120	INSTALAR VALVULA RED	4
ESCAPE EN ACOMETIDA	561	INSTALAR VALVULA-RED	9
ESCAPE REGISTRO-ACOMETIDA	561	PLANCHON INSTALADO	1
REEMPLAZO O ARREGLO ACCESORIO RED	510	TAPA INSTALADA	3
ARREGLAR CAJA VALVULA RED	6	REUBICAR ACOMETIDA	26
CAMBIAR ACOPLES	10	RELOCALIZAR INSTALACION-ACOMET	12
CAMBIAR ADAPTADOR	69	REUBICAR ACOMETIDA	14
CAMBIAR COLLARIN	63	DESTAPAR MEDIDOR	23
CAMBIAR EMPAQUES	141	DESTAPAR MEDIDOR	23
CAMBIAR HIDRANTE	2	DESTAPAR EN EL MATRIZ	20
CAMBIAR HIDRANTE-RED	18	DESTAPAR EN EL MATRIZ	20
CAMBIAR NIPLES	180	DESUDIO/PROFUNDIZACIÓN ACOMETIDA	15
CAMBIAR VASO PARA VALVULA-RED	2	PROFUNDIZAR-ACOMETIDA	15
CAMBIAR VENTOSA	1	REQUIERE REVISION/MONITOREO	14
CAMBIAR VENTOSA-RED	1	ABRIR VALVULA RED	5
CERRAR VALVULA RED	1	DETECTAR FUGA CON GEOFONO	6
REPARAR ESCAPE HIDRANTE	2	REVISIÓN ELECTROMECÁNICA	2

CATEGORÍA DE DAÑO Y TIPOS DE DAÑOS INCLUIDOS	# DAÑOS REPORTADOS	CATEGORÍA DE DAÑO Y TIPOS DE DAÑOS INCLUIDOS	# DAÑOS REPORTADOS
REPARAR ESCAPE VALVULA	13	REGULADORA	
RETIRAR HIDRANTE	1	TOMAR MUESTRA DE AGUA	1
MEDIDOR DAÑADO O AUSENTE ACOMETIDA	484	SIN AGUA RED	10
MEDIDOR ESTALLADO-ACOMETIDA	15	SIN AGUA-RED	10
MEDIDOR ROBADO-ACOMETIDA	286	INSTALAR ELEMENTOS ACOMETIDA	9
REPARAR ACOMETIDA POR MEDIDOR ROBADO	183	INSTALAR ACOMETIDA	6
REEMPLAZO TUBERÍA RED	455	INSTALAR TAPA-ACOMETIDA	1
CAMBIAR RED	204	INSTALAR MEDIDOR-ACOMETIDA	2
CAMBIAR TUBERIA-RED	251	MEDIDOR DAÑADO O AUSENTE RED	9
REEMPLAZO O ARREGLO ACCESORIO ACOMETIDA	383	MEDIDOR ESTALLADO	9
ADAPTADOR ROTO-ACOMETIDA	4	TUBERÍA TAPADA RED	4
ARREGLAR CAJA ACOMETIDA	6	TUBERIA TAPADA-RED	4
CAMBIAR ACOPLE-ACOMETIDA	8	TUBERÍA TAPADA ACOMETIDA	3
CAMBIAR NIPLES-ACOMETIDA	365	TUBERIA TAPADA-ACOMETIDA	3
CAMBIAR VALVULA - RED	326	DESAIRAR RED	1
CAMBIAR VALVULA - RED	245	MANTENIMIENTO VÁLVULA	1
CAMBIAR VALVULA-RED	81		
TOTAL, REPORTE			18430

Nota: Para el fin del análisis por daños, se excluyeron los grupos “Anulado/No verificado” y “Ajuste sectorización y registros” los cuales no corresponden en sí, a daños del sistema de acueducto.

1.11.2 Daños significativos y patrón espacial de los mismos

1.11.2.1 Determinación de los tipos de daños significativos

Con base en las categorías de daños creadas en el capítulo 1.11.1.3, se construyó un histograma de frecuencia de ocurrencia de cada tipo de daño, el cual se utilizó para la determinación de las categorías de daños de mayor relevancia, que correspondieron al objeto de estudio (Figura 8). Para tal fin, se organizaron las categorías de daño en orden decreciente de frecuencia (Tabla 5) y se seleccionaron aquellas cuya frecuencia acumulada fue igual o mayor al 70%.

Figura 8

Histograma de frecuencias para los daños registrados en el periodo 2014 – 2018.

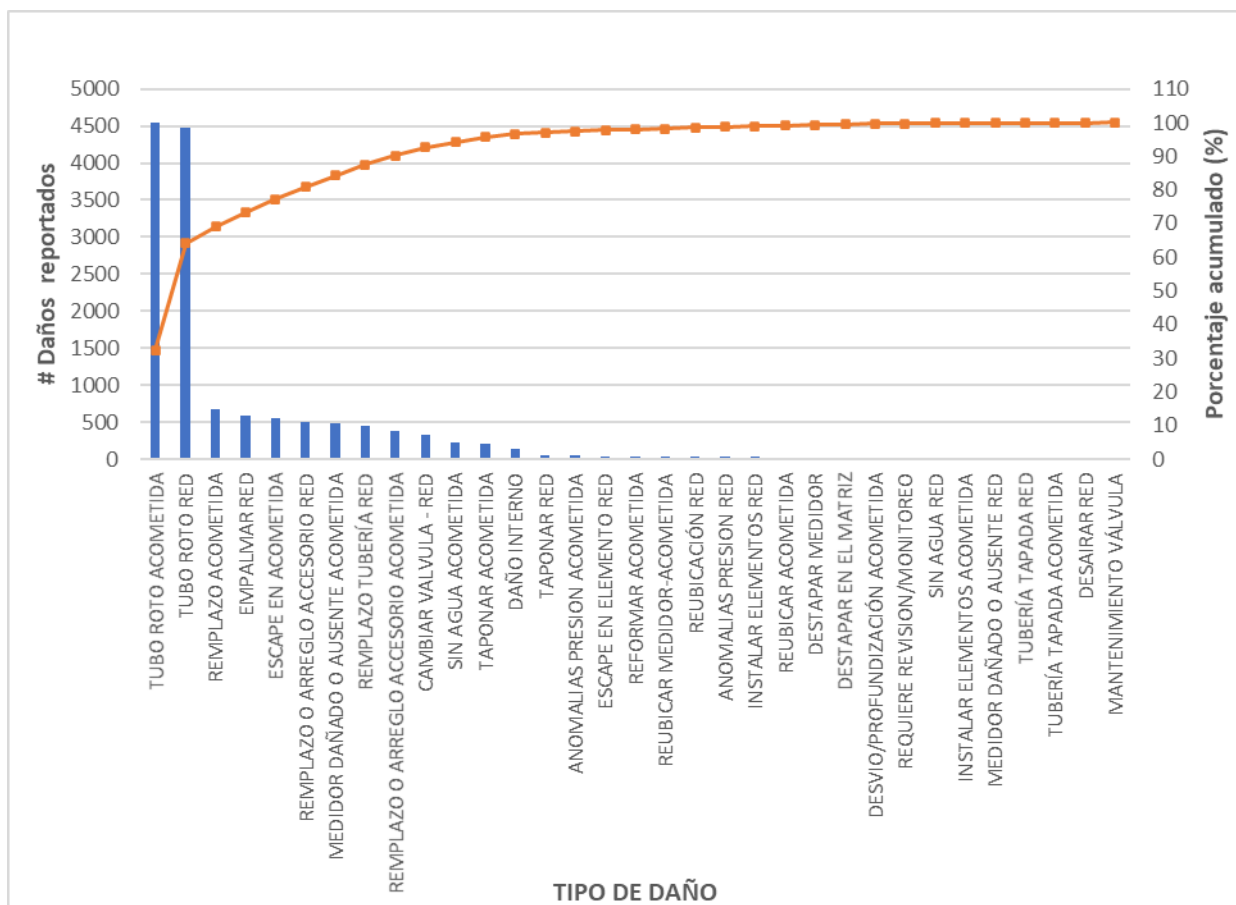


Tabla 5

Categorías de daños seleccionadas para el periodo 2014-2018

DAÑOS REGISTRADOS	# DAÑOS	% ACUMULADO
TUBO ROTO ACOMETIDA	4547	32.37
TUBO ROTO RED	4478	64.26
REEMPLAZO ACOMETIDA	670	69.03
EMPALMAR RED	592	73.24

1.11.3 Análisis del patrón espacial de los daños

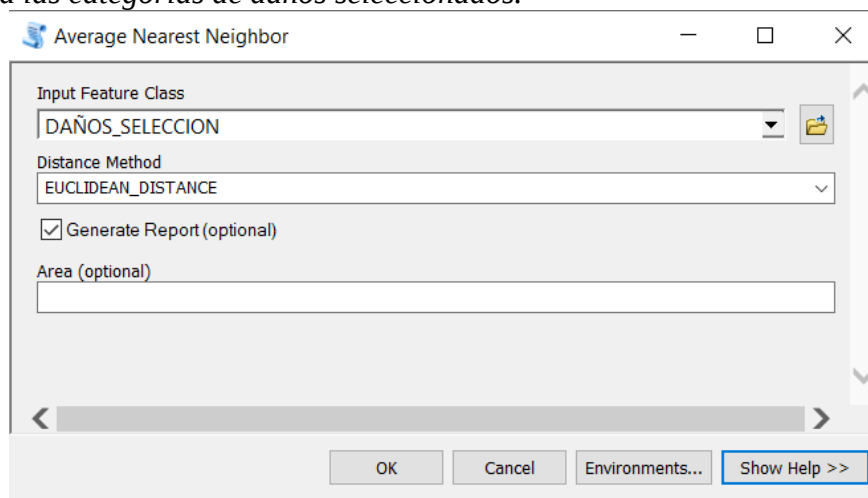
Como se menciona en el Anexo 1-1, el análisis del patrón espacial de los daños se desarrolló para la determinación de si las entidades presentan o no un agrupamiento mediante el índice de la distancia promedio del vecino más cercano.

El índice de la distancia promedio del vecino más cercano se interpretó de la siguiente manera (Figura 9):

- Si el índice es menor que uno (1), el patrón de las entidades presenta un agrupamiento (clustering).
- Si el índice es mayor que uno (1), el patrón de las entidades presenta una dispersión.

Figura 9

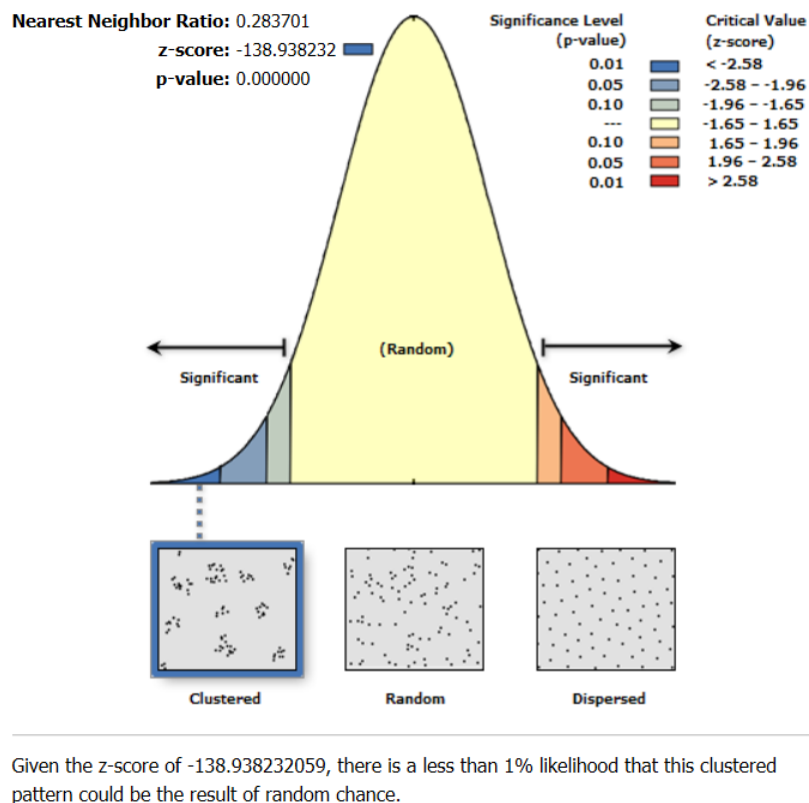
Análisis de proximidad de datos mediante la herramienta “Promedio del vecino más cercano” de ArcGIS, para las categorías de daños seleccionados.



Por lo tanto, se tiene entonces para los datos del proyecto los siguientes resultados (ver Figura 10):

Figura 10

Resultados del análisis estadístico del promedio de vecino más cercano en ArcGIS para los daños clasificados.



De acuerdo con los resultados obtenidos, para los registros de daños seleccionados existe una probabilidad inferior al 1% de que la agrupación espacial de los reportes de daños se deba al azar, lo que equivale a un nivel de confianza del 99% de que los datos presenten una agrupación (cluster).

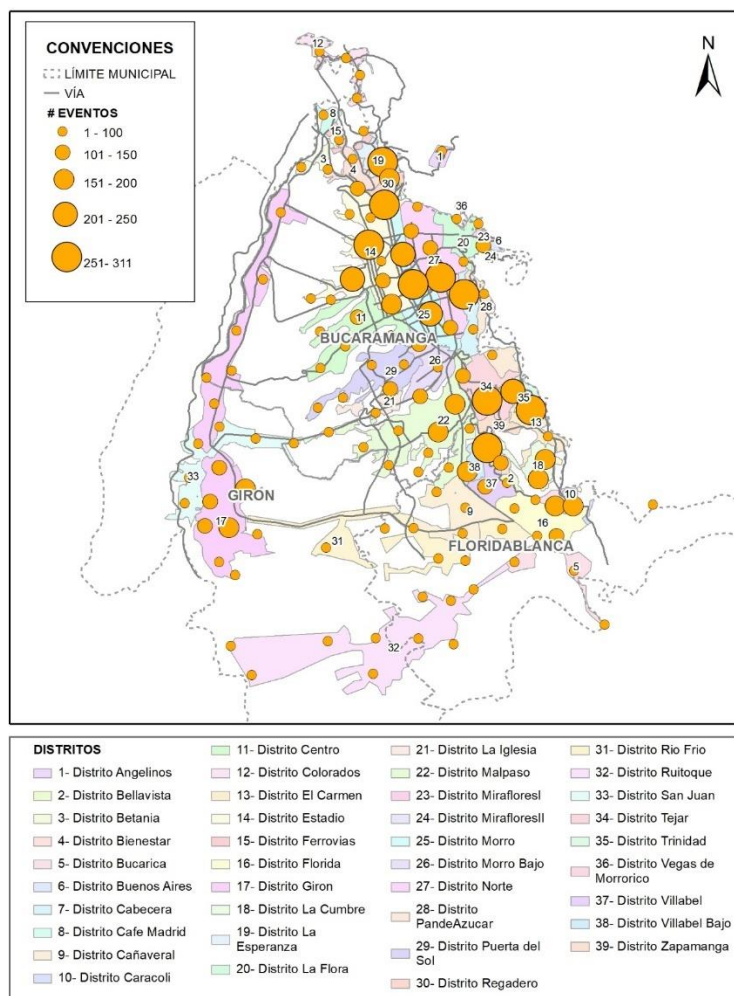
1.11.4 Clasificación de distritos hidráulicos mediante la prueba de autocorrelación espacial G_i^* (análisis de puntos calientes)

1.11.4.1 Agrupamiento (clustering) de los datos

Para la prueba de autocorrelación espacial G_i^* es necesaria la agrupación de los datos (daños); para este propósito se requieren puntos ponderados en vez de eventos individuales. Por tal motivo se desarrolló una integración de los datos a partir de la herramienta Integrate de ArcGIS, la cual permite la unificación espacial de las entidades ubicadas en un límite de tolerancia dado (distancia x, y) de 300m, lo cual permitió la obtención de un total de 126 agrupaciones. Finalmente, se utilizó la herramienta Collect events de ArcGIS para convertir los datos integrados o coincidentes desde el punto de vista espacial en entidades de puntos ponderados en un shapefile de puntos, el cual comprende todos los eventos (daños) comprendidos en cada ubicación particular (ver Figura 11).

Figura 11

Agrupamiento (clustering) de daños para registros comprendidos entre los años 2014-2018.



1.11.4.2 Cálculo de distancia de banda

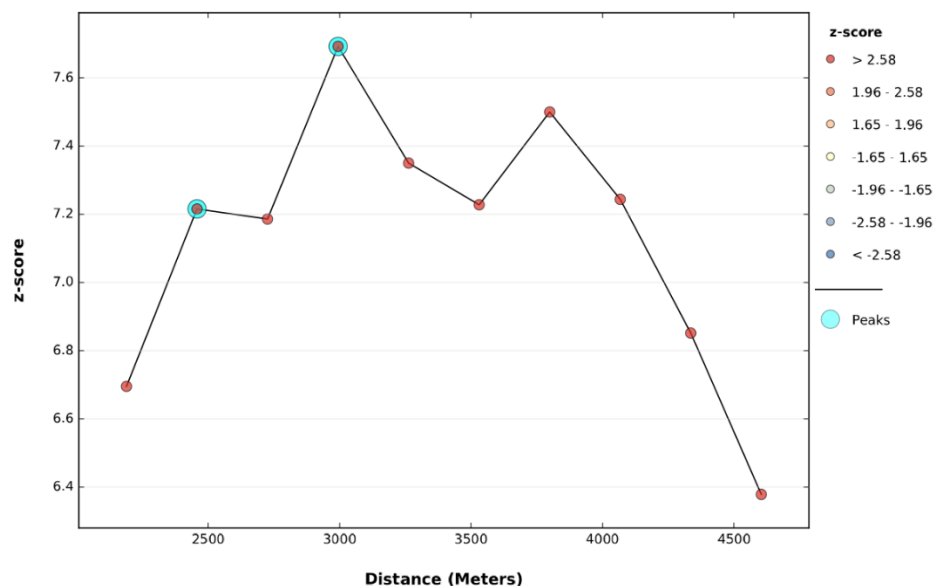
Para los análisis espaciales, la definición de la escala de trabajo es una variable relevante para la interpretación de los resultados. En el análisis de puntos calientes dicha escala se define mediante la distancia de banda, la cual determina una puntuación (z) (ESRI, 2018). Es bien sabido que el valor de la puntuación (z) determina si el patrón espacial de las entidades es

aleatorio o no y que entre mayor sea su magnitud, menos aleatorias son las entidades en análisis (Mitchell, 2005). lo cual refleja el nivel de autocorrelación espacial para las entidades en análisis. En este caso se analizó como varia la significatividad (z) de la correlación espacial entre los clusters de daños, es decir los reportes de daños previamente agrupados, para diferentes distancias de banda, y se tomó el valor que permite la obtención de la mayor correlación espacial.

