

**CREACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE RED MATRIZ PARA EL  
ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA**

**CLAUDIA TATIANA LUCENA GUTIÉRREZ  
ABNER ALEXEY RINCÓN SUÁREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO - MÉCANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2012**

**CREACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE RED MATRIZ PARA EL  
ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA**

**CLAUDIA TATIANA LUCENA GUTIÉRREZ  
ABNER ALEXEY RINCÓN SUÁREZ**

**Trabajo de Grado para optar al  
Título de Ingeniero Civil**

**DIRECTOR  
LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS  
Ingeniero Civil, M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO - MÉCANICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2012**

*Si hoy sientes miedo, transfórmalo en inspiración !!!*

*A Dios, quien es el motor de mi vida*

*A mi madre, Martha Cecilia Gutiérrez Morales, porque si hoy he llegado hasta aquí ha sido gracias a ella*

*A mi hermana, Angi Juliana Lucena Gutiérrez, que siempre me guió y me aconsejó*

*A mí querido, Mario Alejandro Suarez Rodríguez, por la enseñanza que acompañó cada una de sus palabras al transcurrir esta fase de formación*

*A mi compañero, Abner Alexey Rincón Suárez, por la colaboración para la elaboración de este proyecto*

***Claudia Tatiana Lucena Gutiérrez***

*A mis abuelos, Claudio Rincón y Ulbina Pabón por su apoyo incondicional, cariño, respeto y confianza*  
*A mi madre, Cecilia Suárez, quien es mi razón de vivir, por su amor, respeto y apoyo*  
*A mis tíos, Omar Rincón, Mauricio Rincón, Claudia Rincón, Francisco Moreno, por sus enseñanzas que*  
*han dado un rumbo correcto a mi vida, por su apoyo incondicional, cariño y respeto*  
*A mis hermanos Laura, Julián y Sara por acompañarme y compartir tanto cariño conmigo*  
*A mi familia, que siempre me ha acompañado en el transcurso de mi vida*  
*A Nathalia Juliana Quintanilla Parra, por su cariño, amistad y haber compartido conmigo parte de los*  
*mejores momentos de mi vida*  
*A Stephany Grey Mendoza Orcasitas, por su continuo apoyo, amistad, consejos y compañía a lo largo de*  
*mi formación como Ingeniero Civil*  
*A Claudia Tatiana Lucena Gutiérrez, por su amistad, continua compañía y apoyo en las diferentes*  
*etapas del proyecto*  
*A todos mis amigos, por su compañía, camaradería y apoyo*

***Abner Alexey Rincón Suárez***

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera instancia a nuestro Director de Proyecto, el profesor Luis Fernando Castañeda Galvis por la paciencia, dedicación y conocimiento brindado durante el desarrollo de nuestro Proyecto de Grado.

Al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga por darnos la oportunidad de realizar nuestro proyecto de grado junto a todo su equipo de trabajo.

Al conjunto de profesores que hicieron parte de todo el proceso de formación académica y personal.

A nuestros familiares y amigos por brindarnos su amistad y su apoyo incondicional.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	24
OBJETIVOS.....	27
1 HIDRÁULICA DEL FLUJO EN TUBERÍAS.....	28
1.1 CONFORMACIÓN DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE .....	28
1.2 DETERMINACIÓN DEL FLUJO .....	28
1.3 FLUJO UNIFORME EN TUBERÍAS.....	29
1.4 RESISTENCIA AL FLUJO EN CONDUCTOS CIRCULARES .....	30
1.4.1 Viscosidad.....	30
1.4.2 Número de Reynolds .....	31
1.4.2.1 Flujo Laminar .....	31
1.4.2.2 Flujo de Transición.....	32
1.4.2.3 Flujo Turbulento .....	32
1.5 INTERACCIÓN FLUJO-PARED SÓLIDA .....	33
1.6 ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE TUBERIAS CIRCULARES .....	35
1.6.1 ECUACIÓN DARCY-WEISBACH.....	35
1.6.2 ECUACION DE MOODY .....	37
1.6.2.1 Diagrama de Moody.....	37
1.6.3 ECUACIONES DE PRANDTL Y VON KÁRMAN .....	38
1.6.3.1 Flujo Hidráulicamente Liso .....	39
1.6.3.2 Flujo Hidráulicamente Rugoso .....	39
1.6.4 ECUACIÓN DE COLEBROOK Y WHITE .....	39
1.6.5 ECUACIÓN DE SWAMEE - JAIN.....	40

1.6.5.1	Flujo Turbulento Hidráulicamente Rugoso .....	41
1.6.5.2	Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso .....	41
1.6.5.3	Todo El Rango Del Flujo Turbulento .....	42
2	HIDRÁULICA AVANZADA DE REDES DE DISTRIBUCIÓN .....	43
2.1	CALIBRACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN .....	43
2.1.1	Variables hidráulicas .....	43
2.1.2	Variables Topológicas .....	44
2.2	ESQUELETIZACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO CONCEPTOS DE RESILIENCIA Y POTENCIA UNITARIA .....	46
2.3	CALIBRACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN CON MÉTODOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL .....	47
2.4	METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE UNA RDAP .....	48
2.4.1	Monitoreo de una red de distribución .....	48
2.4.2	Modelo Inicial .....	50
2.4.3	Línea Base 1 .....	50
2.4.3.1	Análisis de Demandas Desconocidas .....	50
2.4.3.2	Análisis por Emisores .....	51
2.4.4	Línea Base 2 .....	52
2.4.4.1	Análisis por Pérdidas Menores .....	52
2.4.4.2	Análisis por Rugosidades .....	52
2.4.4.3	Análisis por Diámetros .....	53
2.4.5	Modelo Unificado .....	53
2.5	HERRAMIENTA COMPUTACIONAL .....	53
2.5.1	Epanet .....	53

3	CREACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DE RED MATRIZ DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA amb S.A. E.S.P. ....	55
3.1	MODELACIÓN HIDRÁULICA DE UNA RDAP .....	55
3.1.1	Información de consumos .....	55
3.1.2	Mediciones de caudal y presión .....	55
3.1.3	Simplificación en la representación de los tanques .....	56
3.1.4	Representación de los consumos .....	56
3.1.5	Calibración y ajuste de las redes en campo .....	56
3.2	MODELO HIDRÁULICO DE LA RED MATRIZ DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA .....	57
3.2.1	Descripción de la red matriz .....	57
3.2.2	Descripción de la topología de la red .....	57
3.2.3	Descripción del uso de la red matriz .....	61
3.2.4	Generación del archivo de modelación (*.INP).....	61
3.2.5	Montaje de embalses y tanques de almacenamiento .....	62
3.2.6	Sectorización .....	63
3.2.7	Macromedición.....	63
3.2.7.1	Ubicación medidores de caudal .....	63
3.2.7.2	Procesamiento de las series de datos.....	66
4	METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE LA RED MATRIZ DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA amb E.S.P. ....	68
4.1	CÁLCULO, DISTRIBUCIÓN Y ASIGNACIÓN DE CONSUMOS.....	71
4.1.1	Nodos de consumo .....	72
4.1.2	Cálculo de patrones de consumo .....	72
4.2	ANÁLISIS POR RUGOSIDADES .....	72

4.3	ANÁLISIS POR DIÁMETROS.....	73
4.4	PÉRDIDAS MENORES.....	73
4.5	AJUSTE DE VÁLVULAS DE CONTROL DE CAUDAL Y NIVELACIÓN DEL SISTEMA.....	74
5	APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE LA RED MATRIZ AL TRAMO FLORIDABLANCA - GIRÓN.....	76
5.1	DESCRIPCIÓN DEL TRAMO DE RED MATRIZ FLORIDABLANCA – GIRÓN .....	77
5.2	MACROMEDICIÓN Y ESTADO DE OPERACIÓN.....	79
5.3	CÁLCULO DE DEMANDAS POR DISTRITOS HIDRÁULICOS.....	80
5.4	CÁLCULO DE PATRONES DE CONSUMO .....	82
5.5	ASIGNACIÓN DE CONSUMOS Y PATRONES AL TRAMO DE RED MATRIZ .....	83
5.6	ANÁLISIS Y VERIFICACIÓN DEL ESTADO DE OPERACIÓN .....	83
5.7	HIPÓTESIS DE DISTRIBUCIÓN DE DEMANDAS Y EMISORES .....	88
5.7.1	Cálculo del Índice de Agua No Contabilizada Para El Tramo de red matriz (Lagos II – Girón Mayor) .....	88
5.7.2	DEMANDAS Y EMISORES.....	89
5.8	ANÁLISIS POR PÉRDIDAS MENORES, DIÁMETROS Y RUGOSIDADES .....	91
5.9	MODELO UNIFICADO .....	95
	CONCLUSIONES.....	101
	BIBLIOGRAFÍA.....	104
	ANEXOS.....	106