Para la determinación de la distancia de banda se empleó la herramienta Incremental spatial autocorrelation de ArcGIS. Dicha herramienta muestra los valores de puntuación (z) para diferentes distancias, lo cual refleja el nivel de autocorrelación espacial para los daños agrupados (clusters) en análisis (ESRI, 2018). (ver Figura 12).

Figura 12

Distancia de banda de las entidades para el análisis de puntos calientes.



Debido a que las distancias de banda apropiadas para el análisis de puntos calientes son aquellas que corresponden los picos de la gráfica (ver Figura 12) de correlación espacial por

distancia, se escogió la distancia de 2993.96 m, cuya puntuación (z) es 7.69 y es el pico máximo de dicha grafica.

1.11.4.3 Prueba de autocorrelación espacial G_i^* (Análisis de puntos calientes)

A partir de los clusters de los daños creados, se identificaron los puntos calientes y puntos fríos mediante la herramienta Hot Spot Analysis de ArcGIS, la cual se basa en el algoritmo G_i^* de Getis y Ord (1995). Esta herramienta determina los clusters espaciales significativos estadísticamente ya sea de valores ($Z G_i^*$) altos (puntos calientes) o valores ($Z G_i^*$) bajos (puntos fríos). Dicha entidad de salida comprende un valor ($Z G_i^*$) (que corresponde a una puntuación (z)), un valor de probabilidad (p) y un bin de nivel de confianza (G_Bin) para las entidades de entrada (Mitchell, 2005).

Orientándose a una mejor visualización de los resultados del análisis de puntos calientes, se desarrolló un archivo ráster mediante la interpolación IDW (no determinístico) de dichos resultados (ver

Figura 13).

En términos cualitativos, los resultados mostraron que los siguientes distritos (ver Tabla 6) presentaron agrupaciones de daños significativamente altos, con un nivel de confianza (G_Bin) igual o superior al 99%.

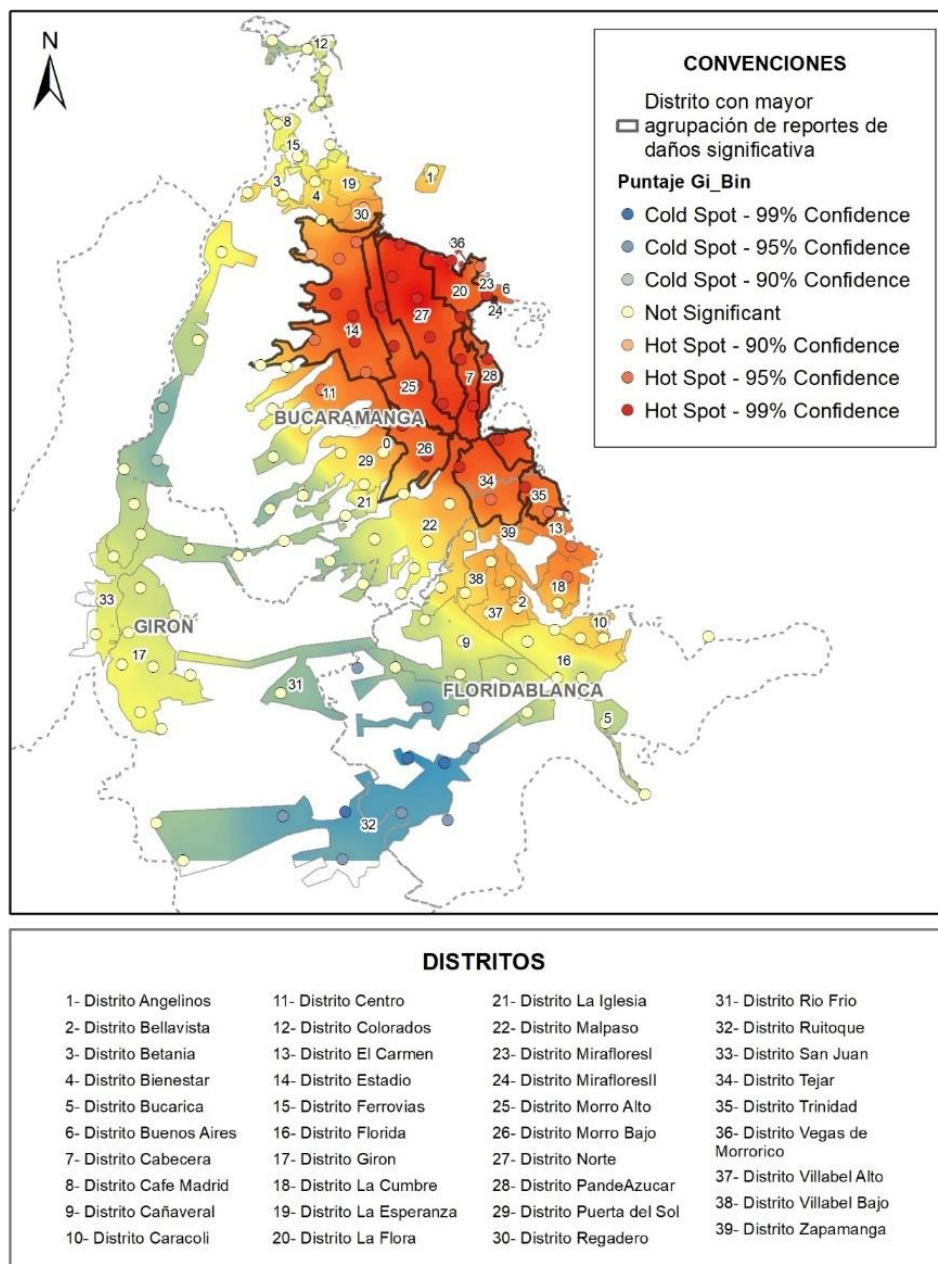
Tabla 6

Distritos con agrupaciones de daños altamente significativos

Distrito Cabecera	Distrito Morro Bajo
Distrito Estadio	Distrito Norte
Distrito La Flora	Distrito Pan de Azúcar
Distrito Miraflores	Distrito Tejar
Distrito Morro Alto	Distrito Trinidad

Figura 13

Resultados de análisis de autocorrelación espacial G_i^ (análisis de puntos calientes).*



1.11.4.4 Clasificación cuantitativa de los distritos hidráulicos

La clasificación de los distritos hidráulicos se desarrolló a partir de los valores (Z_{Gi^*}) promedios del análisis de puntos calientes y el número total de eventos correlacionados.

Para dicho fin, se utilizó la ecuación propuesta por Castañeda (2015) la cual se presenta a continuación:

$$f(\bar{Z}(Gi^*)) = \bar{Z}(Gi^*)r \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

$\bar{Z}(Gi^*)$: Es el valor promedio de la puntuación $Z(Gi^*)$ en el distrito hidráulico

r : Es la relación existente entre el número de eventos correlacionados espacialmente en el distrito y el número de eventos correlacionados totales. Dichos resultados se presentan en la Tabla 7 y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 7

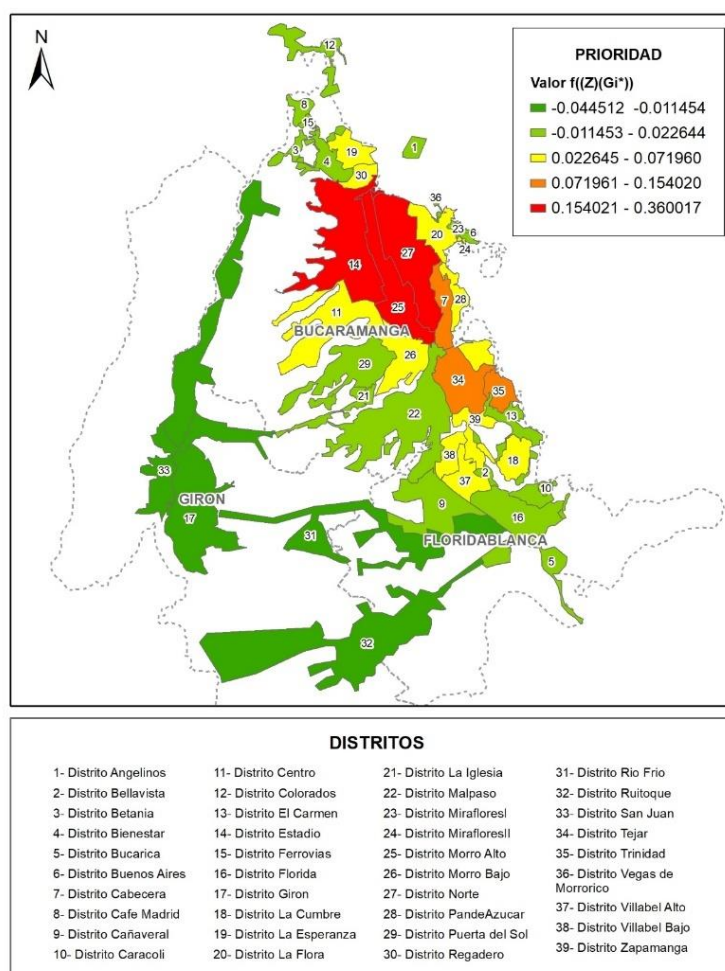
Clasificación de distritos hidráulicos

Distrito	Suma de # Eventos	$\bar{Z}(Gi^*)$	Factor r	$f(\bar{Z}(Gi^*))$	Prioridad
Distrito Morro Alto	981	3.568	0.101	0.360	1
Distrito Estadio	1149	2.718	0.118	0.321	2
Distrito Norte	644	4.171	0.066	0.276	3
Distrito Trinidad	482	3.106	0.050	0.154	4
Distrito Tejar	376	3.312	0.039	0.128	5
Distrito Cabecera	301	3.939	0.031	0.122	6
Distrito La Cumbre	319	2.193	0.033	0.072	7
Distrito Villabel Bajo	440	1.493	0.045	0.068	8
Distrito Morro Bajo	167	3.346	0.017	0.057	9
Distrito La Flora	142	3.199	0.015	0.047	10
Distrito MirafloresII	123	3.289	0.013	0.042	11
Distrito Zapamanga	183	2.096	0.019	0.039	12
Distrito Centro	344	1.104	0.035	0.039	13
Distrito Regadero	169	2.197	0.017	0.038	14
Distrito La Esperanza	311	1.169	0.032	0.037	15
Distrito Villabel Alto	222	1.536	0.023	0.035	16
Distrito Pan de Azucar	74	3.504	0.008	0.027	17
Distrito Malpaso	612	0.360	0.063	0.023	18
Distrito El Carmen	30	2.855	0.003	0.009	19
Distrito Ferrovias	108	0.514	0.011	0.006	20
Distrito Bienestar	56	0.912	0.006	0.005	21
Distrito Angelinos	24	1.288	0.002	0.003	22

Distrito Betania	12	0.977	0.001	0.001	23
Distrito Cafe Madrid	76	0.134	0.008	0.001	24
Distrito Puerta del Sol	261	-0.011	0.027	0.000	25
Distrito Bucarica	342	-0.012	0.035	0.000	26
Distrito Florida	302	-0.040	0.031	-0.001	27
Distrito La Iglesia	24	-1.010	0.002	-0.002	28
Distrito Cañaveral	142	-0.487	0.015	-0.007	29
Distrito Colorados	120	-0.714	0.012	-0.009	30
Distrito San Juan	216	-0.516	0.022	-0.011	31
Distrito Ruitoque	41	-2.761	0.004	-0.012	32
Distrito Río Frio	117	-1.786	0.012	-0.021	33
Distrito Girón	811	-0.534	0.083	-0.045	34

Figura 14

Clasificación cuantitativa de distritos con base en el valor $F(\bar{Z} (Gi^*))$.

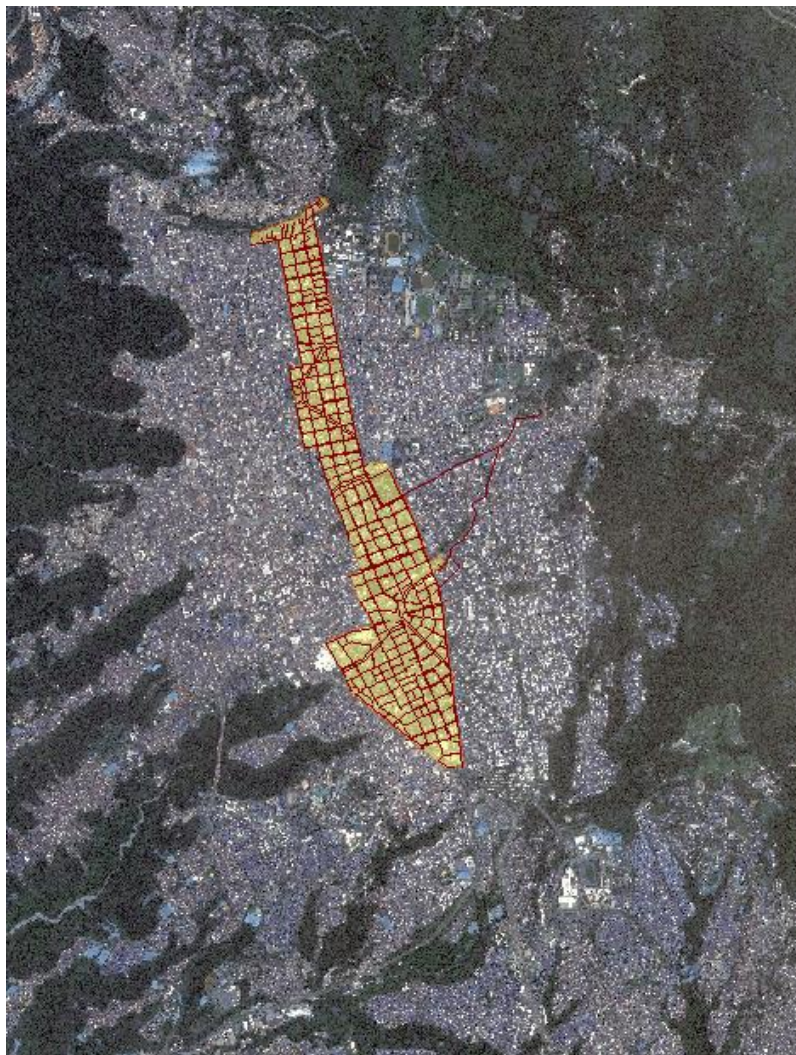


1.11.5 Caracterización del distrito hidráulico

El distrito que se seleccionó a partir del análisis de puntos calientes del registro de daños es Morro Alto, el cual se aprecia en la Figura 15.

Figura 15

Líneas de distribución del distrito morro alto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.



Dicho distrito está comprendido por un (1) caudalímetro a la salida de su tanque (Morro Alto), cinco (5) estaciones reguladoras de presión y 66,4 km de tuberías de diferentes diámetros y materiales, tal y como se aprecia en la Figura 16 y la Figura 17.

Figura 16

Longitudes por diámetro de tuberías (pulgadas) del distrito Morro Alto.

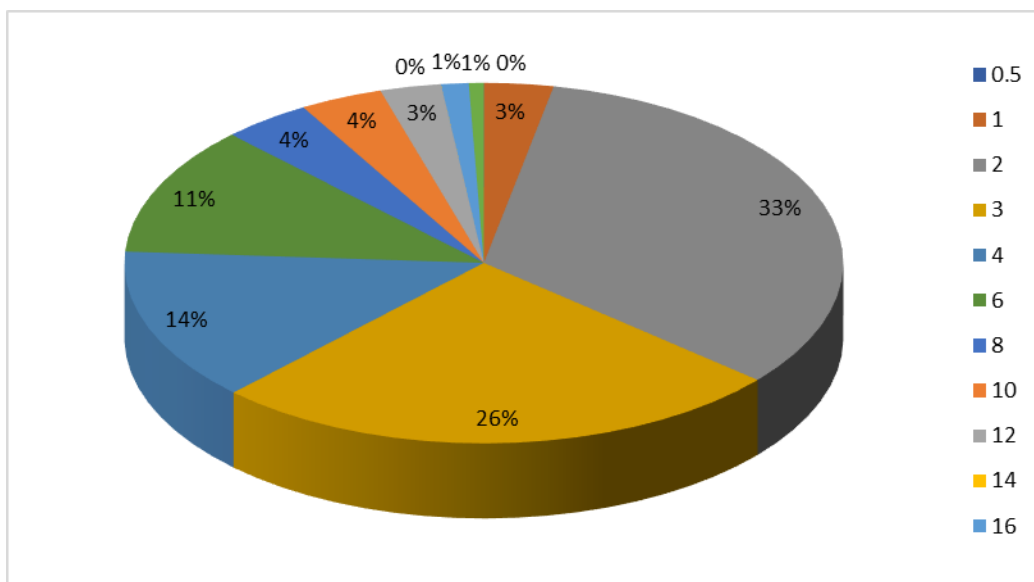
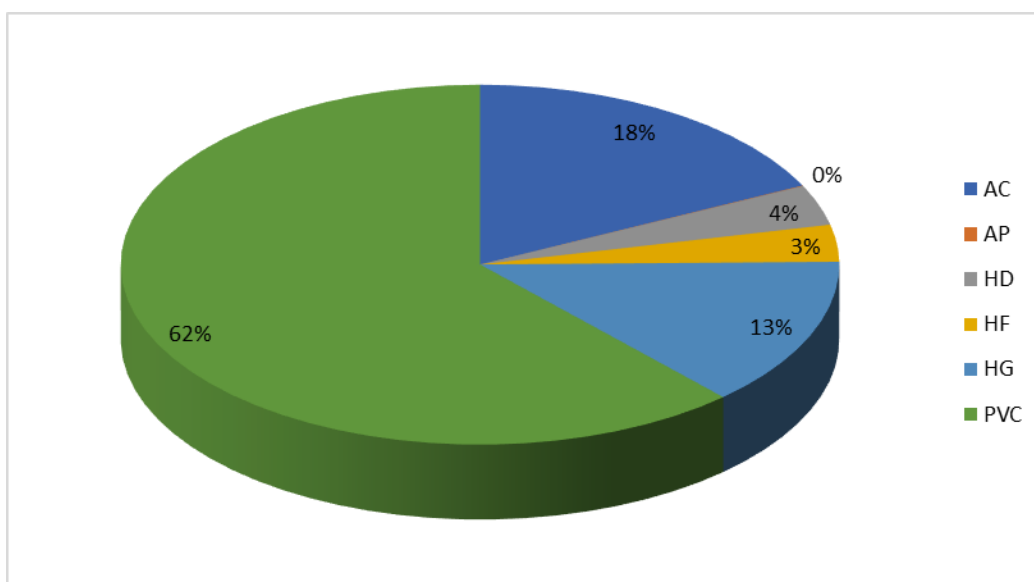


Figura 17

Longitudes por tipos de material de tuberías del distrito Morro Alto.