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1</b> Volumen de control para el flujo en una tubería .....	29
<b>Figura 2</b> La presencia de la pared solida afecta la distribución de velocidades de flujo. ....	33
<b>Figura 3</b> Desarrollo de una capa limite turbulenta. ....	34
<b>Figura 4</b> Flujos hidráulicamente liso e hidráulicamente rugoso. ....	35
<b>Figura 5</b> Diagrama de Moody .....	38
<b>Figura 6</b> Metodología de calibración de RDAP .....	49
<b>Figura 7</b> Componentes de una red en EPANET .....	54
<b>Figura 8</b> Distribución porcentual de los materiales de la red .....	58
<b>Figura 9</b> Distribución porcentual de los diámetros de la red matriz .....	60
<b>Figura 10</b> Archivo de simulación de la red matriz de Bucaramanga.....	62
<b>Figura 11</b> Puntos de medición incorporados en el sistema SCADA .....	66
<b>Figura 12</b> Algoritmo para la calibración de Redes Matrices .....	69
<b>Figura 13</b> Tramo de red matriz (Lagos II - Girón Mayor) .....	76
<b>Figura 14</b> Distribución porcentual de rugosidades en el tramo de red matriz .....	78
<b>Figura 15</b> Distribución porcentual de los diámetros en el tramo de red matriz ...	78
<b>Figura 16</b> Ubicación de los caudalímetros en el tramo de red matriz .....	79
<b>Figura 17</b> Caudales Lagos II.....	80
<b>Figura 18</b> Caudales Entrada Girón Mayor.....	80
<b>Figura 19</b> Usuarios de consumo y nodos del tramo de red matriz .....	81
<b>Figura 20</b> Caudales Lagos II – Girón Mayor .....	82
<b>Figura 21</b> Patrón de consumo del tramo de Red Matriz .....	82
<b>Figura 22</b> Gráfica de patrones y caudales en el modelo .....	83
<b>Figura 23</b> Numeración de válvulas según el sentido de flujo en el tramo .....	84
<b>Figura 24</b> Relación de ángulo de apertura con el coeficiente de pérdida .....	85

<b>Figura 25</b>	Regulación inicial de las válvulas entrada del tramo (Lagos II) .....	86
<b>Figura 26</b>	Regulación inicial de las válvulas salida del tramo (Girón Mayor) .....	86
<b>Figura 27</b>	Diferente regulación de válvulas entrada al tramo (Lagos II) .....	87
<b>Figura 28</b>	Diferente regulación de válvulas salida del tramo (Girón Mayor) .....	87
<b>Figura 29</b>	Análisis por Demandas y Emisores entrada del tramo (Lagos II) .....	90
<b>Figura 30</b>	Análisis por Demandas y Emisores salida del tramo (Girón Mayor) ..	91
<b>Figura 31</b>	Análisis Diámetros, Rugosidades y Pérdidas Menores entrada del tramo (Lagos II) .....	94
<b>Figura 32</b>	Análisis por Diámetros, Rugosidades y Pérdidas Menores salida del tramo (Girón Mayor) .....	95
<b>Figura 33</b>	Modelo sin calibrar con el estado de operación inicial entrada del tramo (Lagos II) .....	98
<b>Figura 34</b>	Modelo Unificado entrada del tramo (Lagos II) .....	98
<b>Figura 35</b>	Modelo sin calibrar con el estado de operación inicial salida del tramo (Girón Mayor) .....	99
<b>Figura 36</b>	Modelo Unificado salida del tramo (Girón Mayor) .....	99
<b>Figura 37</b>	Modelo sin calibrar punto de presión (Finca la Pelusa) .....	100
<b>Figura 38</b>	Modelo unificado punto de presión (Finca la pelusa) .....	100

## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
<b>Ecuación 1</b> Resistencia al flujo .....	30
<b>Ecuación 2</b> Número de Reynolds .....	31
<b>Ecuación 3</b> Pérdidas de altura debido a la fricción de Darcy-Weisbach .....	36
<b>Ecuación 4</b> Coeficiente de fricción de régimen laminar .....	36
<b>Ecuación 5</b> Fricción relativa.....	37
<b>Ecuación 6</b> Coeficiente de fricción de flujo hidráulicamente liso .....	39
<b>Ecuación 7</b> Coeficiente de fricción de flujo hidráulicamente rugoso.....	39
<b>Ecuación 8</b> Coeficiente de fricción de flujo Colebrook-White .....	40
<b>Ecuación 9</b> Coeficiente de fricción de flujo hidráulicamente rugoso.....	41
<b>Ecuación 10</b> Coeficiente de fricción de flujo hidráulicamente liso .....	41
<b>Ecuación 11</b> Coeficiente de fricción de flujo hidráulicamente rugoso.....	42
<b>Ecuación 12</b> Caudal de salida .....	44
<b>Ecuación 13</b> Pérdidas menores.....	46
<b>Ecuación 14</b> Pérdidas menores en una tubería .....	74
<b>Ecuación 15</b> Índice de Agua No Contabilizada. ....	88

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1</b> Clasificaciones típicas de los nodos en el análisis por demandas desconocidas.....	51
<b>Tabla 2</b> Clasificaciones típicas de los nodos en el análisis por emisores .....	52
<b>Tabla 3</b> Materiales presentes en la longitud de la red .....	58
<b>Tabla 4</b> Diámetros presentes en la longitud de la red matriz .....	59
<b>Tabla 5</b> Zonas de ubicación de los caudalímetros.....	64
<b>Tabla 6</b> Coordenadas de los caudalímetros .....	65
<b>Tabla 7</b> Materiales presentes en el tramo de red matriz.....	77
<b>Tabla 8</b> Diámetros presentes en el tramo de red matriz .....	77
<b>Tabla 9</b> Consumo de los nodos respectivos .....	81

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
<b>Anexo A</b> Separador de series.....	106
<b>Anexo B</b> Series Procesadas .....	109
<b>Anexo C</b> Macromedición por distritos .....	114

## GLOSARIO

**AGUA POTABLE:** Es aquella que por reunir los requisitos organolépticos, físico-químicos y microbiológicos, en las condiciones señaladas en el Decreto 1575 de 2007 y la resolución 2115 de 2007, puede ser consumida por la población humana sin producir efectos adversos a su salud.

**CAUDAL:** Es el volumen que pasa por un área dada en la unidad de tiempo.

**CALIBRACIÓN:** La calibración de un sistema de distribución de agua potable se define como el ajuste de un conjunto de variables, a través de las cuales se busca que el modelo reproduzca de forma correcta las lecturas en campo.

**ESQUELETIZACIÓN:** Proceso para eliminar tuberías de un modelo hidráulico sin desconectar ninguno de los nudos de la red, generando un modelo hidráulico equivalente que permite realizar los cálculos hidráulicos sustancialmente más rápido en términos computacionales, lo que permite un uso operacional más eficiente.

**ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA (IANC):** Es el porcentaje de volumen total de agua potable producido que no es facturado a los usuarios, es decir el porcentaje de pérdidas, física o comerciales, en que incurre el prestador del servicio.

**MACROMEDICIÓN:** Es el conjunto de elementos y actividades permanentes destinadas a la obtención y divulgación de los datos operacionales relativos a los flujos, volúmenes, presiones y niveles de los puntos significativos del sistema de acueducto.

**MANTENIMIENTO:** Conjunto de actividades que se ejecutan en las instalaciones y equipos para prevenir daños o para la reparación de los mismos cuando se producen. El mantenimiento puede ser correctivo, preventivo y de oportunidad.

**MICROMEDICIÓN:** Es la proporción del total de conexiones de agua potable que tiene instalado un medidor operativo.

**PRESIÓN:** Es una magnitud física escalar que mide la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie, y sirve para caracterizar cómo se aplica una determinada fuerza resultante sobre una superficie.

**RED MATRIZ:** Es el conjunto de tuberías con un diámetro igual o superior a 6 pulgadas, conducciones entre tanques que distribuyen el agua procedente de las plantas de tratamiento o tanques de compensación, a las redes secundarias. La red primaria mantiene las presiones básicas de servicio para el funcionamiento correcto de todo el sistema y generalmente no reparte agua en ruta.

**REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE (RDAP):** La red de abastecimiento de agua potable es una infraestructura, que permite llevar hasta la vivienda de los habitantes de una ciudad, pueblo o área rural relativamente densa, el agua potable.

**RESILIENCIA EN UNA RED:** El concepto de resiliencia fue introducido por Ezio Todini en el año 2000; lo definió como “la capacidad intrínseca que tiene una RDAP para superar fallas repentinas y se mide como la proporción entre el

excedente de potencia por unidad de peso que es entregado a los usuarios y la máxima potencia por unidad de peso que puede ser disipada en la red cuando se cumplen exactamente los criterios y condiciones de diseño. El índice de resiliencia proporciona una medida general de la redundancia del sistema: un mayor valor del índice de resiliencia corresponde a una mayor redundancia”.