1.12 Precisión del volumen de entrada y estimación del IANC

El presente subcapítulo comprende los resultados de los protocolos para la adecuada medición del volumen de entrada del sistema y para la instalación de medidores que permitan la cuantificación de los volúmenes autorizados no medidos, ya sean facturados o no facturados (ver Capítulo 1.6). En cuanto al IANC, la estimación del IANC se realizó para el año 2016.

1.12.1 Adecuada medición del volumen de entrada del distrito Morro Alto

Partiendo de la aplicación de la metodología para la adecuada medición del volumen de entrada en sistemas de acueducto, se presentan los resultados para el distrito en estudio (Morro Alto).

1.12.1.1 Verificación de la sectorización del distrito Morro alto

El sistema operacional del amb S.A. E.S.P. desarrolla con frecuencia la verificación del funcionamiento y estado de operación de los distritos hidráulicos y de los diferentes elementos del sistema de distribución.

Para el año 2016, el amb garantizó que no se realizaron maniobras de apertura de la sectorización de larga duración en el distrito Morro Alto. Así, el estado operativo de la sectorización del distrito no presentó falencias o inconsistencias que alteraran la división o hermeticidad de dicho distrito.

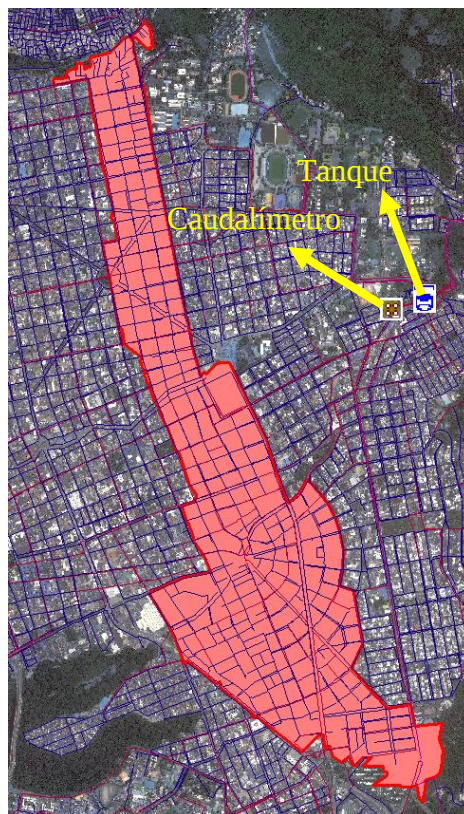
1.12.1.2 Ubicación e instalación de los equipos de medición del distrito morro alto

Para el año 2016, el amb S.A E.S.P contó con un caudalímetro ultrasónico a la salida del tanque que abastece el distrito Morro Alto (ver Figura 18), cuya tubería pertenece a la red matriz y es de diámetro nominal de 20” de asbesto cemento.

Su instalación se desarrolló con base en las recomendaciones para la adecuada operación del fabricante del equipo (KHRONE).

Figura 18

Ubicación de caudalímetro del distrito morro alto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.



1.12.1.3 Verificación del funcionamiento de los equipos de medición

En las actividades de verificación y calibración de macromedidores del área de prestación de servicio del amb S.A E.S.P., se tiene que el caudalímetro ultrasónico instalado para la medición de caudales del distrito Morro Alto presentó un funcionamiento adecuado para el año 2016, según aseguró el amb y según los datos observados e incluidos en el Anexo 2-1. Por lo tanto, los registros de caudales de este equipo para ese periodo de tiempo son confiables.

1.12.2 Proyección de instalación de medidores en sitios con consumos autorizados no facturados, no medidos

La proyección de medidores en sitios con consumos autorizados no facturados, no medidos, del presente proyecto, se desarrollaron en parques e hidrantes del distrito seleccionado. Para ello, se ubicaron los parques del distrito y a su vez se verificó si este contaba con su respectivo medidor. La ubicación de dichos parques se puede observar en la Figura 19.

Figura 19

Ubicación de parques del distrito Morro Alto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.



De los parques anteriormente presentados, se verificó que estos en efecto ya cuentan con medidores instalados. Por lo tanto, no se proyectaron medidores en estos puntos.

Posteriormente, con base en el catastro de hidrantes del distrito en estudio se llevó a cabo la selección estratégica de los mismos para la instalación de equipos de medición, en la cual se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- Hidrantes con cercanía a distritos adyacentes
- Hidrantes con alta frecuencia para abastecimiento de carros de bomberos
- Hidrantes con cercanía a la estación de bomberos
- Comodidad de acceso de las vías para el llenado de los carros de bomberos

En consecuencia, los hidrantes seleccionados para la instalación de medidores del distrito morro alto son los que se observan en la Figura 20.

Figura 20

Ubicación de hidrantes seleccionados para la instalación de medidores del distrito Morro Alto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.



1.12.3 Estimación del IANC

Para el presente proyecto, se tomó el volumen producido del año 2016 con base en el registro de mediciones de flujo del caudalímetro del distrito morro alto y el volumen facturado a partir de los datos de consumos de los suscriptores de dicho distrito para el mismo año. Dicha información y el valor del IANC calculado se encuentran en la Tabla 8.

Tabla 8

Índice de agua no contabilizada para el año 2016 del distrito morro alto del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

IANC Año 2016	
Volumen total producido M3	3724443
Volumen total Facturado M3	2626807
IANC (%)	29,47%

El IANC calculado muestra que para el año 2016, las pérdidas de agua estaban por debajo del máximo que permite la normatividad vigente (30% según CRA 17 de 1995 y CRA 688 de 2014).

1.13 Reducción de pérdidas comerciales por submedición

Este capítulo contempla la realización de un análisis de decisión multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés) con base en la población del estudio, la cual corresponde a los suscriptores de Morro Alto. Dicha información se obtuvo del catastro de suscriptores del amb S.A E.S.P. enfocado al distrito de Morro Alto. En los siguientes apartados se muestra el diagnóstico de la información disponible realizada, así como su depuración y validación para el posterior análisis multivariado.

1.13.1 Selección de variables del análisis de decisión multicriterio

Previo al inicio de la depuración de los datos del catastro de suscriptores, se seleccionaron las variables a utilizar en el MCDA. El criterio de selección se basó en aquellos datos que más influyeron en las pérdidas por submedición según el amb S.A E.S.P. A continuación, se mencionan dichas variables:

- Estrato socioeconómico: corresponde al nivel de clasificación de la población. Para el análisis a realizar se tomaron los estratos 1,2 y 3 como los más relevantes, ya que en estos estratos se encuentra el mayor reporte de pérdidas por submedición.
- Uso Legal: corresponde al servicio y/o actividad económica que presta el suscriptor. Para el presente análisis se seleccionaron los usos comercial e industrial como los más relevantes, debido a que son los de mayor consumo y por lo tanto, mayores pérdidas por submedición en el sistema.
- Bajos Consumos: corresponde a los suscriptores con consumo promedio mensual por debajo del indicador de ocupación por vivienda y la dotación por suscriptor para el municipio de Bucaramanga. Para el análisis se seleccionaron aquellos consumos menores o iguales a 10 m^3 como bajos, de acuerdo con lo considerado como consumo bajo por la empresa de acueducto.
- Edad: corresponde a la edad de instalación (en años) del medidor asociado a cada suscriptor. Esta se calculó como la diferencia entre el año 2016 (fecha de registro de los datos) y los datos en el campo “SERIE” de la base de datos. Se consideraron dentro del análisis aquellos medidores con más de quince años de instalación.
- Lectura acumulada: corresponde al volumen consumido acumulado (en metros cúbicos) del suscriptor desde la instalación del medidor. Como referencia se consideraron los medidores

con lectura acumulada igual o superior a 3000 m³, la cual es un indicativo de necesidad de reposición.

- Tipo de medidor: corresponde a la marca o modelo del medidor. Esta información es indicativa del consumo medio y comportamiento de los medidores.

1.13.2 Recopilación de la información existente

Paralelamente a la definición de las variables del análisis, se procedió con la recopilación de los datos necesarios para llevar a cabo dicho análisis. Por lo anterior, a partir de la base de datos del catastro de suscriptores del amb S.A E.S.P. se depuraron los suscriptores asociados al distrito de Morro Alto. En total se encontraron 19424 registros de suscriptores con corte a diciembre de 2016 (ver Figura 21). Posteriormente, se procedió a la verificación de los tipos de datos consignados en el archivo *.shp del catastro de suscriptores incluidos en la base de datos (ver Tabla 9). De estos datos, solo se verificaron aquellos asociados a las seis variables mencionadas en el numeral 1.13.1.

Figura 21

Ubicación espacial de los suscriptores del distrito de Morro Alto.



Tabla 9

Estructura de datos de las variables más relevantes

Nombre del campo	Tipo de dato	Descripción
Código	Número	Cuenta del suscriptor
Dirección	Texto	Dirección con relación a la malla vial
Nombre	Texto	Nombre del suscriptor
Código del barrio	Texto	Codificación del barrio utilizada por el amb
Uso	Número	Codificación del uso legal
Estrato	Número	Estrato socioeconómico
Uso Legal	Texto	Denominación del uso legal
Tipo de medidor	Texto	Tipo de medidor asociado a la marca de este
Serie	Número	Año de instalación del medidor

Nombre del campo	Tipo de dato	Descripción
Consumo1	Número	Consumo del mes de julio de 2018
Consumo2	Número	Consumo del mes de agosto de 2018
Consumo3	Número	Consumo del mes de septiembre de 2018
Consumo4	Número	Consumo del mes de octubre de 2018
Consumo5	Número	Consumo del mes de noviembre de 2018
Consumo6	Número	Consumo del mes de diciembre de 2018
Lectura	Número	Lectura acumulada en m3
Diámetro	Texto	Diámetro del medidor en pulgadas
Detenido	Texto	Indicación del estado de funcionamiento del medidor
Promedio	Número	Consumo promedio (6 meses) en m3
Rango consumo	Texto	Intervalo de consumo del suscriptor

1.13.3 Análisis de la información existente

A continuación, se muestran los resultados del diagnóstico de la información existente para el análisis de la integridad de los datos suministrados e identificación de posibles registros atípicos que afectaron la lectura y por lo tanto generaron pérdidas por sub-medición.

- Número de suscriptores registrados en el distrito de Morro Alto: 19424.
- Número de suscriptores con tipo/marca de medidor registrado: 19406.
- Número de suscriptores con medidor detenido: 493.
- Número de suscriptores sin información de medidor detenido: 11049.

1.13.3.1 Análisis de consumo promedio facturado

El amb S.A. E.S.P. realiza un registro bimestral de la lectura en los medidores para el cobro en la factura. Es decir, el volumen facturado al suscriptor corresponde a la diferencia de la lectura anterior y la presente, y se divide en dos para la facturación del mismo consumo durante dos meses consecutivos. Sin embargo, en la base de datos contenía registros de medidores detenidos; esta situación no permitió que se registre el consumo real del suscriptor y que se cobrara el consumo promedio de la zona donde se encuentre o de la misma cuenta, lo que generó pérdidas comerciales. En este caso, debe programarse dentro de la empresa el mantenimiento o remplazo del medidor, preferiblemente durante el siguiente ciclo de lectura. Para el caso de los datos objeto de análisis, se tienen 493 medidores detenidos.

Otra situación que se presentó con frecuencia es la localización del medidor dentro del predio, por lo que al igual que el caso anterior, se registró su consumo utilizando el Consumo Promedio de esa cuenta o de la zona. Al segundo mes de registro de un promedio repetido es necesaria la generación de un reporte priorizado por volumen registrado para la realización de las investigaciones y saneamiento del caso.

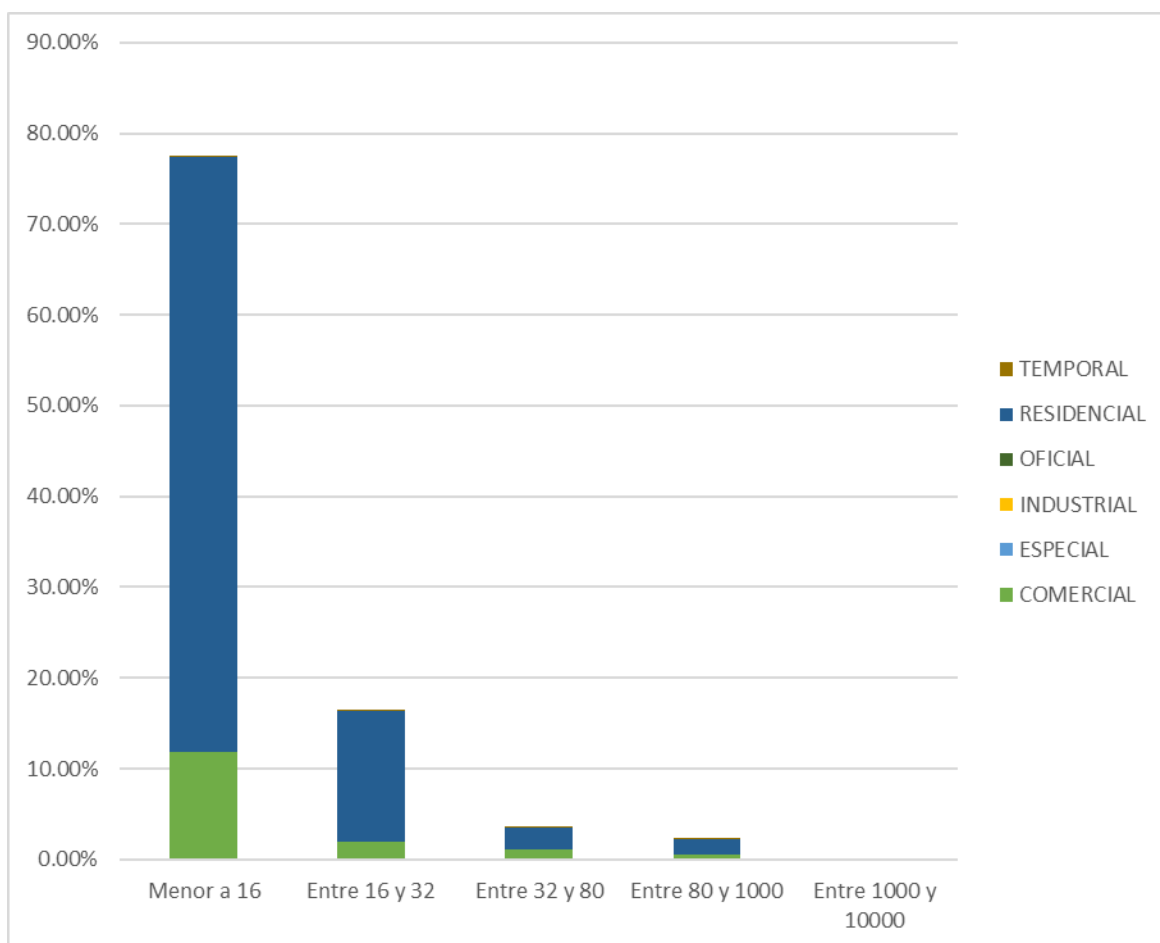
De los datos objeto de análisis, se tuvieron 1095 suscriptores con consumo promedio mensual facturado igual a cero, los cuales corresponden a aproximadamente un 5,64 % de los suscriptores. Se recomienda al amb S.A. E.S.P. realizar la investigación de las causas de estos consumos de manera puntual, ya que esta situación genera pérdidas en el sistema al desconocerse el consumo real de estos suscriptores.

1.13.3.2 Análisis de cuentas por rango de consumo promedio mensual y uso

La Figura 22 muestra la clasificación del consumo promedio según el uso del suscriptor. Aproximadamente el 78 % del consumo promedio estuvo por debajo de 16 m³, y en este rango de consumo el 65 % correspondió a suscriptores residenciales. Para el mayor rango de consumo (entre 1000 y 10000 m³), el cual correspondió al 0,12 % de los suscriptores, se obtuvo que el 0,10 % es de uso residencial. Dicha situación permitió la apreciación de que algunos suscriptores clasificados como de uso residencial probablemente es errada y la tarifa asignada a estos es considerablemente menor a la que corresponde.

Figura 22

Consumo promedio mensual por uso.



1.13.3.3 Análisis de cuentas de bajo consumo (1 a 10 m³)

De los datos suministrados, 10083 suscriptores (52 %) tienen consumos promedios inferiores a 10 m³. Se consideró que dichas cuentas registraron un consumo promedio bajo, mediante la comparación del consumo por vivienda y la dotación por suscriptor (Ver numeral 1.13.3.4). Por lo anterior, se recomienda la elaboración de una investigación puntual de estas cuentas para que así se garantice que la información del medidor sea correcta y que no esté sub-registrando, malogrado o fraude. Las cuentas de bajo consumo repetido deben tratarse al igual que las cuentas de consumo cero.

1.13.3.4 Cuentas por debajo de la dotación por suscriptor

Se estimó el consumo esperado por vivienda con la Ecuación 13 para un porcentaje de pérdidas del 25% (máximo según la Resolución 0330 de 2017) y se tuvo una dotación bruta de **186,67 L/hab/día**.

En segunda instancia, de acuerdo con el Censo poblacional del 2018 realizado por el DANE (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2018), el Índice de Ocupación por Vivienda para Bucaramanga y su área metropolitana es el siguiente:

- **Bucaramanga: 3 hab/vivienda**
- Floridablanca: 3,2 hab/vivienda
- Girón: 3,2 hab/vivienda
- Piedecuesta: 3,3 hab/vivienda

$$\text{Consumo por suscriptor} = (\text{dotación bruta})(\text{índice de ocupación}) \text{ Ecuación 16}$$

De acuerdo con dicha expresión, el consumo promedio en Bucaramanga es de 16,8 m³/mes. Dado que el 52 % de las cuentas registradas se reportaron con consumos menores a 10 m³/mes

(numeral 1.13.3.3), se toma este último como el valor preponderante en la variable de bajo consumo.

Cabe resaltar que ya aproximadamente el 78 % de la facturación está por debajo del consumo de 16.8 m³/mes, se recomienda el desarrollo de un análisis de las condiciones operativas de estos suscriptores.

1.13.3.5 Análisis de cuentas por marca/modelo de medidor

La información relacionada con la marca o modelo de medidor permitió la investigación del consumo medio de los medidores, así como la diferencia de registro según la marca. En la Tabla 10 se observa la distribución por porcentajes de los medidores según la marca o modelo utilizados en la zona de estudio.