**SECTORIZACIÓN:** Estrategia de control, que consiste en la delimitación de la red de acueducto en sectores de servicio homogéneos, aislados e independientes, en los cuales es posible macromedir los volúmenes suministrados, optimizar las condiciones de servicio, calcular el Índice de Agua No Contabilizada, establecer las causas de las pérdidas y sus acciones de control, formular proyectos estructurados de control de pérdidas, priorizarlos y hacer seguimiento al comportamiento y a las inversiones de reducción.

## RESUMEN

### **TÍTULO:**

CREACIÓN Y CALIBRACIÓN DE UN MODELO DE RED MATRIZ PARA EL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA\*

### **AUTORES:**

LUCENA GUTIÉRREZ, Claudia Tatiana \*\*  
RINCÓN SUÁREZ, Abner Alexey \*\*

### **PALABRAS CLAVES:**

Redes de Distribución de Agua Potable, Calibración de Redes Matrices, Índice de Agua No Contabilizada, Nivelación del sistema, Estado de operación.

### **DESCRIPCIÓN:**

La calibración de redes matrices de agua potable es de vital importancia para así realizar una adecuada operación y mantenimiento de las mismas, puesto que permite que las simulaciones hidráulicas hechas sobre los modelos de la red sean confiables, válidas y ofrezcan los datos necesarios para tomar decisiones acertadas de operación.

Para lograrlo se realizó una metodología de calibración de redes matrices, en la cual se varían los parámetros que gobiernan el sistema hidráulico, determinando así el comportamiento de la masa y energía ideal que permite generar una apropiada semejanza con los resultados que ocurren en campo.

Dicha metodología se aplicó al tramo de red matriz (Lagos II – Girón Mayor) mediante la recopilación de la macromedición a la entrada como a la salida del tramo y la micromedición del distrito hidráulico adyacente, obteniendo así una calibración satisfactoria en una fecha determinada correspondiente al mes de mayo de 2012, es decir, la gráfica de caudal se acercó a los valores medidos en campo.

---

\*Trabajo de Grado

\*\* UIS, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil  
Director: Luis Fernando Castañeda Galvis

## ABSTRACT

**TITLE:**

CREATION AND CALIBRATION OF A MATRIX NETWORK MODEL FOR THE ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA\*

**AUTHORS:**

LUCENA GUTIÉRREZ, Claudia Tatiana\*\*  
RINCÓN SUÁREZ, Abner Alexey\*\*

**KEYWORDS:**

Water Distribution Networks, Matrix Network Calibration, Non Revenue Water Index, Leveling System, State of operation.

**DESCRIPTION:**

Calibration of drinking water matrix networks is vital in order to perform a proper operation and maintenance of itself, as it allows reliable and valid results of the hydraulic simulations carried on the network models, and provide the data needed to make the right decisions in operation.

To achieve this, was performed a calibration methodology for a matrix network, in which parameters that govern the hydraulic system are varied, thereby determining the behavior of the mass and ideal energy to generate a likeness appropriate with the results that occur in field.

This methodology was applied to the segment of the matrix network (Lagos II – Girón Mayor) through the compilation of the macrometering both entry and exit of the segment and micrometering of hydraulic adjacent district, thus obtaining a successful calibration to specific date of May 2012, it means, the flow rate graphic approaches the measured field values.

---

\*Degree project

\*\*UIS, Faculty of Physical-Mechanical Engineering, Civil Engineering School  
Director: Luis Fernando Castañeda Galvis

## INTRODUCCIÓN

Debido al aumento de la población, deforestación, disminución de cauces, acelerados procesos urbanos y la contaminación asociada a dichos procesos, el agua se ha convertido en un recurso que cada día es más difícil de conseguir y poco manejable para la sociedad actual, esto ha hecho que el hombre utilice cada vez más su ingenio para reducir las pérdidas de agua.

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga diariamente registra las pérdidas de agua; es por esto que simular el comportamiento que ocurre al interior de las grandes extensiones de redes de tuberías cada día se ha convertido en una labor prioritaria, el propósito es establecer un control de consumo que permita conocer que la cantidad de agua suministrada por las empresas prestadoras de servicio de acueducto no sea diferente al agua facturada finalmente; o si es así conocer los factores que causan dichas pérdidas.

Esta tesis pretende analizar los factores que afectan el correcto funcionamiento de las redes de distribución de agua potable de la red matriz, tales como el grado de deterioro de la infraestructura, fallas en las tuberías, bombas, válvulas, entre otros, los cuales pueden provocar pérdidas por fugas, alto costo de mantenimiento, irregularidades en el servicio y disminución de la confiabilidad. Por lo tanto, se busca reducir el agua que se pierde, suministrando esta misma agua sin más infraestructura a más usuarios.

Una vez determinadas las principales causas que afectan el buen funcionamiento de las redes de distribución, es necesario ajustar los valores de caudales y presiones medidos en el modelo hidráulico (información obtenida por Control de Supervisión y Adquisición de Datos (**SCADA**)).

Por todo lo anterior, se evidencia la necesidad de poseer modelos simplificados y calibrados en cualquier red matriz con el fin de operar y regular de manera general el sistema de acueducto, en este caso el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (**amb**) S.A E.S.P. El presente informe se subdivide en los siguientes capítulos, los cuales se mencionan a continuación:

En el capítulo 1, *Hidráulica del flujo en tuberías*, se definen los aspectos generales necesarios para desarrollar la presente investigación, además se muestran las teorías y ecuaciones más importantes acerca del flujo en tuberías, haciendo énfasis en las secciones transversales circulares.

El capítulo 2, *Hidráulica avanzada de redes de distribución*, está dedicado al tema de las tuberías simples, se muestran algunos tipos de calibración y la metodología utilizada en el Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA) para la calibración de redes de distribución de agua potable. Además se muestran algunas herramientas computacionales, las cuales permiten crear modelos y realizar simulaciones hidráulicas necesarias para la calibración de las redes de distribución de agua potable.

En el capítulo 3, *Creación del Modelo Hidráulico de red matriz del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb E.S.P.*, se encuentra una descripción detallada de la conformación del modelo hidráulico de la red matriz, dando a conocer los distintos elementos que se encuentran en funcionamiento en la ciudad y hacen posible el transporte del agua potable, desde las plantas de tratamiento hasta las redes menores, encargadas de su distribución a los usuarios finales.

En el capítulo 4, *Metodología de Calibración de la red matriz del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb E.S.P.*, se establece una metodología para calibrar una red matriz, teniendo en cuenta los factores que intervienen

notoriamente en la dinámica de los procesos que ocurren al interior de las redes de tuberías.

En el capítulo 5, *Aplicación de la metodología de calibración de la red matriz al tramo Floridablanca - Girón*, se lleva a cabo la aplicación de la metodología expuesta en el capítulo anterior a un tramo específico, debido a la magnitud y extensión de la red matriz del Área Metropolitana de Bucaramanga.

# OBJETIVOS

## OBJETIVO GENERAL

- Crear el modelo de red matriz del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (**amb**) S.A ESP, utilizando el software SIIDAR. Así mismo implementar una metodología de calibración en un tramo seleccionado, con el objeto que pueda ser extrapolado en futuras calibraciones de los demás tramos de la red matriz.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar el comportamiento de las curvas de caudal del tramo de red matriz Floridablanca - Girón y compararlo con los datos medidos en campo mediante la utilización de la biblioteca de enlace dinámico Epanet2.dll<sup>1</sup>.
- Establecer una metodología para la calibración de redes matrices, de tal manera que pueda ser aplicada en forma general a cualquier red matriz.
- Calibrar el modelo de la conducción Floridablanca – Girón, identificando las variables topológicas y caudales de fugas con su distribución espacial en función de la presión, que reproduzcan de la mejor forma posible las variables medidas en campo.
- Identificar los factores que afectan la determinación del Índice de Agua No Contabilizada (**IANC**).

---

<sup>1</sup> "The Epanet Programmer's toolkit". Es una biblioteca de enlace dinámico (DLL) que contiene funciones que ejecutan las más importantes tareas de Epanet.

# 1 HIDRÁULICA DEL FLUJO EN TUBERÍAS

## 1.1 CONFORMACIÓN DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE

Las redes de distribución de agua potable de una ciudad usualmente están compuestas de dos partes: la primera de ellas es una red matriz que está encargada de conducir el agua desde la planta de tratamiento hasta los diferentes tanques de almacenamiento y compensación localizados aguas arriba de los diferentes sectores de abastecimiento. La segunda parte está conformada por redes de distribución secundarias o menores a través de las cuales el agua potable se mueve desde los tanques de almacenamiento hasta la acometida del usuario final<sup>2</sup>.

## 1.2 DETERMINACIÓN DEL FLUJO

El flujo en una tubería o de hecho en cualquier tipo de ducto, se puede determinar mediante las siguientes cantidades físicas:

- Desplazamiento de una partícula de fluido.
- Velocidad de una partícula de fluido en un punto del campo de flujo.
- Aceleración de una partícula de fluido en un punto del campo de flujo.

Las anteriores cantidades pueden permanecer constantes o variar con el espacio y/o con el tiempo. Con respecto al espacio, los flujos se clasifican en uniformes (si las cantidades físicas permanecen constantes en el espacio) y no uniformes. Con

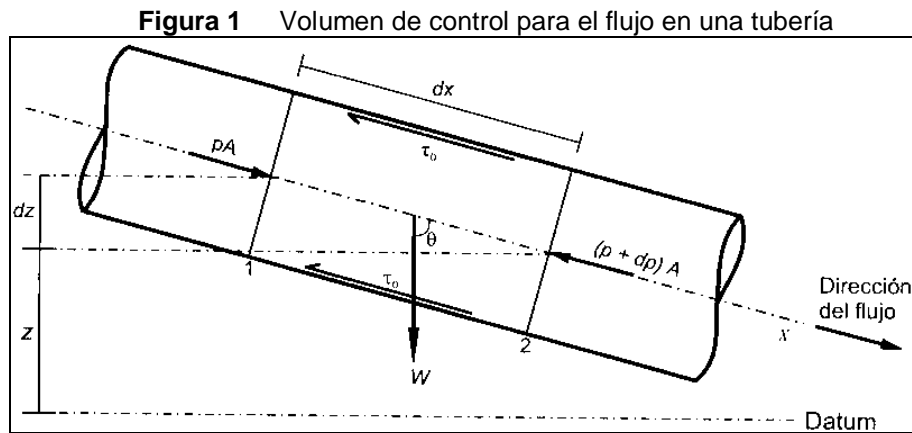
---

<sup>2</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

respecto al tiempo se clasifican en permanentes o estacionarios (si las cantidades de flujo permanecen constantes en el tiempo) y no permanentes.

### 1.3 FLUJO UNIFORME EN TUBERÍAS

En el caso de flujo en tuberías actúan tres fuerzas: de presión, gravitacionales y de fricción las primeras siempre tratan de acelerar el flujo<sup>3</sup>.



Fuente: (Saldarriaga, HIDRÁULICA DE TUBERÍAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos, 2007) pág. 4

La Figura 1 muestra el equilibrio que alcanza una tubería cuando se encuentra en estado de flujo uniforme. Si el fluido contenido en el volumen de control mostrado en la Figura 1 no está acelerado, entonces  $\Sigma F_x = 0$ . La Ecuación 1 representa la forma inicial de una ecuación para explicar las pérdidas por fricción que experimenta un flujo a través de cualquier tipo de ducto, sea éste una tubería, un

<sup>3</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

canal, una alcantarilla, etc. Teniendo en cuenta este hecho se obtiene la siguiente ecuación:

$$\tau_o = \gamma R S_f$$

**Ecuación 1** Resistencia al flujo

Donde:

$\tau_o$  = esfuerzo cortante en la pared interna de la tubería.  $[N/m^2]$

$\gamma$  = peso específico del fluido.  $[kg/m^3]$

$R$  = radio hidráulico.  $[m]$

$S_f$  = pendiente de fricción del flujo en la tubería.  $[m/m]$

## 1.4 RESISTENCIA AL FLUJO EN CONDUCTOS CIRCULARES

La distribución de velocidades, el gasto y la caída de presión pueden determinarse analíticamente en el caso de un tubo circular recto con flujo laminar y permanente. Para estudiar los efectos de la resistencia al flujo hay que tener en cuenta los conceptos dados a continuación<sup>4</sup>:

### 1.4.1 Viscosidad

La viscosidad es la propiedad de un fluido en virtud de la cual este ofrece resistencia a los esfuerzos de corte. La ley de la viscosidad de Newton establece que para una velocidad angular de deformación del fluido el esfuerzo de corte es directamente proporcional a la viscosidad.

---

<sup>4</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

### 1.4.2 Número de Reynolds

El número de Reynolds ( $Re$ ) es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. El número de Reynolds relaciona la densidad, viscosidad y dimensión típica de un flujo en una expresión adimensional. Reynolds utilizó como longitud significativa  $L$  el diámetro  $d$  de la tubería, encontrando que cuando  $Re$  alcanza un valor de 2200, el flujo pasa de laminar a transición. Para los valores entre 2200 y 4500 aproximadamente, el flujo se localiza en una zona de transición y para valores mayores pasa a ser turbulento. De esta forma, Reynolds pudo analizar el cambio de flujo laminar a turbulento en una tubería; posteriormente reprodujo sus experimentos en ductos con diferentes áreas transversales.

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu}$$

Ecuación 2 Número de Reynolds

Donde:

$v$  = velocidad significativa del flujo.  $[m/s]$

$d$  = diámetro de la tubería.  $[m]$

$\rho$  = densidad del flujo.  $[kg/m^3]$

$\mu$  = coeficiente de viscosidad dinámica.  $[\frac{N}{m^2} * s]$

#### 1.4.2.1 Flujo Laminar

Es flujo laminar si las fuerzas viscosas son muy fuertes en relación con las inerciales, de tal manera que la viscosidad juega un papel importante en determinar el comportamiento del flujo. En el flujo laminar, las partículas de agua

se mueven en trayectorias suaves definidas o líneas de corriente, y las capas de fluido con espesor infinitesimal parecen deslizarse sobre capas adyacentes.

#### 1.4.2.2 Flujo de Transición

Entre la subcapa laminar viscosas y la zona completamente turbulenta existe una zona de transición donde el flujo deja de ser laminar para convertirse en turbulento. Se ha encontrado que esta zona se extiende entre los siguientes límites:

$$5 \frac{v}{V_*} \leq y \leq 70 \frac{v}{V_*}$$

Nota:  $\frac{v}{V_*} = 11.6$  y representa el espesor de la subcapa laminar viscosa<sup>5</sup>.

Donde:

$v$  =velocidad [m/s]

$V_*$  =velocidad de corte [m/s]

El flujo no pasa de laminar a turbulento en forma súbita, sino de modo gradual, a medida que las fuerzas viscosas pierden importancia frente a las inerciales, se empiezan a ver cambios de inestabilidad en el flujo donde en un determinado punto se presenta intercambio entre paquetes de fluido.

#### 1.4.2.3 Flujo Turbulento

Es flujo turbulento si las fuerzas viscosas son débiles en relación con las fuerzas inerciales. En el flujo turbulento, las partículas del agua se mueven en trayectorias

---

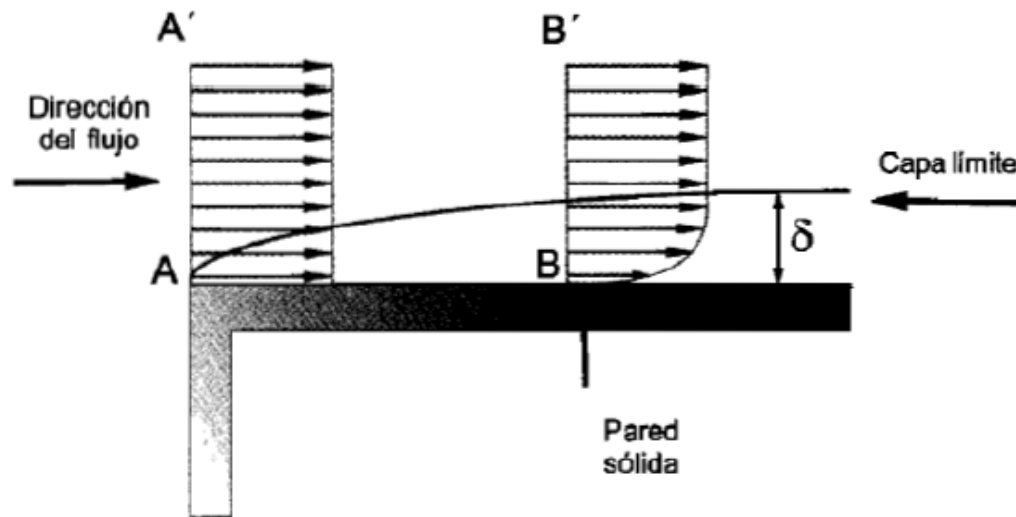
<sup>5</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

irregulares, que no son suaves ni fijas, pero que en conjunto todavía representan el movimiento hacia delante de la corriente entera, se presenta intercambio de paquetes de fluido entre las capas que se mueven a diferente velocidad.

## 1.5 INTERACCIÓN FLUJO-PARED SÓLIDA

Siempre que un fluido en movimiento interactúa con una pared sólida<sup>6</sup>, el esfuerzo cortante que se genera afecta principalmente una zona de dicho flujo. Esta zona recibe el nombre de capa límite, la cual puede ser laminar o turbulenta (Ver Figura 2) Capa límite, la velocidad es cero en la superficie sólida y crece a medida que el flujo se aleja de esta.