Tabla 10

Distribución de cuentas por marca de medidor en el distrito de Morro Alto

MARCA	CANTIDAD	PORCENTAJE
ACUAFORJAS	95	0,49%
AHS	6	0,03%
AQUA SOFT	1	0,01%
BAR METERS	175	0,90%
ELSTER	2941	15,14%
HELIX	33	0,17%
HIDROMETER	1	0,01%
IBERCONTA	6243	32,14%
KENT	134	0,69%
LAUTARO	98	0,50%
MADDALENA	5	0,03%
MISURATORI	3265	16,81%
SAPPEL	8	0,04%
SCHLUMBERG	37	0,19%
SENSUS	1	0,01%
SIEMENS	2	0,01%
SIN MARCA	1	0,01%

MARCA	CANTIDAD	PORCENTAJE
TAVIRA	2573	13,25%
TRIDENT	30	0,15%
TURBOBAR	1	0,01%
WATERTECH	3742	19,26%
ZENNER	14	0,07%
(en blanco)	18	0,09%
Total general	19424	100,00%

Como se aprecia en la Tabla 10, existió una gran diversidad en la tipología de medidores encontrados en el distrito. De los datos analizados, cerca de 4 marcas instaladas correspondieron al 81 % del parque de medidores actual, mientras que 19 marcas diferentes representaron tan solo el 19 % del parque de medidores. Por lo anterior, se recomienda la estandarización en la marca de medidores instalados con el fin de reducir la variabilidad en las lecturas y la minimización de los errores de micromedición atribuibles a alguna marca específica. Paralelamente, se aconseja el desarrollo de un análisis más exhaustivo que relacione la marca del medidor con la lectura de este en el tiempo, para la determinación de la existencia de una relación entre la marca y las pérdidas por medición según la edad del medidor.

1.13.3.6 Análisis del número de suscriptores por edad del medidor

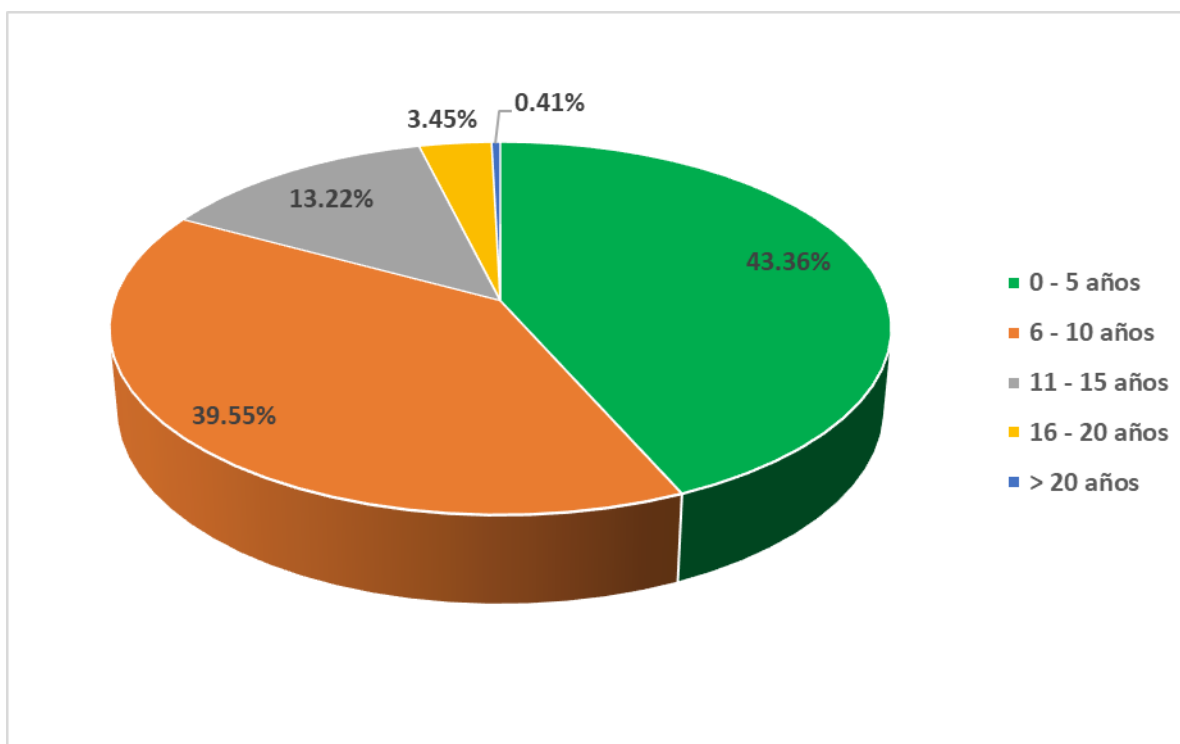
A fecha de corte de los datos (diciembre 2016), se realizó el análisis de los medidores por edad. Teniendo en cuenta que hay 3272 registros con años de instalación negativos o mayores de 50 años, dichos datos no se tuvieron en cuenta para este análisis.

Esta variable está directamente relacionada con su efectividad para la medición de consumos, ya que, a mayor edad, es más susceptible a fallos el medidor y paralelamente menos confiable el registro de consumos.

La Figura 23 muestra que el 43 % de los medidores instalados tuvieron menos de cinco años, lo que indicó que aproximadamente la mitad del parque de medidores se encontró con una adecuada operación. De los datos suministrados, aproximadamente 0,4 % de los medidores tuvo más de 20 años y aproximadamente el 3,5 % correspondió a medidores entre 16 y 20 años. Se recomienda que dichos medidores (de más de 15 años) deben analizarse con el propósito de conocer que su medición es adecuada y en caso contrario, incluirse en los planes de reposición.

Figura 23

Distribución de suscriptores por edad del medidor.



1.13.4 Depuración de los datos

1.13.4.1 Tamaño de la muestra

Una vez se identificaron los tipos de datos más relevantes para el análisis, se procedió a un análisis de la calidad de la información existente. Entre estos, la única variable que presento

valores inválidos fue la de “EDAD” (valores negativos o mayores a cincuenta años), situación que pudo atribuirse a un error al momento de la digitación de los valores en el campo “SERIE”. Por lo tanto, se procedió a la realización de un análisis de detección de casos atípicos (Hair, Anderson, Tatham, & Black, 1999), mediante la estandarización de los datos del campo creado “EDAD” a partir de los datos de la Tabla 11. Posteriormente, se identificaron como casos atípicos aquellos datos por fuera del rango recomendado de ± 3 desviaciones estándar.

Tabla 11

Estadística descriptiva de los datos de la variable EDAD

Media (años)	339,75
Desviación estándar (años)	747,776
Valor mínimo estandarizado	-1,785
Valor máximo estandarizado	2,244

Una vez se realizó la estandarización, se obtuvo que ningún caso se encontró por fuera del rango de ± 3 desviaciones estándar. Sin embargo, debido a que 3272 cuentas tuvieron valores de edad por fuera del rango ordinario de valores típicos (edades negativas o mayores a cincuenta años, por ejemplo, edad 2018, quizá en referencia al año de instalación del medidor y no su edad), se consideraron estos como casos atípicos. En conclusión, los 3272 datos anteriores se eliminaron de la muestra, reduciéndola a 16152 registros válidos (83 % del total de suscriptores en Morro Alto).

1.13.5 Análisis de decisión multicriterio

Partiendo de la metodología expuesta en el capítulo 1.8.2 se elaboró el análisis multicriterio y la estimación del índice de reposición (IR), como se muestra a continuación.

1.13.5.1 Selección de variables a analizar

Las variables a analizar, como se mencionó en el numeral 1.13.1, fueron la edad del medidor, el uso del suscriptor, el estrato del suscriptor, la lectura del medidor y el consumo promedio.

1.13.5.2 Determinación del peso de cada variable

Para la determinación de los pesos calculados, se agruparon las cuentas por barrio y se calculó el peso de cada variable con los siguientes pasos:

1. Se cuantificaron por barrio el número de cuentas bajo cada condición crítica según la Tabla 12.

Tabla 12

Selección de condición crítica en cada variable

Variable	Condición crítica
Edad	> 15 años
Consumo promedio	0 a 10 m ³ /mes
Estrato	1, 2 o 3
Usos Legales	Comercial o industrial
Lecturas	> 3000 m ³

2. Se calculó el total de cada condición crítica por barrio (A_k) y posteriormente el total de cuentas para todas las variables críticas (B_T) (ver Anexo 3-1).

$$A_k = \sum a_{jk} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde,

a_{jk} : número de cuentas en el barrio k para la variable j

$$B_k = \sum A_k \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde,

B_k : sumatoria del total de número de cuentas por todos los barrios para todas las variables

3. Se normalizó el peso parcial por barrio según la variable con la siguiente fórmula:

$$w_{jknormalizado} = \sum \frac{a_{jk}}{B_T} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde,

$W_{jknormalizado}$: peso parcial de la variable j en el barrio k normalizado

4. Se calculó el peso de cada variable (W_j) sumando los pesos parciales del punto 3.

$$W_j = \sum w_{jknormalizado} \quad \text{Ecuación 20}$$

Los resultados quedaron consignados en la Tabla 13, donde la variable de mayor ponderación es la de consumos bajos (hasta 10 m³) y la de menor la edad (mayor de 15 años).

Tabla 13

Pesos de las variables críticas

Variable	Peso W_i	Peso Acumulado ($\sum W_i$)
Edad > 15 años	3,6%	3,6%
Consumo 0 A 10 m ³ /mes	54,0%	57,6%
Estrato 1, 2 o 3	23,9%	81,6%
Usos Legales comercial o industrial	13,9%	95,4%
Lecturas > 3000 m ³	4,6%	100,0%

1.13.5.3 Determinación del valor de cada parámetro dentro de cada variable

Teniendo en cuenta los valores críticos para cada variable, se asignaron dos valores únicos a cada variable (Tabla 14):

Tabla 14

Valor de cada parámetro por variable

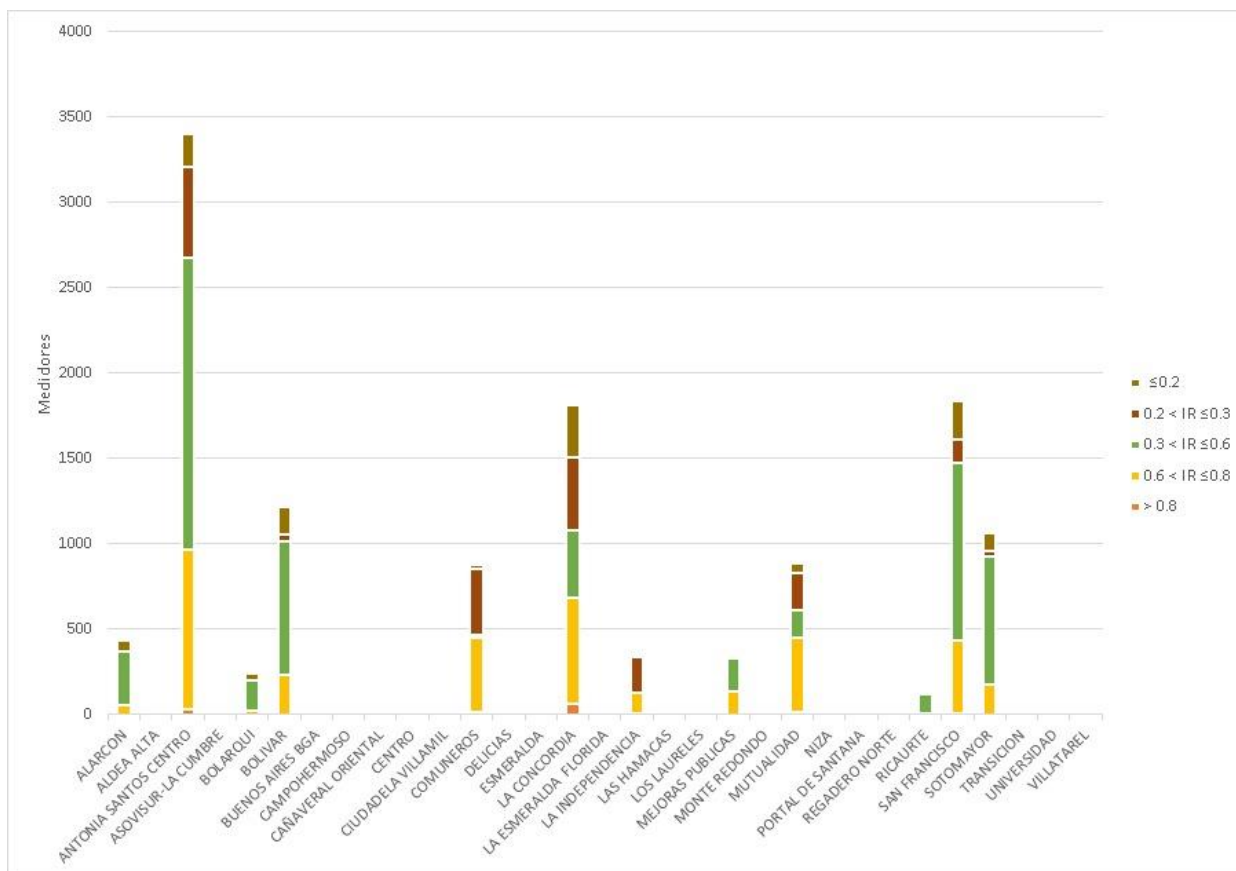
Variable	Parámetro	Valor
Edad	< 15 años	0
	> 15 años	1
Consumo promedio	> 10 m ³ /m	0
	0 a 10 m ³ /mes	1
Estrato	Otros	0
	1, 2 o 3	1
Usos Legales	Otros	0
	Comercial o industrial	1
Lecturas	≤ 3000 m ³	0
	> 3000 m ³	1

1.13.5.4 Determinación del índice de reposición

A partir de estos pesos y valores, se procedió al cálculo del IR para la asignación del orden de priorización de reposición de medidores. Los resultados de reposiciones por barrio se muestran a continuación y el valor del IR por suscriptor se encuentra en el Anexo 3-2 y en el Anexo 3-3.

Figura 24

Índice de reposición por barrio.



Como se observa en la Figura 24, el barrio con el mayor número de reposiciones correspondió al barrio Antonia Santos (3399 medidores), de los cuales 29 requirieron reposición inmediata ($IR > 0,8$). En segundo lugar, se encuentra el barrio San Francisco con 1832 medidores, aunque solo tuvo 3 cuentas con IR mayores de 0,8. En tercer lugar, se encontró el barrio La Concordia con 1808 medidores para reposición, de los cuales 62 requirieron reposición inmediata. En el Anexo 3-4 se encuentra el plan de reposiciones para un periodo de 5 años, en el cual se propuso la reposición de aquellos con un IR mayor o igual a 0,6, considerados en el presente trabajo de aplicación como los más críticos.

1.14 Reducción de pérdidas técnicas por fugas

Otra de las fases del modelo de gestión operacional propuesto es la reducción de pérdidas técnicas por fugas a través de la reposición priorizada de tuberías (gestión de la infraestructura) y la reducción de la presión (gestión de la presión).

Los objetivos de esta fase son:

1. Precisar prioridades de reposición de tuberías con base en sus probabilidades de daño.
2. Precisar prioridades de reposición de tuberías con base en el mejoramiento de la uniformidad de las presiones y la confiabilidad hidráulica.
3. Estimar un valor de reducción en la presión de entrada al distrito.

En el objetivo 1 se incorporó un análisis estadístico bayesiano sobre las tuberías del distrito ya definido anteriormente como prioritario (Morro Alto). Allí, a partir del registro de daños, se predijeron probabilidades de daño en cada tubería según características encontradas en la misma (diámetro, edad y material). Con base en estas probabilidades de daño se determinó un primer conjunto de tuberías objetivo de reposición.

Seguidamente, para el objetivo 2 se incorporó un análisis con base en la gestión de la presión y la infraestructura, donde a partir del modelo hidráulico del distrito de Morro Alto, se priorizó la renovación de aquellas tuberías que de manera óptima mejoran la uniformidad de la presión y la confiabilidad hidráulica. En este análisis, al uniformizar la presión, es posible entonces posteriormente reducir la presión promedio del distrito mediante la instalación de una nueva válvula reguladora a la entrada del mismo o la reducción en la presión de tarado de las válvulas reguladoras existentes (objetivo 3). A partir de lo anterior se determinó un segundo conjunto de tuberías objetivo de reposición y un valor estimado posible de reducción de presión a la entrada del distrito.

Finalmente se priorizó la renovación de la intersección de los dos conjuntos de tuberías óptimas y en seguida sobre las restantes existentes en los dos conjuntos se estimó un proyecto de obras tendientes a la reducción de pérdidas por fugas.

1.14.1 Análisis Estadístico Bayesiano

Para el presente problema no se consideró una sola partición del espacio muestral, esto es, no existe una única partición $A_1, A_2, \dots, A_n$, sino más bien 3 particiones del espacio muestral a saber: la primera dividió las tuberías en rangos de edad (E_1, E_2, E_3, E_4); la segunda en tipos de material ($M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_6$); y la tercera en rangos de diámetro (D_1, D_2, D_3, D_4)

De este modo un estado de condición, denotado C_x , se definió como la combinación de características individuales, esto tradujo una combinación de características (E_i, M_j, D_k). Por ejemplo, un estado de condición de una tubería pudo corresponder a la siguiente combinación de características: 50 años de edad, Material Hierro Fundido y 6" de diámetro.

Se conocieron indirectamente, a través del registro histórico de eventos en determinado año, para el área de estudio:

Las probabilidades de observación de características específicas E_i, M_j, D_k : edad, material y diámetro, para cualquier i, j, k ; en tuberías que presentaron fallos. Esto es, se conocieron las probabilidades $P(E_i | F)$, $P(M_j | F)$ y $P(D_k | F)$, donde el evento F correspondió a la presencia de un fallo.

Se conocieron indirectamente, a través del catastro de redes en determinado año, para el sector de estudio:

Las probabilidades a priori de observación de características específicas E_i , M_j , D_k indicaron que se conocieron las probabilidades $P(E_i)$, $P(M_j)$ y $P(D_k)$

La probabilidad de fallo del sistema $P(F)$

El problema fue entonces: dada una tubería con un estado de condición,

$C_x = E_i \cap M_j \cap D_k$ se deseó hallar su probabilidad de fallo, esto es:

$$P(F | C_x)$$

Del teorema de Bayes se tiene que:

$$P(C_x | F) = \frac{P(F | C_x) P(C_x)}{P(F)} \quad \text{Ecuación 21}$$

Luego:

$$P(F | C_x) = \frac{P(C_x | F) P(F)}{P(C_x)} \quad \text{Ecuación 22}$$

Ahora:

$$P(C_x | F) = P(E_i \cap M_j \cap D_k | F) \quad \text{Ecuación 23}$$

Bajo la hipótesis de que los eventos E_i , M_j , D_k son independientes, se pudo verificar mediante la probabilidad condicional que:

$$P(E_i \cap M_j \cap D_k | F) = P(E_i | F) P(M_j | F) P(D_k | F) \quad \text{Ecuación 24}$$

De este modo se dedujo que:

$$P(F | E_i \cap M_j \cap D_k) = \frac{P(E_i | F) P(M_j | F) P(D_k | F) * P(F)}{P(E_i) P(M_j) P(D_k)} \quad \text{Ecuación 25}$$

Las tuberías con una mayor probabilidad de falla se les asignó una prioridad de mantenimiento sobre las otras. Por tal motivo, se clasificaron las tuberías de la de mayor prioridad hasta la de menor prioridad de mantenimiento.