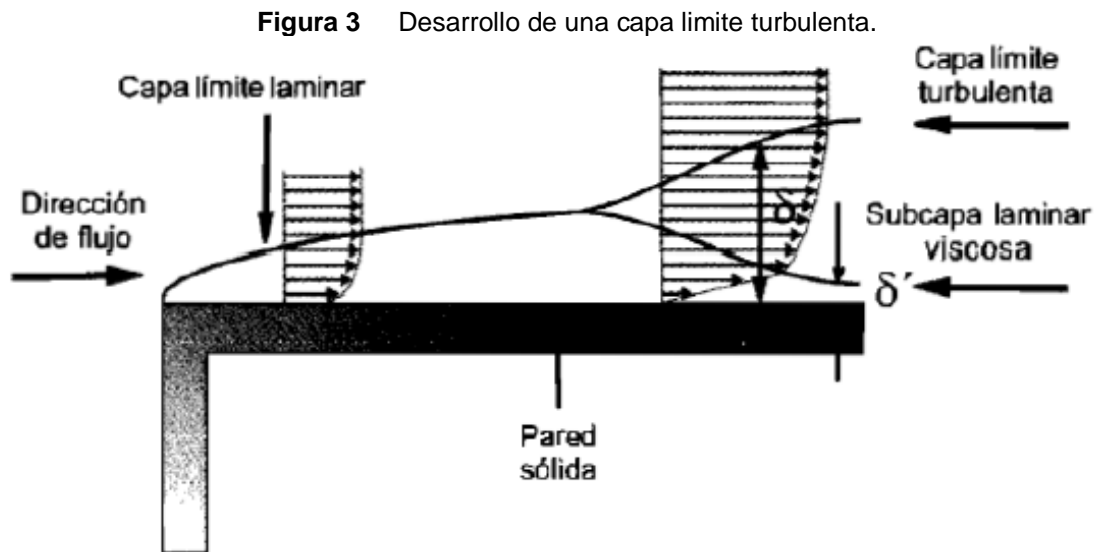
**Figura 2** La presencia de la pared sólida afecta la distribución de velocidades de flujo.



Fuente: (Saldarriaga, HIDRÁULICA DE TUBERÍAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos., 2007) pág. 19

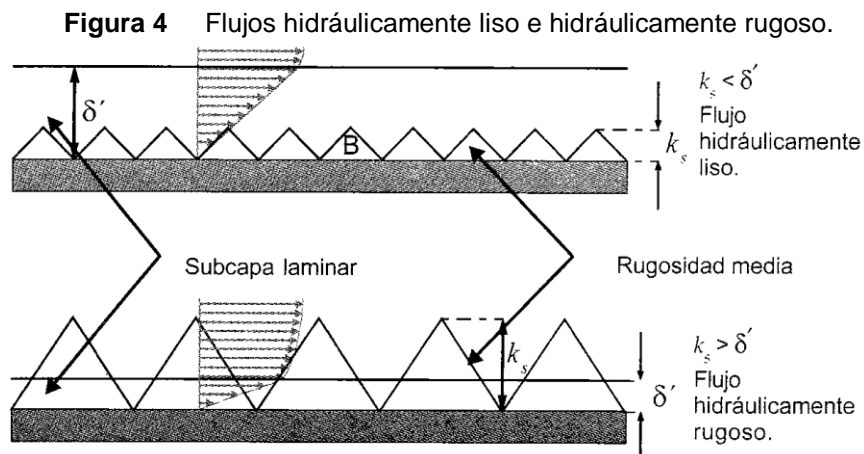
<sup>6</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

En el caso del flujo turbulento la superficie sólida que cerca de ella ocurren las vibraciones de velocidad en forma libre, generándose así una zona de flujo laminar dentro de la capa límite. Esta se conoce con el nombre de subcapa laminar viscosa (Ver Figura 3) y siempre se presenta en flujo turbulento. Se denomina viscosa porque en ella priman fuerzas viscosas sobre las fuerzas inerciales.



Fuente: (Saldarriaga, HIDRÁULICA DE TUBERÍAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos., 2007) pág.19

El espesor de la subcapa laminar viscosa es mucho menor que el de la capa límite. La relación existente entre la subcapa laminar y el tamaño medio de la rugosidad de las paredes establece la diferencia entre los flujos hidráulicamente lisos y los hidráulicamente rugosos (Ver Figura 4). Cuando el espesor de la subcapa laminar viscosa es mayor que el tamaño medio de la rugosidad, el flujo se comporta como si la rugosidad no existiera, es decir, como flujo hidráulicamente liso. En el caso contrario el flujo sería hidráulicamente rugoso.



Fuente: (Saldarriaga, HIDRÁULICA DE TUBERÍAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos., 2007) pág. 19

## 1.6 ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE TUBERIAS CIRCULARES<sup>7</sup>

Los propósitos de las ecuaciones para el diseño de tuberías circulares son:

- Establecer ecuaciones de resistencia fluida basadas en la física clásica, tanto para flujo laminar como para flujo turbulento.
- Establecer en forma clara la frontera entre qué diferencia el flujo hidráulicamente liso del flujo hidráulicamente rugoso.
- Dichas ecuaciones planteadas se llevan a cabo en el cálculo y diseño de tuberías Circulares.

### 1.6.1 ECUACIÓN DARCY-WEISBACH

Cuando se trata de conductos cerrados simples, el único tipo de energía que puede perderse por razón del movimiento del fluido es la energía de presión, ya que la energía cinética debe permanecer constante si el área es constante, y la

<sup>7</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

energía potencial solo depende de la posición. La energía de presión expresada como energía por unidad de peso del fluido tiene unidades de altura; la pérdida de altura por fricción es:

$$h_f = f \frac{l v^2}{d 2g}$$

**Ecuación 3** Pérdidas de altura debido a la fricción de Darcy-Weisbach

Donde:

$h_f$  =energía por unidad de peso perdida por fricción. [m]

$f$  =factor de fricción de Darcy. [adimensional]

$l$  =longitud del tramo de tubería en el cual se pierde  $h_f$ . [m]

$d$  =diámetro de la tubería. [m]

$v$  =velocidad. [m/s]

$g$  =gravedad. [m/s<sup>2</sup>]

En Flujo laminar también es válida la ecuación de Darcy-Weisbach, en donde el coeficiente de fricción depende exclusivamente del número de Reynolds, y se puede obtener su valor:

$$f_{laminar} = \frac{64}{Re}$$

**Ecuación 4** Coeficiente de fricción de régimen laminar

En régimen transicional y turbulento, el factor de fricción empieza a ser una función compleja de Re y de la rugosidad relativa ( $k_s/d$ ) donde  $k_s$  es la rugosidad

absoluta de la tubería que representa un promedio de las irregularidades de la superficie del interior de la tubería y  $d$  el diámetro de la tubería.

### 1.6.2 ECUACION DE MOODY<sup>8</sup>

Esta ecuación, cuya forma final es la siguiente, fue planteada por Lewis Moody después de finalizar el desarrollo de sus diagramas:

$$f = 0.0055 \left[ 1 + \left( 2000 \frac{k_s}{d} + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/3} \right]$$

**Ecuación 5** Fricción relativa

En esta Ecuación, el factor de fricción es una función explícita de la rugosidad relativa y del número de Reynolds.

Donde:

$f$  =fricción relativa. [*adimensional*]

$k_s$  =rugosidad absoluta [*m*]

$d$  =diámetro [*m*]

$Re$  =número de Reynolds. [*adimensional*]

#### 1.6.2.1 Diagrama de Moody

Moody trazó estas ecuaciones en una gráfica. Con la ecuación de Darcy-Weisbach y disponiendo del diagrama de Moody, es posible hallar las pérdidas por fricción en las tuberías con exactitud.

---

<sup>8</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

Figura 5 Diagrama de Moody

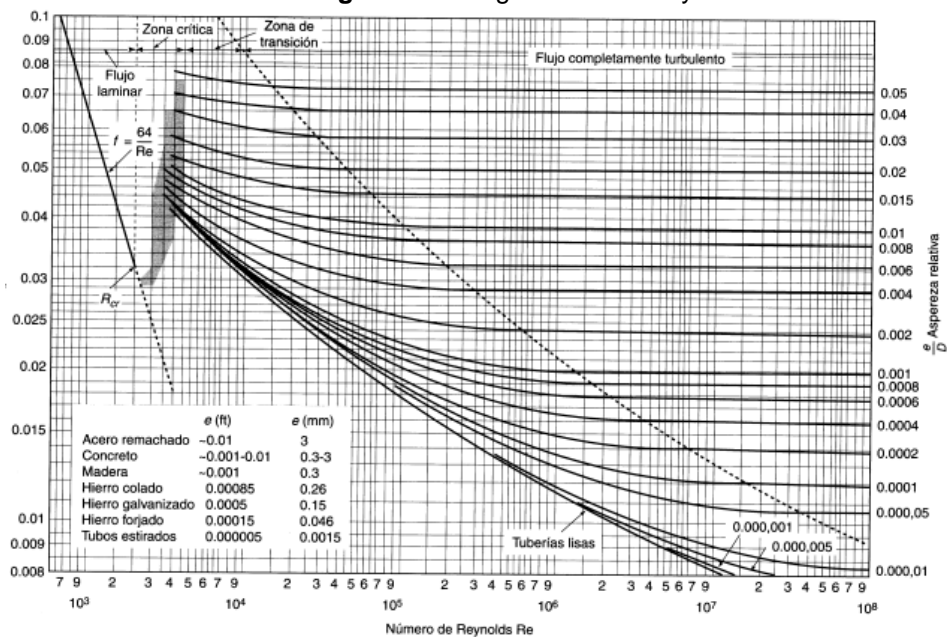


Diagrama de Moody. (De L.F. Moody, *Trans. ASME*, vol. 66, 1944.)