1.14.1.1 Resultados del análisis

Se exploró el espacio muestral de cada una de las características a considerar en el análisis bayesiano, encontrando lo siguiente:

Edad (E): [0,43 años – 81,89 años]

Material (M): {AC, AP, HD, HF, HG, PVC}

Diámetro Nominal (D): {1/2", 1", 2", 3", 4", 6", 8", 10", 12", 14", 16", 20"}

Se definieron los siguientes intervalos de clase (o rangos) para cada una de las características a analizar:

Tabla 15

Intervalos de clase elegidos para el análisis bayesiano

E: EDAD (años)	(0-10]	E ₁
	(10-20]	E ₂
	(20-40]	E ₃
	(40-60]	E ₄
	(60-100]	E ₅
M: MATERIAL	AC	M ₁
	AP	M ₂
	HD	M ₃
	HF	M ₄
	HG	M ₅
	PVC	M ₆
D: DIÁMETRO NOMINAL (Pulg)	[1/2" - 2"]	D ₁
	[3" - 4"]	D ₂
	[6" - 10"]	D ₃
	[12" - 14"]	D ₄
	[16" - 20"]	D ₅

Se descartó el análisis en función del número de tuberías, debido a que es inapropiado, ya que se juzgaba por igual a una tubería de 1m con otra de 100m. Por lo tanto, se optó por la definición como parámetro de evaluación de probabilidades a la longitud.

La probabilidad de daño general $P(F)$ viene dada a continuación, en la Tabla 16:

Tabla 16

Cálculo de la probabilidad de daño general en el Distrito

Longitud total tubería del Distrito Morro Alto (A) =	66445,0 m
Longitud total tubería con daño en el Distrito Morro Alto (B) =	7991,2 m
$P(F) = B/A = 0,12$	

Seguidamente, en la Tabla 17 se muestran los cálculos de las probabilidades de fallo no condicionales:

Tabla 17

Probabilidades a priori no condicionales – Distrito Morro Alto

Longitud de tubería E_1	14617,5 m	$P(E1) =$	0,22
Longitud de tubería E_2	24548,9 m	$P(E2) =$	0,37
Longitud de tubería E_3	6212,4 m	$P(E3) =$	0,09
Longitud de tubería E_4	3701,5 m	$P(E4) =$	0,06
Longitud de tubería E_5	17364,7 m	$P(E5) =$	0,26
Longitud de tubería M_1	11803,2 m	$P(M1) =$	0,18
Longitud de tubería M_2	27,2 m	$P(M2) =$	0,00
Longitud de tubería M_3	2419,7 m	$P(M3) =$	0,04
Longitud de tubería M_4	2203,9 m	$P(M4) =$	0,03
Longitud de tubería M_5	8913,3 m	$P(M5) =$	0,13
Longitud de tubería M_6	41077,8 m	$P(M6) =$	0,62
Longitud de tubería D_1	24109,0 m	$P(D1) =$	0,36
Longitud de tubería D_2	26423,0 m	$P(D2) =$	0,40
Longitud de tubería D_3	12849,4 m	$P(D3) =$	0,19
Longitud de tubería D_4	1829,3 m	$P(D4) =$	0,03
Longitud de tubería D_5	1234,3 m	$P(D5) =$	0,02

En la tabla anterior, por ejemplo, $P(E1) = 14617,5 / 66445 = 0,22$

Seguidamente, en la Tabla 18 se muestran los cálculos de las probabilidades de fallo condicionales:

Tabla 18

Probabilidades a priori condicionales – distrito Morro Alto

Longitud de tubería E ₁ que ha presentado daño	1424,7 m	P(E ₁ F) =	0,18
Longitud de tubería E ₂ que ha presentado daño	3250,7 m	P(E ₂ F) =	0,41
Longitud de tubería E ₃ que ha presentado daño	545,5 m	P(E ₃ F) =	0,07
Longitud de tubería E ₄ que ha presentado daño	680,4 m	P(E ₄ F) =	0,09
Longitud de tubería E ₅ que ha presentado daño	2089,8 m	P(E ₅ F) =	0,26
Longitud de tubería M ₁ que ha presentado daño	1571,2 m	P(M ₁ F) =	0,20
Longitud de tubería M ₂ que ha presentado daño	0,0 m	P(M ₂ F) =	0,00
Longitud de tubería M ₃ que ha presentado daño	429,7 m	P(M ₃ F) =	0,05
Longitud de tubería M ₄ que ha presentado daño	241,7 m	P(M ₄ F) =	0,03
Longitud de tubería M ₅ que ha presentado daño	1027,2 m	P(M ₅ F) =	0,13
Longitud de tubería M ₆ que ha presentado daño	4721,3 m	P(M ₆ F) =	0,59
Longitud de tubería D ₁ que ha presentado daño	2953,7 m	P(D ₁ F) =	0,37
Longitud de tubería D ₂ que ha presentado daño	3530,0 m	P(D ₂ F) =	0,44
Longitud de tubería D ₃ que ha presentado daño	1507,5 m	P(D ₃ F) =	0,19
Longitud de tubería D ₄ que ha presentado daño	0,0 m	P(D ₄ F) =	0,00
Longitud de tubería D ₅ que ha presentado daño	0,0 m	P(D ₅ F) =	0,00

En la tabla anterior por ejemplo, $P(E_1 | F) = 1424,7 / 7991,2 = 0,18$

Luego se calculó para cada tubería, la probabilidad de daño condicional según las características o condición de la tubería: $P(F | E_i \cap M_j \cap D_k)$ utilizando la ecuación anteriormente deducida. Por ejemplo, una tubería de PVC (M₆), con 52 años (E₄) y de 3” de diámetro (D₂), tendrá la siguiente probabilidad de fallo:

$$P(F | E_4 \cap M_6 \cap D_2) = \frac{P(E_4 | F) P(M_6 | F) P(D_2 | F) * P(F)}{P(E_4) P(M_6) P(D_2)}$$

$$P(F | E_4 \cap M_6 \cap D_2) = \frac{0,09 * 0,59 * 0,44 * 0,12}{0,06 * 0,62 * 0,40}$$

$$P(F | E_4 \cap M_6 \cap D_2) = 0,19$$

Finalmente, de acuerdo con los valores de probabilidad de fallo estimados, se clasifican las probabilidades de daño de manera cualitativa como se observa en la Tabla 19.

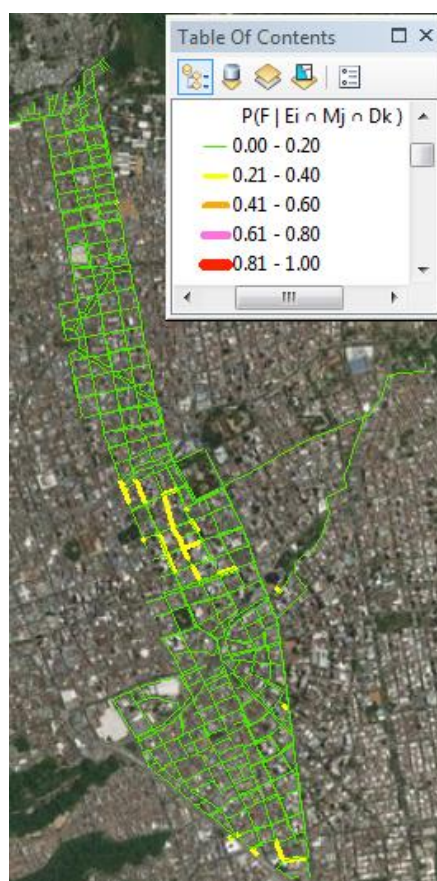
Tabla 19

Probabilidad de daño en las tuberías de acuerdo con el análisis Bayesiano

Probabilidad de daño	Probabilidad de daño Cualitativa	Longitud	Aporte
[0 – 0,20)	Muy baja	65431,8 m	98,48%
[0,20 – 0,40)	Baja	1013,2 m	1,52%
[0,40 – 0,60)	Media	0,0 m	0,00%
[0,60 – 0,80)	Alta	0,0 m	0,00%
[0,80 - 1]	Muy Alta	0,0 m	0,00%

Figura 25

Probabilidad de daño en las tuberías de acuerdo al análisis Bayesiano.

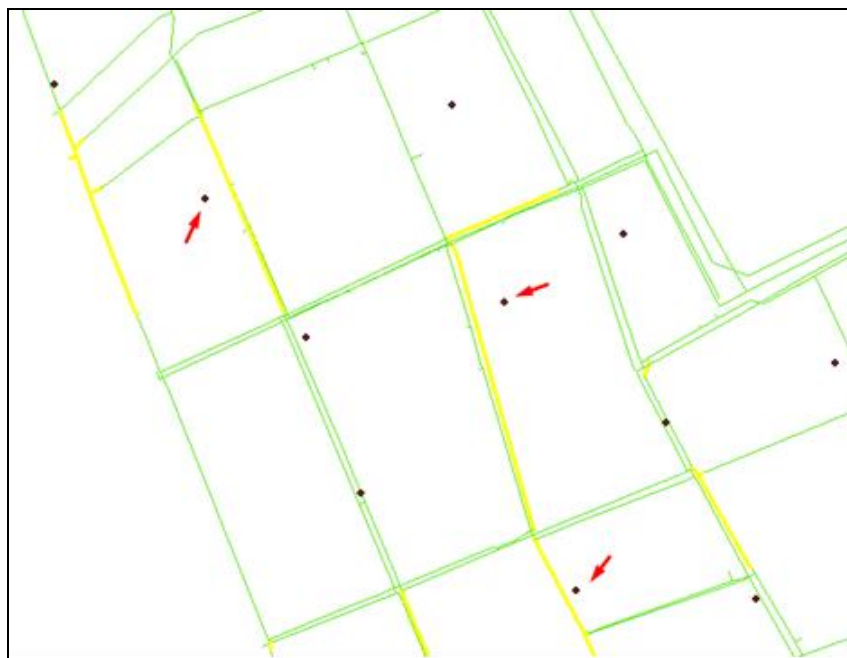


Los resultados anteriores mostraron que, en términos generales es muy baja la probabilidad de daño en los tubos de acuerdo con el análisis bayesiano. Los más probables correspondieron a los tubos amarillos (probabilidades 0,21-0,4). En seguida, con el fin de estimar una reducción de volumen de agua fugada, debida a la reposición de los tramos anteriores se procedió con varias actividades.

Primero se procedió a estimar la reducción en el número de daños por la reposición de dichas tuberías amarillas. Para ello se realizó selección de los daños que tenían incidencia en los tramos de color amarillo, es decir, los daños cuya tubería más cercana era de color amarillo, como se ilustra en la Figura 26.

Figura 26

Daños incidentes en las tuberías a reponer por análisis bayesiano.

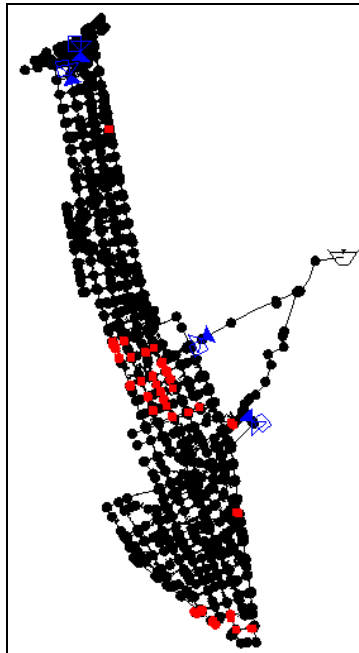


Esto derivó en 49 daños seleccionados (de los 666 daños totales). Ahora, debido a que estos 666 años se presentaron en un período de 4,75 años (enero de 2014 a septiembre de 2018), la reducción de daños estimada correspondió a 10 daños por año ($49 / 4,75$).

La siguiente actividad consistió en estimar la presión promedio en las tuberías a renovar. Para ello se extrajo el listado de los nodos en cada extremo de dichas tuberías (que se muestran en la siguiente figura), encontrando para ellos en el modelo hidráulico una presión promedio de 52,72 m.c.a.

Figura 27

Nodos aferentes a las tuberías a renovar por análisis Bayesiano.



Luego se procedió a averiguar en el shapefile de los daños, el tiempo promedio de duración de la reparación de los 49 daños anteriores, encontrando como tiempo total 43,87 horas, lo que equivale a un promedio de 0,9 horas (54 minutos) por daño.

En seguida se procedió a averiguar la categoría de daño más común de los 49 daños anteriores, encontrando que 30 de ellos (el 61%) corresponden a “Tubo roto Red”. Con esto se supuso que la falla típica para los 49 daños anteriores, bien podría asociarse a una falla longitudinal, en vez de una falla en una unión o una falla de una conexión domiciliaria.

Finalmente se averiguó el diámetro más común de las tuberías sobre las que ha ocurrido daño, el cual fue 3” con el 33,34% de los daños.

Con todo lo anterior, se procedió a estimar el caudal de fuga típico en las tuberías a renovar (amarillas) mediante el uso de la ecuación número 14 del trabajo de Ávila & González (2006) y que se expone a continuación.

$$Q = 1300 d^{-0.7} L^{2.65} P^{\left\{1.678\left(\frac{L}{d}\right)^{0.03}\right\}} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde Q es el caudal de fuga (L/s) que pasa a través de una falla longitudinal de longitud L(m) que existe sobre una tubería de diámetro d (mm), sometida a una presión P (m.c.a). Con los datos anteriormente estimados y para una longitud de falla típica de 0.05 m (Ávila & González, 2006), se obtuvo el siguiente caudal de fuga típico

$$Q = 1300 (75)^{-0.7} (0.05)^{2.65} 52.72^{\left\{1.678\left(\frac{0.05}{75}\right)^{0.03}\right\}} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$Q = 4.72 \text{ L/s}$$

Con base en dicho caudal de fuga estimado para un daño típico y en la duración promedio de la reparación (54 minutos) se estimó el volumen de fuga por daño en 15,3 m³. Finalmente, con la reducción de 10 daños por año, se estimó que al año dejarían de fugarse vía estallido, tan sólo unos 153 m³, lo que a un costo de producción de \$ 350 / m³, deriva en un pobre ahorro en costos de producción de \$ 53.550.

De otro lado, reducir los daños además de implicar un ahorro en agua desperdiciada, implica reducción en costos de operación. Suponiendo un precio de atención a un daño en COP \$1.500.000 (movilización, rotura pavimento, excavaciones, tubería, accesorios, rellenos, reconformación pavimento, etc.), que se ha supuesto bastante alto a propósito; los 10 daños menos al año implicaron tan sólo un ahorro de COP \$ 15.000.000.

1.14.2 Análisis con base en la gestión de la presión

1.14.2.1 Problema planteado

Con lo expuesto anteriormente, en los capítulos 1.3.4 y 1.3.5 se evidenció que:

- La uniformidad de las presiones aumenta la eficiencia de la gestión de la presión, pues un sector hidráulico con presiones más uniformes puede ser objeto de una mayor reducción de presión y con ello una mayor reducción de caudal de fuga y frecuencia de estallidos.
- A priori, la reducción del nivel de presiones de un sector hidráulico reducirá la confiabilidad hidráulica y viceversa. Con esto, se debe prever minimizar el deterioro de la confiabilidad hidráulica derivado de la reducción de presiones.

Con las premisas anteriores, se plantea la gestión de la presión con base en los siguientes objetivos:

- Se debe reducir el nivel de presiones.
- Antes de recibir la reducción de presiones es bastante apropiado preparar o adaptar el distrito o zona así:
 1. Aumentando de manera óptima la uniformidad de sus presiones. Esto con el fin de incrementar la eficiencia de la reducción de presiones pues se podría reducir la presión en una mayor proporción.
 2. Aumentando de manera óptima su confiabilidad hidráulica. Esto con el fin de atenuar o minimizar su deterioro previsto por la reducción de presiones.

1.14.2.2 Algoritmo planteado

El Anexo 4.1 presenta el algoritmo utilizado para la materialización de la metodología de reposición planteada.

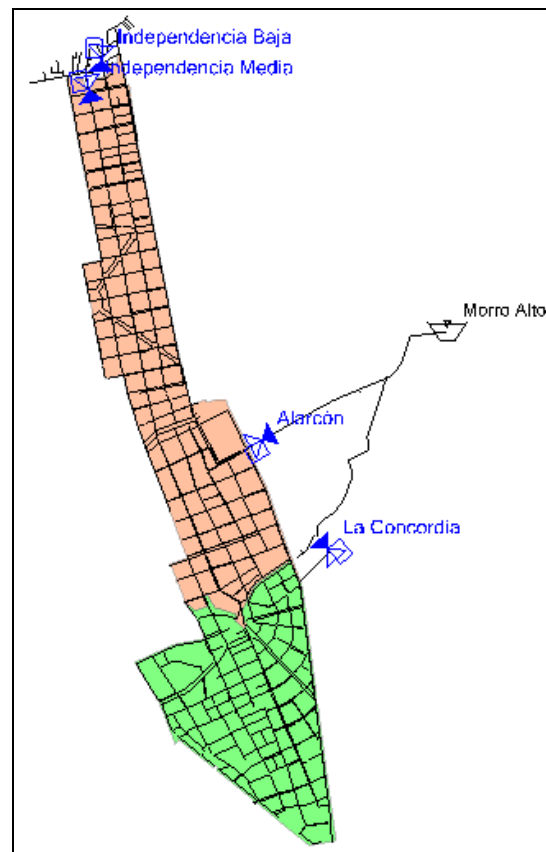
El fin del algoritmo comprendió las expresiones expuestas en los capítulos 1.3.2, 1.3.4, 1.3.5 y 1.3.6, cuyo propósito es la obtención óptima multiobjetivo del sistema mediante la maximización del índice de resiliencia (Ir) (Confiabilidad) y el coeficiente de uniformidad de presiones (CU) (Uniformidad de presiones). Lo anteriormente calificado por la función objetivo (FO) del capítulo 1.3.6.

1.14.2.3 Resultados análisis gestión de la presión

Topológicamente, el distrito Morro Alto es abastecido por el tanque Morro Alto desde el cual sale una línea que posteriormente se ramifica en dos. En seguida sobre cada una de estas dos líneas existe una válvula reguladora de presión (La Concordia y Alarcón) que regulan las presiones del sector Concordia (verde en la Figura 28) y sector Alarcón (Rosado en la Figura 28) respectivamente. Por lo tanto, se puede decir que la energía del distrito es administrada por dichas válvulas reguladoras.