Fuente: (L. F. Moody, 1944)

### 1.6.3 ECUACIONES DE PRANDTL Y VON KÁRMAN<sup>9</sup>

La nueva teoría introducida por Prandtl establece que siempre un fluido en movimiento interactúa con una pared sólida dependiendo del espesor de la subcapa laminar viscosa  $\delta'$  y del tamaño de la rugosidad media  $k_s$ , determinados dos tipos de flujo turbulento, flujo hidráulicamente liso cuando  $k_s < \delta'$  e hidráulicamente rugoso cuando  $k_s > \delta'$  (Ver Figura 4).

Para establecer las ecuaciones finales Prandtl y Von Kármán realizaron pruebas de laboratorio en tuberías circulares de diferentes materiales y establecieron la velocidad media mediante la distribución de velocidades por medio del tubo de Pitot obteniendo así las ecuaciones para cada tipo de flujo turbulento.

<sup>9</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

### 1.6.3.1 Flujo Hidráulicamente Liso

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2 \log_{10} Re \sqrt{f} - 0.8$$

**Ecuación 6** Coeficiente de fricción de flujo hidráulicamente liso

Donde:

$Re$  = número de Reynolds. [adimensional]

$f$  = factor de fricción. [adimensional]

### 1.6.3.2 Flujo Hidráulicamente Rugoso

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = 2 \log_{10} \left( \frac{d}{k_s} \right) + 1.14$$

**Ecuación 7** Coeficiente de fricción de flujo hidráulicamente rugoso

Donde:

$d$  = diámetro de la tubería. [m]

$f$  = factor de fricción. [adimensional]

$k_s$  = rugosidad absoluta. [m]

## 1.6.4 ECUACIÓN DE COLEBROOK Y WHITE<sup>10</sup>

La gran mayoría de los flujos en tuberías, cuando por ellas fluye agua, se encuentran en la zona de transición de los diagramas de Nikuradse y Moody; por ello, no se podía aplicar ninguna de las ecuaciones de diseño de Prandtl y von

---

<sup>10</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

Kármán. Colebrook y White, hicieron una clasificación de las rugosidades relativas con el fin de entender mejor el flujo transicional. En su trabajo combinaron diferentes expresiones de rugosidades y combinaron las ecuaciones ya establecidas por Prandtl y von Kármán, y propusieron una ecuación que probó ser útil para todo tipo de flujo turbulento en tuberías.

$$\sqrt{\frac{1}{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{k_s}{3.7d} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

**Ecuación 8** Coeficiente de fricción de flujo Colebrook-White

Donde:

$d$  =diámetro de la tubería. [*m*]

$f$  =factor de fricción. [*adimensional*]

$k_s$  =rugosidad absoluta.[*m*]

$Re$  =número de Reynolds. [*adimensional*]

Sin embargo, esta ecuación tiene el problema de que no es una ecuación explícita para el factor de fricción  $f$ , lo cual implica la necesidad de utilizar algún método numérico para calcularlo una vez que se conozcan todas las otras variables.

### 1.6.5 ECUACIÓN DE SWAMEE - JAIN

El problema matemático de calcular el factor de fricción  $f$ , dio lugar a la aparición de ecuaciones empíricas para poder solucionar este inconveniente, la última ecuación de estas y la más exitosa apareció en 1976 y fue desarrollada por los investigadores Prabhata K. Swamee y Akalank K. Jain. Donde ellos resolvieron la ecuación de Colebrook-White calculando el factor de fricción para los dos extremos del flujo turbulento: flujo turbulento hidráulicamente liso, flujo turbulento

hidráulicamente rugoso con altos números de Reynolds<sup>11</sup>. En ambos casos obtuvieron las siguientes ecuaciones a través de la técnica de ajuste de curvas:

#### 1.6.5.1 Flujo Turbulento Hidráulicamente Rugoso

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{k_s}{3.7d} \right) \right]^2}$$

**Ecuación 9** Coeficiente de fricción de flujo hidráulicamente rugoso

Donde:

$k_s$  =rugosidad absoluta. [m]

$d$  =diámetro de la tubería. [m]

#### 1.6.5.2 Flujo Turbulento Hidráulicamente Liso

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

**Ecuación 10** Coeficiente de fricción de flujo hidráulicamente liso

Donde:

$f$  = factor de fricción. [adimensional]

$Re$  =número de Reynolds. [adimensional]

---

<sup>11</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

### 1.6.5.3 Todo El Rango Del Flujo Turbulento<sup>12</sup>

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{k_s}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

**Ecuación 11** Coeficiente de fricción de flujo hidráulicamente rugoso

Donde:

$k_s$  =rugosidad absoluta.  $[m]$

$d$  =diámetro de la tubería.  $[m]$

$Re$  =número de Reynolds.  $[adimensional]$

---

<sup>12</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

## 2 HIDRÁULICA AVANZADA DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

### 2.1 CALIBRACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

La calibración de un sistema de distribución de agua potable se define como el ajuste de un conjunto de variables, a través de las cuales se busca que el modelo reproduzca de forma correcta las lecturas de campo. Las principales variables consideradas en una red típica son: las demandas desconocidas (representan pérdidas de tipo comercial), los emisores (pérdidas de tipo técnico), los diámetros, las rugosidades y pérdidas menores. Una red que presente principalmente uno de estos problemas no puede ser calibrada mediante otro parámetro. Por otro lado, se encontró un procedimiento matemático que permite identificar la presencia de estos problemas en una red particular a partir de las mediciones de presión y caudal en un sector dado.

#### 2.1.1 Variables hidráulicas

Reciben esta denominación porque determinan en gran medida la cantidad de agua que fluye a través de los diferentes elementos que conforman el sistema. Las variables hidráulicas se clasifican, de acuerdo con el fenómeno que las origina, en demandas desconocidas y en emisores.

- **Demandas Desconocidas:** Representan la existencia de problemas de tipo comercial al interior del sistema, los cuales pueden estar asociados a conexiones ilegales, falta de calibración en los micromedidores instalados, errores en las mediciones o la ausencia de la misma.

- **Emisores:** Los emisores se pueden definir como dispositivos asociados a los nodos de la red, que permiten modelar el flujo de salida a través de una tubería o en un orificio descargando dicho caudal a la atmósfera. En la modelación hidráulica las fugas se consideran como emisores. El caudal de salida por un emisor varía en función de la presión disponible en el nodo, conforme con la Ecuación 12.

$$Q = CP^{\alpha}$$

**Ecuación 12** Caudal de salida

Donde:

$C$  = es un parámetro de entrada. [ $l/sm$ ]

$P$  = presión en el nodo. [ $m. c. a$ ]

$Q$  = es el caudal de fuga en cada uno de los nodos. [ $l/s$ ]

$\alpha$  = es un coeficiente que depende de la geometría del orificio. [ $adimensional$ ]

Nota: Comúnmente se le asigna a  $\alpha$  un valor de 0.5 en la Ecuación 12, la cual es válida únicamente en el caso de orificios rígidos. También puede variar esta ecuación dependiendo de la forma del orificio,  $\alpha$  generalmente varía entre un valor de 0.5 a 2.0.

### 2.1.2 Variables Topológicas

Conformadas por todos aquellos aspectos físicos del sistema, los cuales determinan principalmente la dirección y velocidad del flujo, así como la

distribución de la energía en su interior. Las variables topológicas presentes en un sistema típico de distribución son:

- **Diámetros:** El diámetro interno de las tuberías puede llegar a variar con el paso del tiempo, debido a diversos factores tales como la aparición de biopelícula, incrustaciones, sedimentos u otros elementos que afectan su comportamiento hidráulico. La determinación en campo de su valor exacto es una labor extremadamente compleja debido, entre otros motivos, al tamaño de las redes, a que las tuberías se encuentran bajo tierra y a que los diámetros pueden variar continuamente con el paso del tiempo; por lo tanto es necesario estimar su valor durante el proceso de calibración.
- **Rugosidades:** La superficie interna de las tuberías no es totalmente lisa; en ella se encuentran pequeñas irregularidades que producen un esfuerzo cortante en sentido contrario a la dirección del flujo, el cual es el responsable de la aparición de las pérdidas por fricción. La contextura de las paredes de las tuberías, al igual que los diámetros internos, puede variar con el paso del tiempo, lo cual afecta directamente el coeficiente de fricción de las mismas. Por lo anterior, en redes de distribución de funcionamiento, el valor de éste se estima a través del proceso de calibración.
- **Pérdidas Menores:** Los accesorios y cambios de alineamiento en la tubería producen vórtices y curvaturas en las líneas de corriente, que se traducen en pérdidas de energía. Estas pérdidas son modeladas mediante un factor  $k_m$  que multiplica la cabeza de velocidad, dando así la pérdida de presión producida por el accesorio (Ver Ecuación 13).

$$Hm = Km \frac{v^2}{2g}$$

**Ecuación 13** Pérdidas menores

Donde:

$Hm$  =pérdidas menores. [ $m$ ]

$Km$  =coeficiente de pérdidas menores en un tramo. [*adimensional*]

$v^2$  =velocidad. [ $m/s$ ]

$g$  =gravedad. [ $m^2/s$ ]

## **2.2 ESQUELETIZACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN UTILIZANDO CONCEPTOS DE RESILIENCIA Y POTENCIA UNITARIA**

El proceso de esqueletización es un proceso que consiste en simplificar el tamaño de un modelo hidráulico de una red de distribución de agua potable (RDAP) sin afectar el comportamiento hidráulico del mismo. Este comportamiento hidráulico, se mide cuantitativamente mediante la comparación de las presiones en los nudos de consumo antes y después de aplicar la metodología de esqueletización.

En el análisis de una RDAP, se estudian las variables hidráulicas involucradas. Para el caso de la esqueletización, se están afectando las presiones en los nudos y los caudales en los tubos. Sin embargo, para efectos comparativos de cuánto afecta la simplificación que implica la esqueletización, sólo se consideran las presiones en los nudos, pues es la variable que busca modelarse adecuadamente, respetando los caudales consumidos en cada nudo.

La metodología de esqueletización propuesta considera cuatro elementos fundamentales en su desarrollo general. En primer lugar reduce los puntos de cálculo en el proceso de esqueletización y genera modelos simplificados que

corresponden hidráulicamente con el modelo inicial. Incluye también la metodología de esqueletización por resiliencia y potencia unitaria, que en cada iteración, el tubo que es removido de la RDAP no deja ningún nudo de consumo desconectado y genera el menor impacto en el cambio del índice de resiliencia o potencia unitaria, dependiendo de cuál criterio se está utilizando.

### **2.3 CALIBRACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN CON MÉTODOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL**

La calibración de redes de distribución de agua potable<sup>13</sup> es de vital importancia para poder realizar una adecuada operación y mantenimiento de las mismas, puesto que permite que las simulaciones hidráulicas hechas sobre los modelos de la red sean confiables, válidas y ofrezcan los datos necesarios para tomar decisiones acertadas de operación.

Debido a que la calibración de redes no es un problema que pueda ser resuelto analíticamente al tener más incógnitas que ecuaciones, existen dos algoritmos que han resultado útiles para este tipo de problemas. El primer algoritmo genético busca los valores de cada uno de los atributos de una red de forma independiente, evaluando para cada individuo, la similitud entre su comportamiento hidráulico y los datos medidos en la red real. El segundo es un módulo de programación por restricciones, a través del cual se busca establecer restricciones entre las variables involucradas en la calibración de forma que el espacio de búsqueda se reduzca y se encuentren soluciones para todos los atributos de la red simultáneamente.

---

<sup>13</sup> (Saldarriaga, Pavco S.A, 2008)

## 2.4 METODOLOGÍA PARA LA CALIBRACIÓN DE UNA RDAP

El proceso de calibración de un RDAP busca encontrar los diámetros reales, la rugosidad absoluta y el coeficiente de pérdidas menores de cada tubería, así como el coeficiente y exponente de emisores en cada uno de los nodos de la red; estos últimos son necesarios si se está calibrando la red bajo un ambiente de fugas<sup>14</sup>. Una vez se conozcan todos estos parámetros, el modelo calibrado se puede utilizar para probar cualquier otra condición hidráulica, convirtiéndose así en una herramienta operativa.

### 2.4.1 Monitoreo de una red de distribución

Se realiza a través de mediciones de caudal y de presión en distintos puntos de la misma.

- Puntos de medición de caudal: se localizan a la entrada de la red y representan la masa que ingresa al sistema.
- Puntos de medición de presión: distribuidos a lo largo de toda la red, reportan la energía consumida en el transporte y distribución del líquido.

El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (**amb**) S.A E.S.P. mediante caudalímetros y manómetros obtiene los datos de caudal y presión por monitoreos programados, durante cierto período de tiempo en diferentes puntos de la red de distribución.

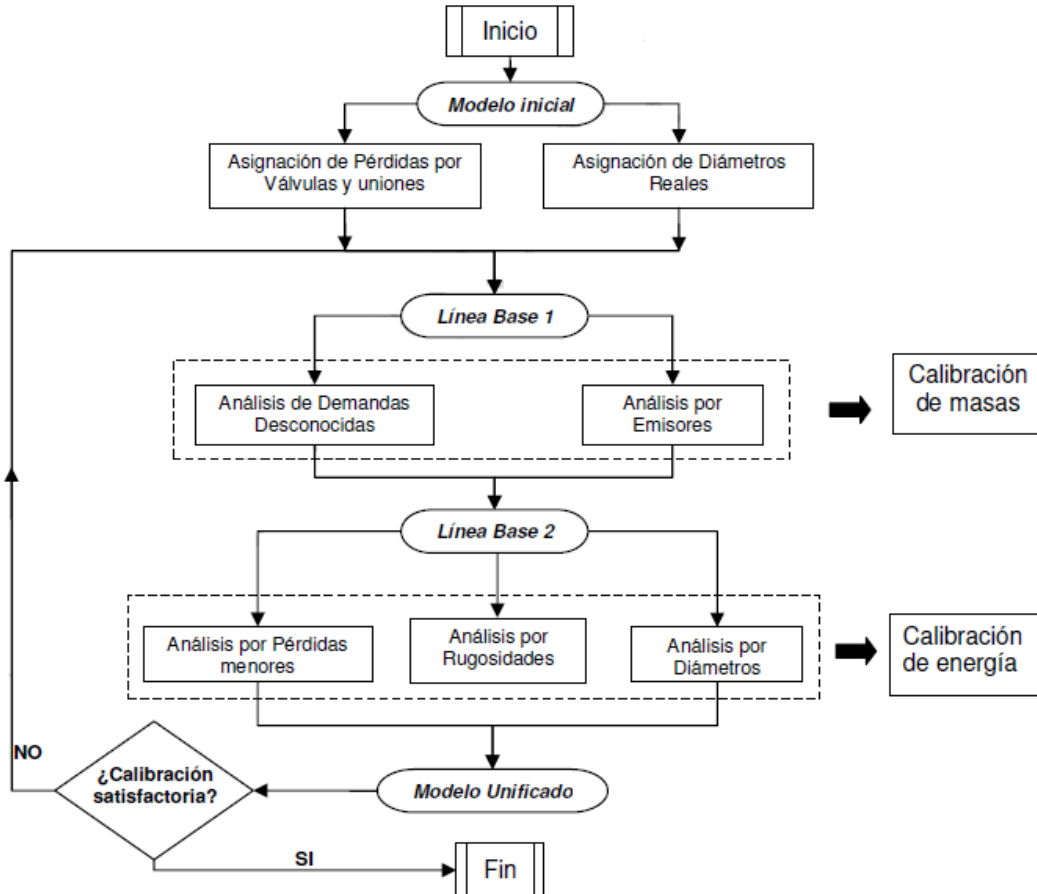
---

<sup>14</sup> (Saldarriaga, HIDRÁULICA DE TUBERÍAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos., 2007)

El amb también nos generó el esquema de la red de distribución donde se conocen los diámetros, las longitudes y demás accesorios con los que cuenta dicha red.

La Universidad de los Andes ha utilizado una metodología para la calibración de redes de distribución, la cual proporción un enfoque sistémico al problema, clasificando las variables involucradas de acuerdo a sus principales características. A continuación se presenta esta metodología.

**Figura 6** Metodología de calibración de RDAP



Fuente: (CIACUA) Universidad de los Andes

### **2.4.2 Modelo Inicial**

Consiste en el resultado que se obtiene al procesar y convertir toda la información topológica y de consumos suministrado por la empresa prestadora del servicio de agua potable, en un modelo hidráulico, en este caso el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb E.S.P. El modelo inicial no contiene pérdidas menores.

### **2.4.3 Línea Base 1**

Este modelo se obtiene como resultado de asignar al modelo inicial los diámetros internos de todas las tuberías de acuerdo con los reportes de los fabricantes. Adicionalmente se añade un coeficiente de pérdidas menores por metro, por concepto de uniones principalmente.

Conformada a partir de la inclusión de los diámetros internos reales de todas las tuberías y de los coeficientes de pérdidas menores para simular el efecto de uniones.

Coeficiente de pérdidas menores por metro utilizados según el material (Saldarriaga, Pavco S.A, 2008):

- PVC: 0.02
- Otros materiales: 0.03

#### **2.4.3.1 Análisis de Demandas Desconocidas**

Conjunto de escenarios hidráulicos construidos a partir de la modificación de la demanda base de algunos nodos de la red, a través de los que se trata de identificar zonas en las cuales puedan existir pérdidas comerciales.