Figura 28

Modelo hidráulico Distrito Morro Alto.



A partir del modelo hidráulico del distrito Morro Alto se calcularon estadísticas iniciales del Distrito (Tabla 20 y Tabla 21).

Tabla 20

Estadísticas iniciales (antes) del distrito Morro Alto

VARIABLE	Distrito Morro Alto - Estado Actual		
Hora de Máx. / Media / Mín. Demanda	11:15	19:45	3:00
Caudal Demandado (LPS) en Máx. / Media / Min Demanda	88.70	73.63	53.81
Presión Promedio en Máx. / Media / Mín. Demanda (m.c.a.) *En nodos de consumo	52.71	53.51	54.34
Presión máxima en Máx. / Media / Mín. Demanda (m.c.a.) *En nodos de consumo	151.07	152.91	154.86
Presión mínima en Máx. / Media / Mín. Demanda (m.c.a.) *En nodos de consumo	28.85	28.90	28.95
Rango de Presiones en Máx. / Media / Mín. Demanda (m.c.a.) *En nodos de consumo	122.22	124.01	125.91

Tabla 21

Operación inicial (antes) de las válvulas reguladoras de comando del distrito Morro Alto

VARIABLE	Reguladora Alarcón - Estado operación actual			Reguladora Concordia - Estado operación actual		
Hora de Máx. / Media / Mín. Demanda	11:15	19:45	3:00	11:15	19:45	3:00
Presión aguas arriba (m.c.a.) en Máx. / Media / Min Demanda	51.64	52.17	52.72	64.16	64.69	65.25
Presión aguas abajo (m.c.a.) en Máx. / Media / Min Demanda	26.01	26.01	26.01	28.88	28.88	28.88

Seguidamente se ejecutó el algoritmo descrito en el Anexo 4-1 para 50 cambios y bajo 3 escenarios de importancia para el Ir (5%, 50% y 95%). Se realizó posteriormente el análisis de los tres escenarios ejecutados con el fin de seleccionar el escenario óptimo y el cambio o

iteración óptima. Se encontró como escenario óptimo el correspondiente a un coeficiente de importancia para el Índice de Resiliencia (I_r) del 5% y el cambio óptimo es el número 2. Los resultados del escenario óptimo fueron los siguientes:

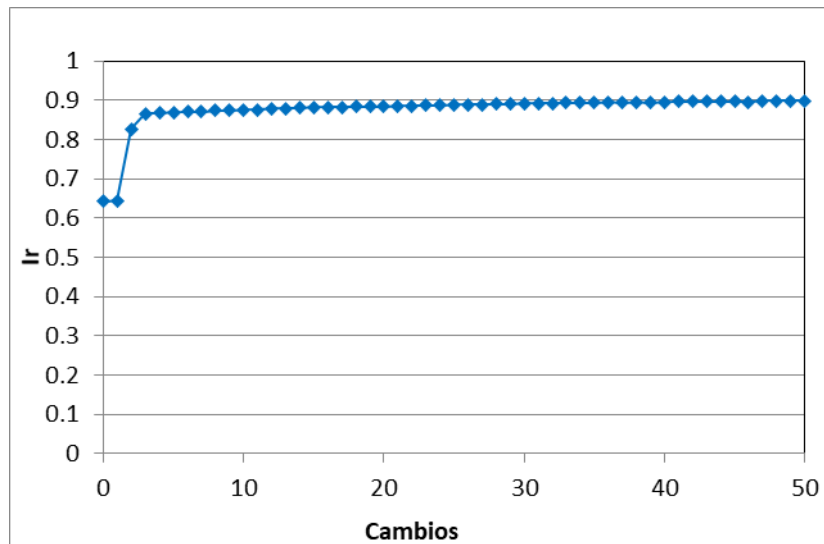
Figura 29

Tramos a reponer (en negro) de acuerdo al análisis de uniformidad de presiones y confiabilidad hidráulica.



Figura 30

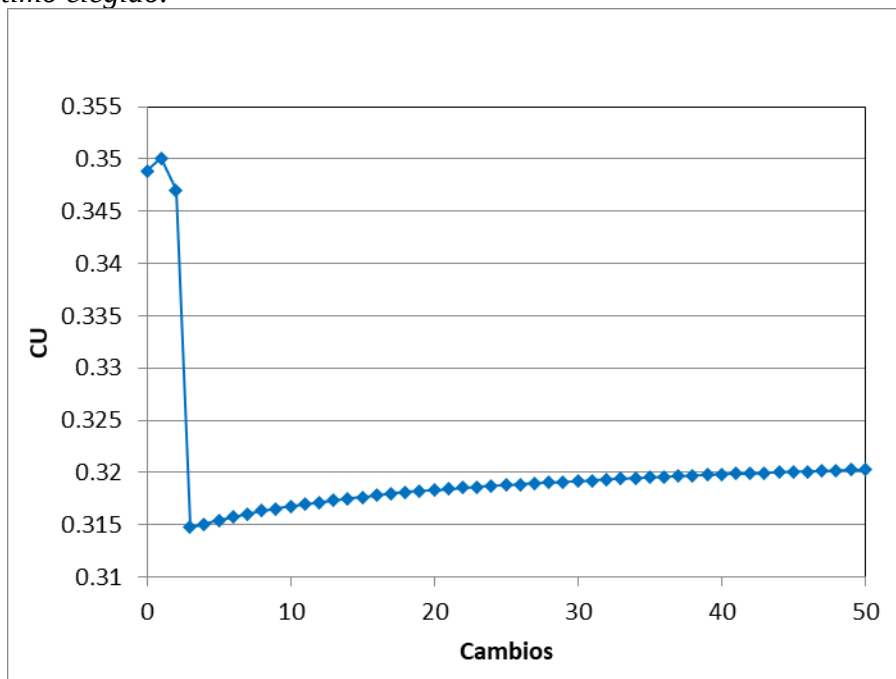
Índice de resiliencia vs número de iteraciones (o cambio) para el escenario óptimo elegido.



La figura anterior muestra la evolución del Índice de Resiliencia (I_r) del distrito Morro Alto (eje de las ordenadas) conforme se realizan cambios (eje de las abscisas), de acuerdo con el algoritmo descrito en el Anexo 4-1. Se muestra que la red tenía inicialmente un Índice de Resiliencia cercano a 0,65 y que el segundo cambio implicó un aumento representativo en el Índice de Resiliencia. A partir de allí los cambios en tuberías no implicaron mayor aumento en el Índice de Resiliencia.

Figura 31

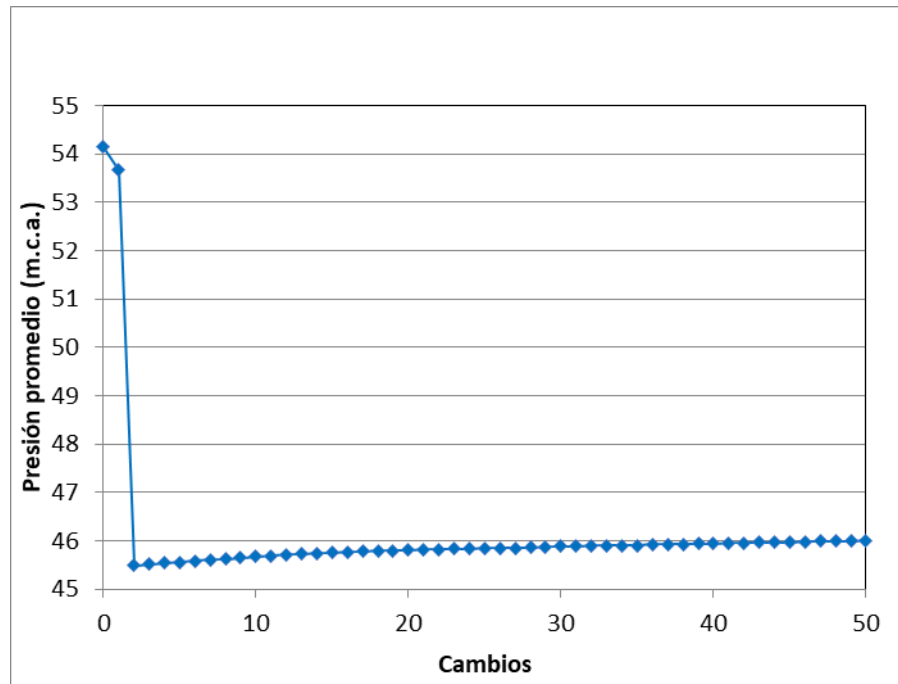
Coeficiente de uniformidad de presiones vs número de iteraciones (o cambio) para el escenario óptimo elegido.



La Figura 31 muestra la evolución del coeficiente de uniformidad de presiones (CU) del distrito Morro Alto (eje de las ordenadas) conforme se realizan cambios (eje de las abscisas), de acuerdo al algoritmo descrito en el Anexo 4-1. Se muestra que la red tenía inicialmente un coeficiente de uniformidad de presiones cercano a 0,35 y que hasta el segundo cambio la disminución fue despreciable en el coeficiente de uniformidad de presiones. Ya con el tercer cambio ocurrió una desmejora un poco más apreciable.

Figura 32

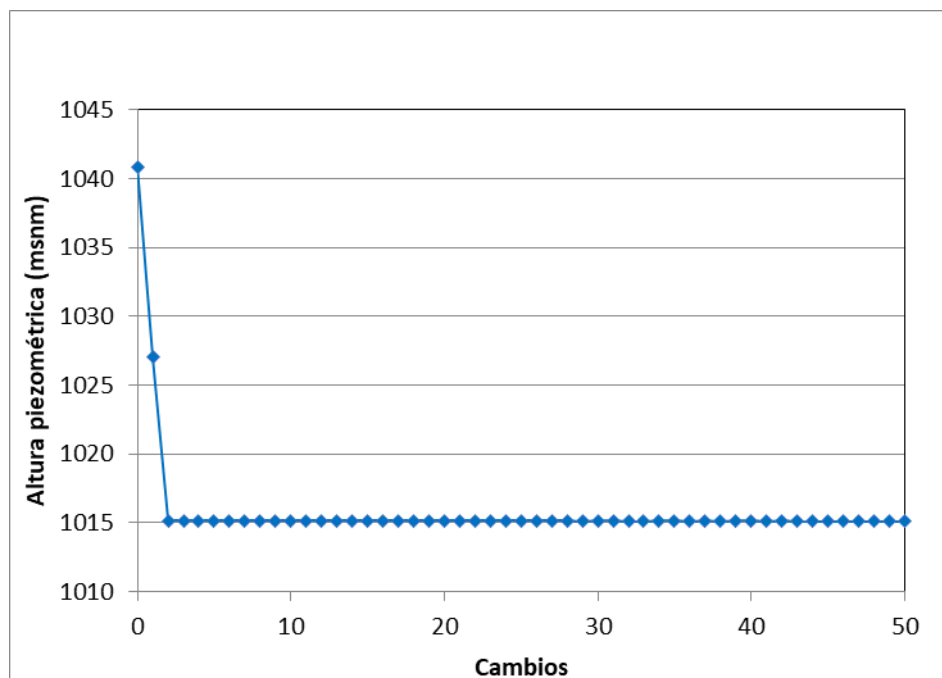
Presión promedio vs número de iteraciones (o cambio) para el escenario óptimo elegido.



La figura anterior muestra la evolución de la presión promedio del Distrito Morro Alto (eje de las ordenadas) conforme se realizan cambios (eje de las abscisas), de acuerdo con el algoritmo descrito en el Anexo 4-1. Se muestra que la red tenía inicialmente una presión promedio cercana a 54 m.c.a y que el segundo cambio implicó la disminución más representativa en la presión promedio. A partir de allí los cambios en tuberías no implicaron mayor disminución en la presión promedio del distrito.

Figura 33

Cota Embalse vs número de iteraciones (o cambio) para el escenario óptimo elegido.



La figura anterior muestra la evolución de la cota o elevación del embalse en el modelo del distrito Morro Alto (eje de las ordenadas) conforme se realizan cambios (eje de las abscisas), de acuerdo al algoritmo descrito en el Anexo 4-1. Se muestra que luego de dos cambios ya fue posible reducir significativamente la elevación del embalse. Es necesario aclarar que la disminución de la elevación del embalse es un mecanismo para mostrar el potencial descenso en la presión de comando, que se puede alcanzar en el distrito estudiado.

El salto abrupto observado en las gráficas se dio por la siguiente razón:

En el estado inicial del distrito, las presiones de comando del distrito fueron iguales a las presiones de tarado de las reguladoras Alarcón (26,01 m.c.a.) y Concordia (28,88 m.c.a.). En las primeras iteraciones, la bajada del nivel del embalse causó una presión aguas abajo de las reguladoras aún mayor a las presiones de tarado, y por lo tanto las presiones de comando seguían

siendo las mismas. En la iteración 3, el nivel del embalse fue tal que causó una presión aguas abajo de las reguladoras menor a la presión de tarado y por lo tanto las reguladoras quedaron inactivas y las presiones de gobierno del distrito ya no fueron 26,01 y 28,88 (las presiones de tarado), sino las dadas por la nueva elevación del embalse.

Seguidamente se insertó el escenario y cambio óptimo en el modelo hidráulico con el fin de verificar el comportamiento y calcular las nuevas estadísticas del distrito, incluyendo el comportamiento en las válvulas reguladoras que comandan el distrito (Alarcón y Concordia,). El escenario óptimo hizo que las reguladoras quedaran inactivas, pues se bajó tanto la elevación del reservorio, que ya no se hace necesario la regulación (Tabla 22). Estas nuevas presiones aguas abajo de las reguladoras (ahora inactivas) son de 13,26 m.c.a. (Alarcón) y 25,79 m.c.a. (Concordia), para la condición de escenario óptimo (Tabla 23).

Tabla 22

Estadísticas finales (después) del distrito Morro Alto

VARIABLE	Distrito Morro Alto - Con acciones Resiliencia		
Hora de Máx. / Media / Mín. Demanda	11:15	19:45	3:00
Caudal Demandado (LPS) en Máx. / Media / Mín Demanda	88,72	73,65	53,84
Presión Promedio en Máx. / Media / Mín. Demanda (m.c.a.) *En nodos de consumo	44,17	44,90	45,66
Presión máxima en Máx. / Media / Mín. Demanda (m.c.a.) *En nodos de consumo	138,32	140,17	142,12
Presión mínima en Máx. / Media / Mín. Demanda (m.c.a.) *En nodos de consumo	16,11	16,15	16,20
Rango de Presiones en Máx. / Media / Mín. Demanda (m.c.a.) *En nodos de consumo	122,21	124,02	125,92

Tabla 23

Operación final (después) de las válvulas reguladoras de comando del distrito Morro Alto

VARIABLE	Reguladora Alarcón - Con reservorio bajado			Reguladora Concordia - Con reservorio bajado		
Hora de Máx. / Media / Mín. Demanda	11:15	19:45	3:00	11:15	19:45	3:00
Presión aguas arriba (m.c.a.) en Máx. / Media / Min Demanda	12,71	12,18	13,26	24,70	25,23	25,79
Presión aguas abajo (m.c.a.) en Máx. / Media / Min Demanda	12,71 Inactiva	12,18 Inactiva	13,26 Inactiva	24,70 Inactiva	25,23 Inactiva	25,79 Inactiva

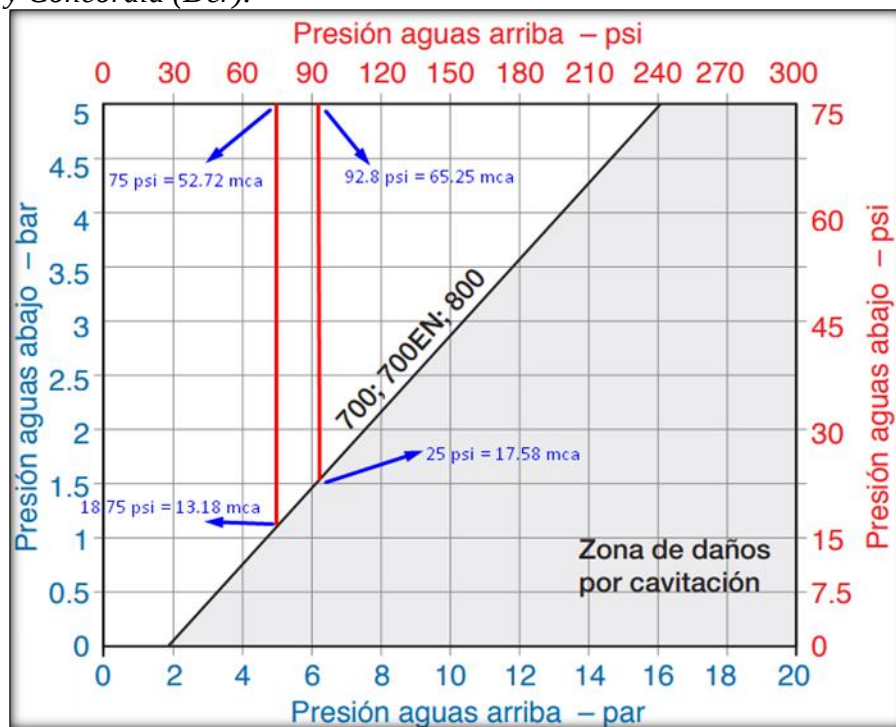
Cabe recordar que el descenso de la elevación del embalse en el modelo hidráulico es un mecanismo para mostrar el potencial descenso en la presión de comando, que se puede alcanzar en el distrito estudiado. Realmente no se propone la reubicación del tanque, sino la instalación de una válvula reguladora inicial de comando que simule la condición de bajada del embalse.

Con los nuevos valores de presión aguas abajo de las reguladoras (13,26 m.c.a. en Alarcón y 25,79 m.c.a. en Concordia), se procedió enseguida a verificar si dichos valores pueden ser establecidos como nuevas presiones de tarado en las reguladoras mencionadas. De acuerdo con el diagrama de cavitación de la válvula reguladora de presión Bermad 700 (instalada en Alarcón y Concordia) y como se puede ver en la siguiente figura, se verificó que estas nuevas presiones pueden efectivamente establecerse como nuevas presiones de tarado en las reguladoras, en vez de instalarse una válvula reguladora inicial de comando que simule la condición de bajada del reservorio. Para el caso de la reguladora Alarcón, la presión aguas arriba (con el embalse en su elevación original) es de 52,72 m.c.a., y para el caso de Concordia es 28,88 m.c.a. Con esos valores de presión aguas arriba se ingresa al diagrama de la válvula en el eje horizontal, y se traza enseguida una vertical buscando interceptar la línea que divide la zona de cavitación (gris)

de la zona factible (blanca). Obtenido el punto, se identifica el correspondiente valor del eje vertical, que representa la mínima presión de tarado posible. Para el caso de Alarcón se obtuvo una presión aguas abajo mínima de 13,18 m.c.a. y para Concordia de 17,58 m.c.a., y lo requerido es 13,26 m.c.a. y 25,79 m.c.a. respectivamente, encontrando así que es posible establecer éstas últimas presiones de tarado. Siendo así, se insertó entonces un escenario análogo al escenario óptimo, en el cual, en vez de bajar la elevación del reservorio, se colocan como nuevas presiones de tarado las mencionadas anteriormente.

Figura 34

Verificación de las nuevas presiones mínimas de tarado posibles (abajo) en las reguladoras Alarcón (Izq.) y Concordia (Der).



Con esta solución, el costo de la intervención para reducir la presión es teóricamente nulo, debido a que no es necesaria la instalación de nuevas válvulas reductoras, sino más bien la configuración de nuevas presiones de tarado en las reguladoras existentes. De otro lado, el costo

de la intervención en infraestructura por análisis de uniformidad de presiones y confiabilidad hidráulica corresponde a la renovación de un corto tramo de tubería, costo que se estimó en COP \$101.247.001.

Finalmente se obtuvieron los siguientes valores:

$P_0 = 53,48$ m.c.a. = presión promedio diaria en los nodos de consumo para el estado antes de intervención (gestión de la presión)

$P_1 = 44,87$ m.c.a. = presión promedio diaria en los nodos de consumo para el estado después de intervención (gestión de la presión).

Ahora, de acuerdo con Morrison (2007) la eficiencia en la gestión de la presión se puede cuantificar utilizando la siguiente ecuación

$$Q_{f(1)} = Q_{f(0)} \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^x \quad \text{Ecuación 28}$$

$Q_{f(0)}$ es el caudal de fuga inicial a la presión P_0

$Q_{f(1)}$ es el caudal de fuga inicial a la presión ajustada P_1

P_0 es la presión promedio inicial en la zona

P_1 es la presión promedio ajustada en la zona

x es el exponente de fuga.

Como regla general la proporción de la reducción de la presión equivale aproximadamente a la proporción de reducción del flujo de fuga en las grandes redes, ya que en éstas el exponente de fuga promedio tiende a 1,0 de acuerdo con Thornton y Lambert (2005).

La eficiencia en la gestión de la presión para el distrito Morro Alto se resume en la Tabla 24.

Tabla 24

Estimación de la eficiencia de la gestión de la presión en el distrito Morro Alto

$x =$	1
$P_o =$	53,48 m.c.a.
$Q_o =$	13,20 LPS
$P_1 =$	44,87 m.c.a.
$Q_1 =$	11,08 LPS
$n\%$	16,06
$\Delta Q =$	2,12 LPS
Volumen día (agua que ya no se fugaría) =	184 m3
Volumen año (agua que ya no se fugaría) =	67000 m3

De lo anterior resultó notorio que la eficiencia de la implementación de dichas labores es del 16,06% lo que traduce que un volumen de (67000 m³ / año) podrá dejar de ser captado en vez de ser “desperdiciado”.

1.15 Estimación de relaciones beneficio/costo

Finalmente, se contempló el costo y respectivo beneficio de la implementación de los proyectos de renovación o reposición de medidores y tuberías expuestos en los capítulos 1.13 y 1.14.

Partiendo de la expresión de pérdidas anuales PA (COP) consignada en el capítulo 1.3.7, se tuvo un valor de pérdidas consignado en la Tabla 25.

Tabla 25

Estimación del valor de pérdidas anuales de agua para el distrito Morro Alto

PA (COP)	1.701.496.636
Qpr (m3/año)	416144
Qaunf + Qpa (m3/año)	681492
Cv (COP/m3)	2283
Cp (COP/m3)	350

Nota: Los valores de Cv (costo de ventas) y Cp (costos de producción) fueron suministrados por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga para el año 2019.

Con base en este valor, se estableció que el máximo benéfico económico teórico posible para la reducción de perdidas técnicas fue de COP \$ 145.650.400 de pérdidas aparentes y agua autorizada no facturada de COP \$ 1.555.846.236. Sin embargo, por múltiples factores económicos y técnicos, la reducción total de pérdidas en un sistema de distribución de agua potable no es posible (Fallis, Hübschen, et al, 2011).

1.15.1 Beneficio/costo por reposición de micromedidores (reducción de pérdidas aparentes)

Partiendo de los costos medios de reposición de medidores del amb S.A. E.S.P. para el distrito morro alto (COP \$ 273.500) y costo de venta (2.283 COP/m³) para el año 2019 y el ahorro potencial de pérdida de agua por sub medición para los suscriptores del proyecto de reposición del capítulo 1.13, se desarrolló el flujo de caja neto y la relación beneficio/costo de cada periodo para el proyecto de reposición de micromedidores.

Tabla 26

Flujo de caja neto y relación beneficio costo para el proyecto de reposición de micromedidores.

Periodo (Años)	1	2	3	4	5
Costo (COP \$)	207039500	206492500	206766000	206766000	206219000
Beneficio (COP \$)	108191714	243308847,3	494902507,8	844780759,9	1251204118
Flujo Neto de Caja	-98847786	36816347	288136508	638014760	1044985118
Beneficio/Costo	2,848				

Nota: El ahorro o beneficio se estimó mediante la diferencia del volumen anual de cada suscriptor del plan de reposición y volumen promedio anual según su tipo uso, más el ahorro del periodo anterior. Siendo así, un ahorro total de 1.288.825 m³ en cinco (5) años.

Posteriormente a la culminación del proyecto, el volumen de ahorro anual es de 548.053 m³, inferior al volumen anual de pérdidas del sector de 1.097.636 m³, inferior a la suma del volumen anual de agua autorizada no facturada Q_{AuNF} y el volumen anual de pérdidas aparentes Q_{PA} de 681.492 m³ como se aprecia en la Tabla 25.

1.15.2 Beneficio/costo por proyectos de reposición de tuberías (reducción de pérdidas reales)

Con base en la función consignada en el capítulo 1.3.7, se estimó el costo de reposición de los tramos comprendidos por el capítulo 1.14 con base en la función de costo aproximada:

$$C_j = 29744 D_j^{0.6121} L_j \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde C_j es el costo en pesos (\$) de implantación de una tubería de longitud L_j en metros (m) y diámetro nominal D_j en milímetros (mm).

El costo de implantación se estimó en COP \$ 761.295.515 para tuberías con probabilidades de falla entre 0,21 y 0,40 (ver Figura 25) y de COP \$101.247.001 de costo para el mejoramiento de la resiliencia y la uniformización de las presiones del sistema.

Partiendo de que el costo de producción del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga en el distrito morro alto para el año 2019 fue de (350 COP/m³), se estimó el beneficio anual del volumen ahorrado por reposición de tuberías de gestión de la presión por COP \$ 23.450.000 (67,000 m³ que ya no se fugarían) y el beneficio anual del volumen ahorrado por reposición de tuberías con una probabilidad baja de falla por COP \$ 15.053.550 (153 m³ que ya no se fugan + 10 daños menos).

Con base en lo expuesto anteriormente, se desarrolló el flujo de caja para un periodo de cinco (5) años, únicamente del proyecto de reposición de tuberías por gestión de la presión, ya que claramente el proyecto de reposición de tuberías con baja probabilidad de falla fue el más costoso y el menos beneficioso para el periodo en mención.

Tabla 27

Flujo de caja neto y relación beneficio costo para el proyecto de reposición de tuberías

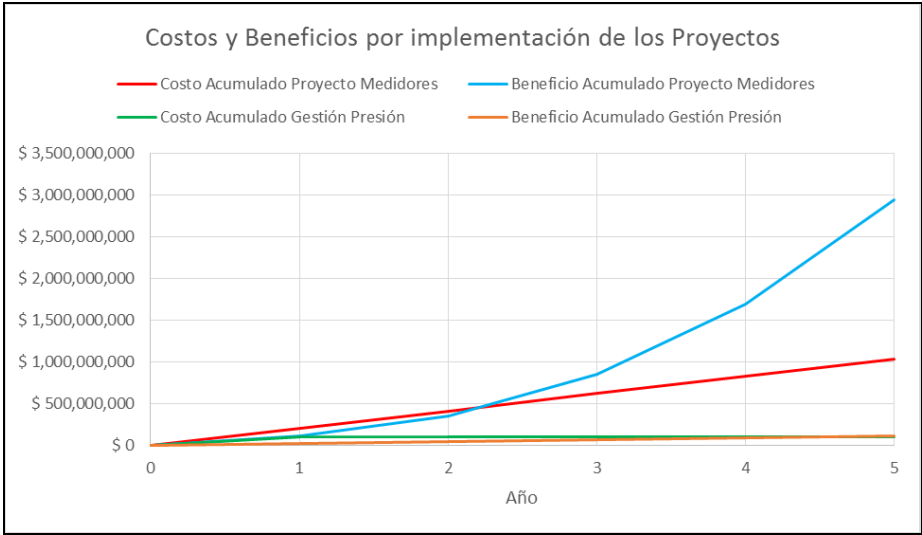
Periodo (Años)	1	2	3	4	5
Costo (COP \$)	101247001	0	0	0	0
Beneficio (COP \$)	23450000	23450000	23450000	23450000	23450000
Flujo Neto de Caja	-77797001	23450000	23450000	23450000	23450000
Beneficio/Costo			1,158		

1.16 Discusión de Resultados

Los resultados expuestos en la Tabla 26 y la Tabla 27 se muestran en la Figura 35.

Figura 35

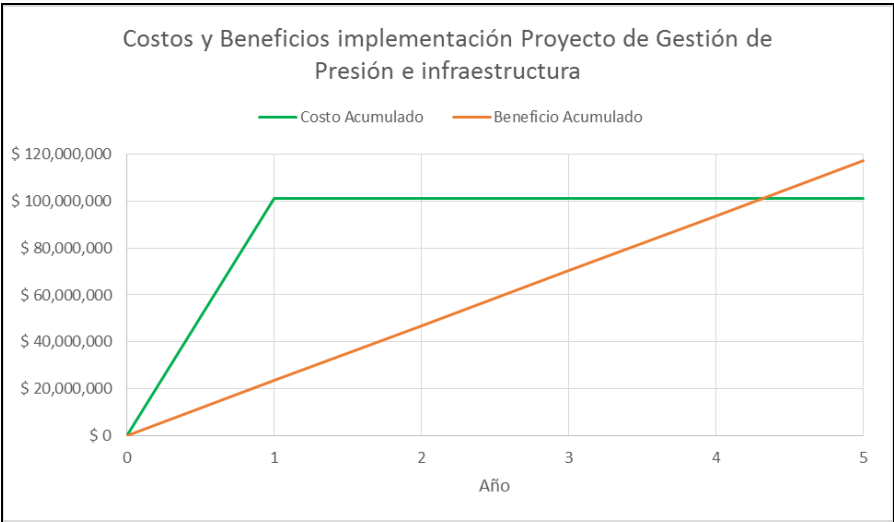
Costos y Beneficios por la implementación de los proyectos resultantes.



Las curvas del proyecto de gestión de la presión e infraestructura se presentan en la Figura 36 mucho más claras:

Figura 36

Costos y Beneficios por la implementación del proyecto de gestión de presión e infraestructura.



Ahora, los resultados de la implementación de ambos proyectos en cuestión, en cuanto a costos y beneficios, se resume en la Tabla 28 y Figura 37.

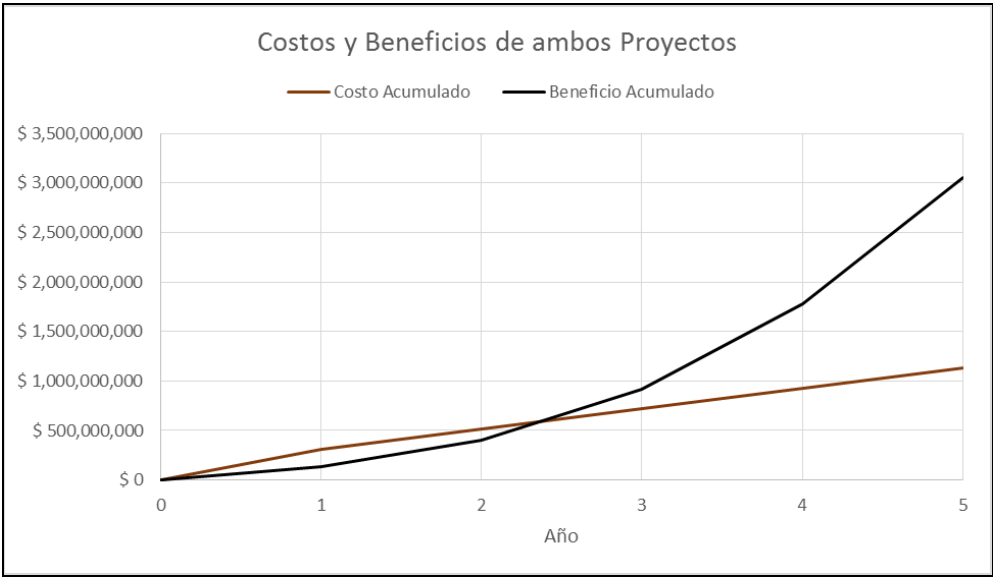
Tabla 28

Flujo de caja neto y relación beneficio costo para ambos proyectos resultantes

Periodo (Años)	1	2	3	4	5
Costo (COP)	308286501	206492500	206766000	206766000	206219000
Beneficio (COP)	131641714	266758847	518352508	868230760	1274654118
Flujo Neto de Caja	-176644787	60266347	311586508	661464760	1068435118
Beneficio/Costo	2,697				

Figura 37

Costos y Beneficios por la implementación de ambos proyectos.



Además de las estimaciones de costos y beneficios, fue estimada la evolución del IANC y otras magnitudes de importancia (Tabla 29 a Tabla 31).

Tabla 29

Estimaciones de algunas magnitudes físicas - implementando Proyecto de reposición de Medidores.

Periodo (Años)	0	1	2	3	4	5
Suscriptores	19424	20117	20834	21577	22347	23144
Producción	3724443 m3	3811641	3903937	4001966	4107950	4223857
Facturación	2626807 m3	2764958	2919676	3130758	3392185	3687412
Facturación/Suscriptor	135 m3	137 m3	140 m3	145 m3	152 m3	159 m3
Pérdidas	1097636 m3	1046684 m3	984261 m3	871208 m3	715765 m3	536445 m3
IANC	29,47%	27,46%	25,21%	21,77%	17,42%	12,70%
Pérdidas Técnicas	11,8%	11,8%	11,8%	11,8%	11,8%	11,8%
Ahorro Rep. Medidores		47390 m3	59184 m3	110203 m3	153254 m3	178022 m3

Tabla 30

Estimaciones de algunas magnitudes físicas - implementando Proyecto de gestión de presión e infraestructura

Periodo (Años)	0	1	2	3	4	5
Suscriptores	19424	20117	20834	21577	22347	23144
Producción	3724443 m3	3744641	3767571	3793286	3821843	3853302
Facturación	2626807 m3	2717568	2811464	2908605	3009102	3113071
Facturación/Suscriptor	135 m3	135 m3	135 m3	135 m3	135 m3	135 m3
Pérdidas	1097636 m3	1027074 m3	956107 m3	884681 m3	812742 m3	740231 m3
IANC	29,47%	27,43%	25,38%	23,32%	21,27%	19,21%
Pérdidas Técnicas	11,8%	11,0%	10,2%	9,3%	8,5%	7,7%
Ahorro Gestión Presión		67000 m3	67000 m3	67000 m3	67000 m3	67000 m3

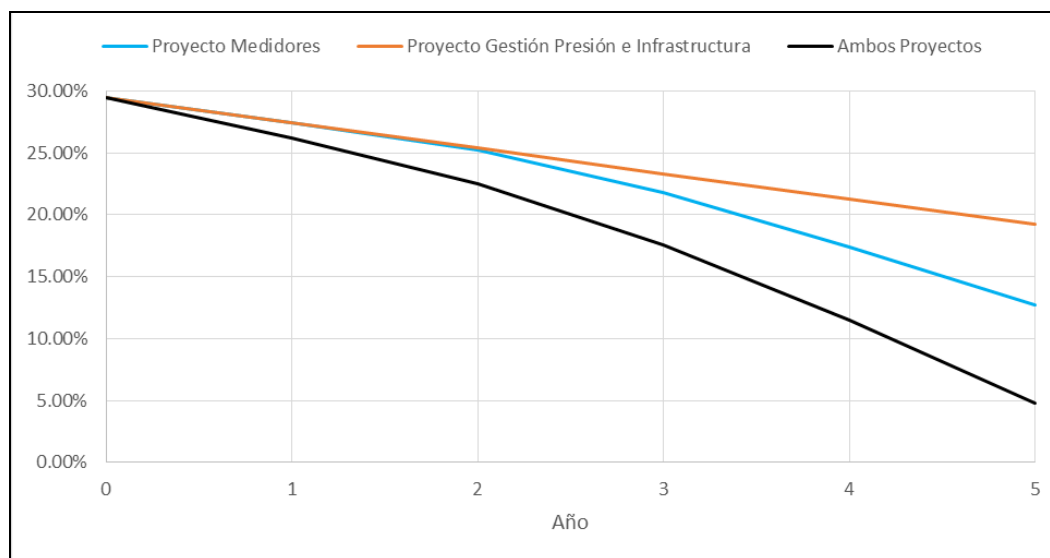
Tabla 31

Estimaciones de algunas magnitudes físicas – implementando ambos proyectos

Periodo (Años)	0	1	2	3	4	5
Suscriptores	19424	20117	20834	21577	22347	23144
Producción	3724443 m3	3744641	3768947	3797722	3832348	3873849
Facturación	2626807 m3	2764958	2919676	3130758	3392185	3687412
Facturación/Suscriptor	135 m3	137 m3	140 m3	145 m3	152 m3	159 m3
Pérdidas	1097636 m3	979684 m3	849271 m3	666964 m3	440163 m3	186437 m3
IANC	29,47%	26,16%	22,53%	17,56%	11,49%	4,81%
Pérdidas Técnicas	11,8%	10,5%	9,0%	7,0%	4,6%	1,9%
Ahorro Rep. Medidores		47390 m3	59184 m3	110203 m3	153254 m3	178022 m3
Ahorro Gestión Presión		67000 m3	67000 m3	67000 m3	67000 m3	67000 m3

Figura 38

Evolución estimada del IANC por implementación de proyectos.



Los principales resultados del modelo de reducción de pérdidas propuesto fueron los siguientes:

- 1) Se estimó que el proyecto de reducción de pérdidas comerciales del distrito estudiado, a través de la reposición priorizada de micromedidores, tiene un costo total de COP \$

1.033.283.000, un tiempo de retorno de la inversión de entre 2 y 3 años, una relación beneficio/costo de 2,85 al cabo de 5 años y un aporte a la reducción del IANC en 16,77 %.

2) De otro lado, se estimó que el proyecto de reducción de pérdidas técnicas del distrito estudiado, a través de la reposición priorizada de tuberías y gestión de la presión, tiene un costo total de COP \$ 101.247.001 (11% del costo del proyecto de medidores), un tiempo de retorno de la inversión de entre 4 y 5 años, una relación beneficio/costo de 1.16 al cabo de 5 años y un aporte de 10,26 % de reducción al IANC.

3) Se estimó que el proyecto total de reducción de pérdidas del distrito estudiado tiene un costo total de COP \$ 1.134.530.001, un tiempo de retorno de la inversión de entre 2 y 3 años, una relación beneficio/costo de 2,70 al cabo de 5 años y un aporte a la reducción de IANC en 24,66%.

Con lo anterior, se puede afirmar que ambos proyectos resultan muy atractivos y viables. El proyecto de reducción de pérdidas técnicas se presenta mucho más eficiente en la reducción del IANC y el proyecto de reducción de pérdidas comerciales presenta mayor Beneficio/Costo y tiempo de retorno de inversión menor. En el proyecto de reducción de pérdidas comerciales, cada punto porcentual que se reduce el IANC tiene un costo de 61,6 millones, mientras que el mismo costo en el proyecto de reducción de pérdidas técnicas es de 9,9 millones. No obstante, ambos proyectos resultan económicamente viables, con períodos de retorno de inversión bajos y gran reducción del IANC. Según Liemberger & Wyatt (2019), referentes internacionales en la temática de agua no contabilizada, los tiempos usuales de amortización de las inversiones en programas de reducción de pérdidas, están entre 7 y 10 años, lo cual muestra inicialmente que el modelo propuesto es atractivo en cuanto a este ítem. Respecto a la magnitud de la reducción del IANC, la aplicación de ambos proyectos reduce en 24,66 % el IANC, pasando de 29,47% a 4,81

% al cabo de 5 años, una reducción tan grande y prometedora que obligó al autor a realizar una revisión minuciosa de los cálculos, los cuales finalmente validaron esta estimación. Evidentemente es un muy buen valor, que puede alcanzarse en pequeñas zonas como el distrito estudiado (19424 suscriptores), pero no resulta prudente compararse con gestiones sobre toda una ciudad donde las acciones comprenden muchas más actividades (no sólo reemplazo de medidores, renovación de tuberías y gestión de presión) y donde también parece haber demasiada variabilidad. Por ejemplo, la Ciudad de Teplice en república Checa, apoyada por expertos daneses en agua (Dinamarca es ejemplo y referente mundial en reducción de pérdidas de agua con un 7% de pérdidas en promedio), redujo sus pérdidas de agua de 34 % a 23 % en 6 meses con un retorno de la inversión en apenas 1 año. Las acciones realizadas fueron, la sectorización del sistema en 5 distritos y la gestión de la presión (Pedersen & Klee, 2013). Volviendo al caso de Dinamarca, con su experiencia y reputación en el tema, las empresas danesas han ayudado con éxito a ciudades y prestadores del servicio de agua de todo el mundo a reducir las pérdidas de agua, llegando incluso a afirmar que, reducir las pérdidas a la mitad es generalmente un objetivo muy alcanzable dentro de uno a dos años (Pedersen & Klee, 2013). La Ciudad de Seremban en Malasia por ejemplo, también con ayuda de expertos daneses, pudo reducir su nivel de pérdidas del 39 % al 21 % en 18 meses y con un período de retorno de inversión de 26 meses (Pedersen, J. B., & Klee, P., 2013). En el ámbito regional y nacional fue difícil encontrar experiencias en reducción de pérdidas que muestren valores de reducción de IANC en el tiempo, así como períodos de retorno de inversión. Una de las pocas experiencias encontradas a nivel nacional es la empresa de servicios públicos de Cali -EMCALI-, quien puso en marcha un denominado Plan de Recuperación de Agua (PRA) en toda su área de prestación del servicio con una inversión de COP \$ 343.000 millones para ser desarrollado en el período

2017-2020 que busca disminuir el IPUF de 20,59 a 16,82 (EMCALI, 2017). Este plan fue resultado de la consultoría No. 300-GAA-CCT-0622-2016 suscrita entre EMCALI y la Universidad ICESI. Al consultar dicho contrato, no hubo acceso detallado a dicho plan (actividades, costos, beneficios, reducción proyectada de pérdidas, retorno de inversión, etc.); tan solo se obtuvo el contrato.

Conclusiones

El modelo de gestión desarrollado y probado puede derivar finalmente en proyectos de reposición de medidores, gestión de la presión y gestión de la infraestructura, tres medidas muy usuales, efectivas y frecuentemente empleadas en los programas de reducción de pérdidas.

A partir de la aplicación del modelo de gestión propuesto al amb S.A. E.S.P., el proyecto de reposición de medidores del análisis estadístico multivariado arrojó que, para un IR con valores entre 0,8 y 0,6, se obtuvo un total de 3.778 medidores cuya reposición implica un beneficio de COP \$ 2.942.387.948 en un periodo de cinco (5) años con un costo total de COP \$1.033.283.000.

Se estimó un ahorro anual en volumen por la reducción de pérdidas aparentes tras la culminación de la reposición de micromedidores de 548.053 m³, que fue el 49,93% de las pérdidas anuales del distrito morro alto. A partir de este volumen y la relación beneficio costo de la implementación de dicho proyecto (beneficio/costo igual a 2,848), se consideró que el distrito estuvo lejano a su nivel económico de pérdidas aparentes, por lo que la proyección de dicho proyecto fue de alta relevancia para la reducción de las perdidas del sistema.

El proyecto de reposición de tuberías con baja probabilidad de falla es inviable económicamente, ya que el costo total de dicho proyecto fue de COP \$ 761.295.515 para un beneficio de COP \$ 2.661.120 por año y un ahorro estimado de volumen anual de fugas por daños de 7.603,2 m³, el cual correspondió al 0,69% de las pérdidas anuales del distrito Morro Alto. Contrariamente ocurrió con el proyecto de reposición de tuberías por gestión de la presión, el cual tuvo un costo estimado de COP \$ 101.247.001 para un beneficio en un periodo de cinco (5) años de COP \$ 117.250.000, una relación beneficio costo de 1,158 y un ahorro estimado de

volumen anual después de la culminación del proyecto de 67.000 m³, el cual perteneció al 6,10% del volumen anual de pérdidas del distrito morro alto.

Para el caso estudiado, los proyectos resultantes de la aplicación del modelo de reducción de pérdidas desarrollado resultan económica y técnicamente muy viables, con períodos de retorno de inversión bajos (de menos de 5 años) y con gran reducción del IANC. Con esto, el modelo de reducción de pérdidas desarrollado se muestra muy prometedor y con ello se presenta una adecuada contribución a la reducción de pérdidas de manera viable, así como al desarrollo de modelos de reducción de pérdidas similares.

Un importante impacto directo de la reducción de pérdidas viene del hecho que las pérdidas inciden directamente sobre la tarifa del servicio de acueducto. A mayores pérdidas, mayores costos para la empresa que finalmente se traducen en mayores tarifas para el usuario. No obstante, pérdidas por encima de cierto nivel máximo reglamentario no pueden ser traducidas en la tarifa. Por lo que se claramente son muchos los eventuales impactos como por ejemplo mayores ingresos, mayor satisfacción de los clientes y mayor competitividad.

Otro impacto directo de la aplicación del presente modelo de reducción de pérdidas propuesto y que se demostró con los resultados obtenidos es planear inversiones eficientes para las empresas prestadoras del servicio de acueducto. Lo anterior se debe a que en términos generales y tal y como se discutió al inicio del presente trabajo, pocas empresas tienen éxito en reducir las pérdidas a niveles financieramente viables, dada la complejidad misma del problema. Esto finalmente se traduce en mayor rentabilidad.

Cualquier empresa se apoye en el presente modelo de reducción de pérdidas propuesto, para la inversión de sus recursos, se recomienda que se desarrolle en aquel(los) primer(os) distrito(s) hidráulico(s) que muestre(n) viabilidad técnica y financiera.

En cuanto a las limitaciones de la aplicación del modelo de reducción de pérdidas desarrollado, la principal de ellas es el requerimiento de los insumos (catastro de redes, catastro o registro de daño, catastro de suscriptores o medidores, modelo hidráulico) y el requisito que el sistema a analizar se encuentre sectorizado; pues a pesar de ser requisitos exigidos para todos los prestadores, la realidad muestra que estos datos sólo están disponibles completamente en las empresas prestadoras de las grandes ciudades, más no para municipios y ciudades intermedias o pequeñas. No obstante, el modelo de propuesto precisamente se ha desarrollado bajo la premisa que, cuanta más información y datos estén disponibles, más fácil será priorizar las inversiones, reducir las pérdidas y asegurar un rápido retorno de la inversión. Los buenos resultados obtenidos validan dicha premisa.

Es relevante la aclaración de el grado de incertidumbre que contempla la estimación del beneficio por la reposición de medidores, ya que se asume el promedio del consumo según su tipo de uso, como el esperado en el medidor posteriormente a su reposición.

Otra importante limitación es que el modelo no contempla aspectos importantes como la elaboración del balance hídrico y el cálculo del nivel económico de pérdidas (NEP), por cuanto el modelo de reducción de pérdidas propuesto podría parecer incompleto.

Recomendaciones

Desarrollar la priorización de distritos mediante la consideración cuantitativa del índice de agua no contabilizada, además de los daños, mejoraría sustancialmente la eficiencia del presente modelo de reducción de pérdidas, ya que se direccionaría su aplicación a aquellos distritos que tengan condiciones desfavorables cuantificadas de daños y pérdidas conjuntamente. Esto porque si bien el nivel de pérdidas está involucrado en la metodología, se hace de manera cualitativa.

Incorporar un mapa de amenaza vulnerabilidad y riesgo por incendio para la proyección de hidrantes e instalación de medidores en los hidrantes colindantes.

Establecer la clase de medidor de los suscriptores (A, B, C o D) y su tipo de funcionamiento (velocidad, volumétrico, electromagnético, etc.) para la incorporación en el análisis estadístico multivariado.

Considerar la variable de diferencias de presión diarias, para el análisis estadístico bayesiano.

Incorporar al algoritmo de uniformización de presiones y confiabilidad hidráulica, la solución más económicamente viable.

Calificar la valoración económica de los proyectos resultantes mediante otros indicadores como el valor presente neto (VPN) o la tasa interna de retorno (TIR).

Referencias Bibliográficas

- amb S.A ESP. (2017). INFORME DE GESTIÓN 2016.
http://www.amb.com.co/Indicadores/Archivos/INFORME_SUST_2016.pdf
- amb S.A ESP. (2018). INFORME DE GESTIÓN 2017.
<http://www.amb.com.co/DocumentoInfo/INFORME2017.pdf>
- amb S.A ESP. (2018). INFORME DE GESTIÓN AÑO 2018.
http://www.amb.com.co/DocumentoInfo/INFORME_GESTION_2018.pdf
- amb S.A ESP. (2020). GESTIÓN INTEGRAL 2019.
http://www.amb.com.co/DocumentoInfo/GESTION_INTEGRAL_2019.pdf
- Araque, D. (2006). Optimización de redes con el fin de uniformizar el estado de presiones (Tesis de maestria). Universidad de los Andes.
- Araque, D., & Saldarriaga, J. (2005). Water distribution network operational optimization by maximizing the pressure uniformity at service nodes. Impacts of Global Climate (pp. 1-10).
- Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos y Comunicaciones. ANDESCO. Camara de Acueducto y Alcantarillado. (2012). Informe de actualizacion de indicadores - Sector de servicio de agua potable y alcantarillado y saneamiento básico. Colombia.
- Athan, T. W., & Papalambros, P. Y. (1996). A note on weighted criteria methods for compromise solutions in multi-objective optimization. Engineering optimization, 27(2), 155-176.

- Ávila Rangel, H., & González Barreto, C. (2006). Determination of parameters of leaks for longitudinal faults, in connections and PVC pipe joints. *Revista de Ingeniería*, (24), 15-22.
- Banco Mundial. (2018). *América latina: ¿Por qué las empresas de agua y saneamiento intentan ahorrar energía?* Obtenido de <http://www.bancomundial.org/es/news/feature/2013/09/03/latin-america-water-loss-energy-efficiency>
- Bernardo, J. M., & Smith, A. F. (2009). *Bayesian theory (Vol. 405)*. John Wiley & Sons.
- Castañeda, L. F. (2015). Modelo de gestión para el mantenimiento de tuberías en redes de distribución de agua potable (Tesis de Maestría). Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Comisión de regulación de agua y saneamiento básico. (1995). Resolución CRA 17 de 1995. Colombia.
- Comisión de regulación de agua y saneamiento básico. (2001). Resolución CRA 151 de 2001. Colombia.
- Comisión de regulación de agua y saneamiento básico. (24 de Junio de 2014). Resolución CRA 688 de 2014. Colombia.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). Obtenido de <https://sitios.dane.gov.co/cnpv/app/views/informacion/fichas/68001.pdf>
- Díaz Porras, Karen P. (2019). El oro azul y su gestión de pérdidas en Colombia. *Módulo Arquitectura CUC*, 23, 9-22.
- EMCALI (2017). Plan de Recuperación de Agua. EMCALI. Obtenido de <https://www.emcali.com.co/web/acueducto/plan-de-recuperacion-de-agua>

- ESRI. (2018). *¿Qué es una puntuación z? ¿Qué es un valor P?* Obtenido de <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/what-is-a-z-score-what-is-a-p-value.htm>
- ESRI. (2018). *autocorrelación espacial incremental*. Obtenido de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/incremental-spatial-autocorrelation.htm>
- ESRI. (2018). *Que es un Shapefile*. Obtenido de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm>.
- Fallis, P., Hübschen, K., Oertlé, E., Ziegler, D., Klingel, P., Knobloch, A., . . . Laures, C. (2011). *Guía para la reducción de las pérdidas de agua - Un enfoque en la gestión de la presión*. Corporación alemana para la cooperación internacional (GIZ) GmbH.
- Farley, M. (2001). *Leakage Management and Control*. WHO.
- Fontana, M. E., & Morais, D. C. (25 de Julio de 2016). *Decision model to control water losses in distribution networks*. Production, 26(4).
- Gabriel, G. (2002). *Diseño óptimo de redes bajo ambiente de fugas* (Doctoral dissertation, Tesis de pregrado. Universidad de los andes).
- Hair, J., Anderson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. C. (1999). *Análisis multivariante*, 5ta edición. Madrid, España: Prentice Hall Iberia.
- International Water Association. (2018). *Reduction of Non-Revenue Water Around the World*. Obtenido de <http://www.iwa-network.org/reduction-of-non-revenue-water-around-the-world/>

- Kampstrup. (2018). *Agua no registrada. Conocimiento del agua no registrada y trabajo proactivo en este campo*. Obtenido de https://www.kamstrup.com/es-es/-/media/files/pdf/white-papers/non-revenue-water-2018/non_revenue_water_es.pdf
- Kampstrup. (2018). *Soluciones de medición de agua*. Obtenido de <https://www.kamstrup.com/es-es/soluciones-de-medicion-de-agua/temas/precisi%C3%B3n-del-contador-de-agua>
- Kleiner, Y., & Rajani, B. (2001). Comprehensive review of structural deterioration of water mains. statistical models. *Urban water*, 3(3), 131-150.
- Lambert, A. O., & Hirner, W. (2000). Losses from Water Supply Systems: Standard Terminology and Recommended Performance Measures. International Water Association.
- Lambert, A., Trow, S., Merks, C., Charalambous, B., Donnelly, A., Galea, S., . . . Schipper, D. (2015). EU Reference document Good Practices on Leakage Management WFD CIS WG PoM. European Commission.
- Liemberger, R., & Wyatt, A. (2019). Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Supply*, 19(3), 831-837.
- Marler, R. T., & Arora, J. S. (2004). Survey of multi-objective optimization methods for engineering. *Structural and multidisciplinary optimization*, 26(6), 369-395.
- Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. (2014). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico - RAS. *Título B - Sistemas de acueducto*. Colombia.
- Ministerio de vivienda, ciudad y territorio. (Junio de 2017). Resolución 0330 de 2017. Colombia.
- Mitchell, A. (2005). *The ESRI Guide to GIS Analysis, Volumen 2*. ESRI Press.

- Morrison, J., Stephen, T., & Rogers, D. (2007). District metered areas Guidance notes. London: International Water Association.
- Morrison, J., Tooms, S., & Hall, G. (2007). Sustainable District Metering. Bucarest, Rumania: Proceedings of IWA International Specialised Conference "Water loss 2007".
- Mutikanga, H. E., Sharma, S. K., & Vairavamoorthy, K. (2013). Methods and tools for managing losses in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 139(2).
- ORD, J. K., & GETIS, A. (1995). Local spatial autocorrelation statics: distributional issues and application. *Geographical analysis*.
- Open International. (2017). *El control de agua no contabilizada, un reto para las empresas de acueducto y alcantarillado*. Obtenido de <https://www.openintl.com/es/el-control-de-agua-no-contabilizada-un-reto-para-las-empresas-de-acueducto-y-alcantarillado/>
- Pedersen, J. B., & Klee, P. (2013). Meeting an increasing demand for water by reducing urban water loss—Reducing Non-Revenue Water in water distribution. In *The Rethink Water network and Danish Water Forum White Papers*, Copenhagen, Denmark
- Pilcher, R. (2003). Leak detection practices and techniques: a practical approach. *Water 21 - Magazine of the International Water Association*.
- Risawandi, & Rahim, R. (2016). Study of the simple multi-attribute rating technique for decision support. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, vol. 2.
- Saldarriaga, J., Ochoa, S., Moreno, M., Romero, N., & Cortés, Ó. (2010). Renovación priorizada de redes de distribución utilizando el concepto de potencia unitaria. *Revista de Ingeniería*, (31), 7-15.

- Thornton, J., & Lambert, A. (2005, September). Progress in practical prediction of pressure: leakage, pressure: burst frequency and pressure: consumption relationships. In Proceedings of IWA Special Conference'Leakage (pp. 12-14).
- Todini, E. (2000). Looped water distribution networks design using a resilience index based heuristic approach. *Urban water*, 2(2), 115-122.
- Torres, S. A. (2011). Optimización del índice de resiliencia y uniformización de la presión como criterios para renovar tuberías en redes de distribución de acueductos (Tesis de pregrado). Universidad Industrial de Santander.