Al mismo tiempo se busca con estos escenarios, ajustar la masa que entra y sale de la red de distribución, para comprobar así el papel de las demandas en el sistema de forma global.

Los escenarios probados se construyen teniendo en cuenta algunas características de los nodos, tales como su ubicación, el estrato socioeconómico predominante y el uso que se le da al agua.

**Tabla 1** Clasificaciones típicas de los nodos en el análisis por demandas desconocidas

Por estratos	Por Usos	Por zonas topológicas
1	Residencial	Urbanos
2	Comercial	Rurales
3	Institucional	Subredes
4	Oficial	

#### 2.4.3.2 Análisis por Emisores

Conjunto de pruebas que busca ajustar las mediciones de caudal y de presión a través de escenarios en los que se varia exclusivamente el coeficiente de emisión en los nodos de la red. Al igual que el análisis por demandas desconocidas, en el análisis se busca establecer el papel global que éstos tienen frente al sistema. La creación de escenarios se basa en criterios hidráulicos, socioeconómicos y topológicos<sup>15</sup>, tal como se observa en la Tabla 2

---

<sup>15</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

**Tabla 2** Clasificaciones típicas de los nodos en el análisis por emisores

<b>Estratos</b>	<b>Usos</b>	<b>Zonas top.</b>	<b>Presión</b>	<b>Material</b>
1	Residencial	Urbanos	Baja	A.C.
2	Comercial	Rurales	Media	P.V.C.
3	Institucional	Subredes	Alta	H.F
4	Oficial		Muy alta	H.G

#### **2.4.4 Línea Base 2**

Escenario encargado de recopilar los resultados obtenidos a través de los análisis independientes por Demandas Desconocidas y Emisores<sup>16</sup>.

Con la Línea Base 2 se busca ajustar de forma casi definitiva las curvas de masas y tener una buena aproximación al comportamiento medido con relación a las curvas de energía.

##### **2.4.4.1 Análisis por Pérdidas Menores**

En éste se considera el efecto que tiene sobre la red la existencia de accesorios u otros elementos en contacto con el flujo, que causan pérdidas de energía.

##### **2.4.4.2 Análisis por Rugosidades**

Se prueba el efecto que tienen los cambios en la rugosidad original de las tuberías, sobre el comportamiento hidráulico del modelo. Los escenarios de prueba se crean con base en el material y la velocidad de flujo de las tuberías.

---

<sup>16</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

#### **2.4.4.3 Análisis por Diámetros**

Se analiza el efecto que tienen sobre el sistema las ligeras variaciones en los diámetros que pueden ocurrir en las tuberías debido al flujo de agua.

Para la generación de escenarios se tienen en cuenta el material y las velocidades de flujo.

#### **2.4.5 Modelo Unificado**

Recoge los mejores escenarios probados durante los análisis por Diámetros, Rugosidades y Pérdidas Menores, a través de los cuales, se busca principalmente ajustar las curvas de energía obtenidas a través de la Línea Base 2<sup>20</sup>.

### **2.5 HERRAMIENTA COMPUTACIONAL**

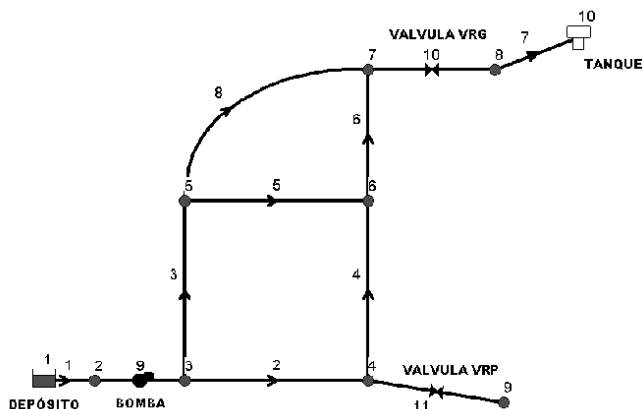
#### **2.5.1 Epanet**

EPANET es un programa desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, Environmental Protection Agency), para el estudio y análisis del comportamiento de redes hidráulicas a presión. El programa está compuesto por un módulo de análisis hidráulico que permite simular el comportamiento dinámico de una RDAP. Hace posible incorporar a la simulación de tuberías, bombas de velocidad fija y velocidad variable, válvulas de estrangulación, válvulas reductoras y sostenedoras de presión, tanques de altura piezométrica constante o variable constante o variable y sistemas de control y operación temporales o según nivel y presión<sup>17</sup>.

---

<sup>17</sup> Saldarriaga, Juan HIDRAULICA DE TUBERIAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos. Alfaomega

**Figura 7** Componentes de una red en EPANET



Fuente: (EPA) Manual de Usuario Epanet

El análisis hidráulico de la red se puede realizar mediante las ecuaciones de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach o Chezy-Manning a fin de calcular las pérdidas de altura piezométrica por fricción. EPANET utiliza la metodología del gradiente para la solución matemática de la red.

Permite el análisis hidráulico, calidad de agua, simulación extendida. Tiene una presentación de resultados por: Pantalla, en tablas, en gráficas, en archivos de texto. Tiene una ventaja respecto a otros programas por su facilidad de uso, que su distribución es gratuita, y tiene una excelente presentación de resultados. Epanet tiene los mejores tiempos de cálculos para las simulaciones.

### **3 CREACIÓN DEL MODELO HIDRÁULICO DE RED MATRIZ DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA amb S.A. E.S.P.**

#### **3.1 MODELACIÓN HIDRÁULICA DE UNA RDAP**

Consiste en un archivo digital que contiene toda la información relacionada con los elementos físicos que conforman el sistema (tubos, tanques, válvulas, bombas), la información topográfica del terreno en que se encuentra ubicada y la información de consumos de los usuarios que dependen del sistema.

A través de un modelo hidráulico es posible representar con precisión los distintos fenómenos que ocurren al interior de los sistemas, lo que los convierte en una herramienta ideal para realizar labores de operación, expansión y mantenimiento de forma óptima.

##### **3.1.1 Información de consumos**

Uno de los aspectos más importantes que deben considerarse durante la construcción de cualquier modelo hidráulico de un RDAP, está relacionado con el cálculo y distribución de los consumos de masa que se presentan a lo largo de la red, ya que con estos se determina la demanda de agua sobre las fuentes de abastecimiento y la forma en la que ésta transita al interior del sistema.

##### **3.1.2 Mediciones de caudal y presión**

Otro aspecto importante en el desarrollo de los modelos hidráulicos de RDAP tiene que ver con la verificación de su funcionamiento a través de comparaciones con

mediciones tomadas en campo. Dichas mediciones se encuentran relacionadas con valores de caudal (que se toman principalmente a la salida de las plantas de tratamiento y a la entrada a sectores) y de presión, pertenecientes a la red de monitoreo con la que las empresas operan sus sistemas.

### **3.1.3 Simplificación en la representación de los tanques**

La mayoría de los tanques de almacenamiento con que cuenta la ciudad se encuentran representados en los modelos hidráulicos a través de embalses, los cuales no tienen la capacidad de representar adecuadamente la dinámica de almacenamiento ni los fenómenos de calidad que ocurren al interior de los mismos.

### **3.1.4 Representación de los consumos**

Uno de los aspectos importantes que debe considerarse durante la construcción de un modelo de cualquier sistema de transporte y distribución de agua potable está relacionado con la forma en que se asignan y representan las demandas ya que esta determina directamente la magnitud y distribución de los caudales y presiones de la red. Actualmente estos consumos se simulan mediante varias curvas para cada uno de los sectores de la ciudad.

### **3.1.5 Calibración y ajuste de las redes en campo**

Uno de los aspectos más importantes que debe cumplir todo modelo hidráulico es garantizar una representación adecuada de los resultados de campo, es por eso que el amb cuenta con un amplio sistema de medidores de caudal y presión distribuidos en toda la red matriz.

## **3.2 MODELO HIDRÁULICO DE LA RED MATRIZ DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA**

Uno de los factores principales que se requiere es la posibilidad de conocer el comportamiento de los elementos que constituyen el sistema matriz de la ciudad. Para lograr este objetivo se requeriría tener miles de sensores ubicados en casi todos los elementos de la red monitoreando en forma continua las variables más relevantes del sistema, lo cual resulta inmanejable por la cantidad de datos y al mismo tiempo de muy alto costo.

### **3.2.1 Descripción de la red matriz**

La red matriz de Bucaramanga está conformada por 68.62 [km] de tuberías de diferentes diámetros y rugosidades, se encuentran 7 tipos de materiales de los cuales el asbesto cemento es el más utilizado.

El sistema de abastecimiento está compuesto por 39 tanques de almacenamiento que proveen las redes de distribución del municipio, la red matriz es la encargada de transitar el agua potable de las plantas de tratamiento a estos tanques.

La red se encuentra equipada con 8 válvulas reguladoras y 1174 tuberías que en total suman alrededor de 68.62 [km], la cual presenta una gran variedad de diámetros y materiales.

### **3.2.2 Descripción de la topología de la red**

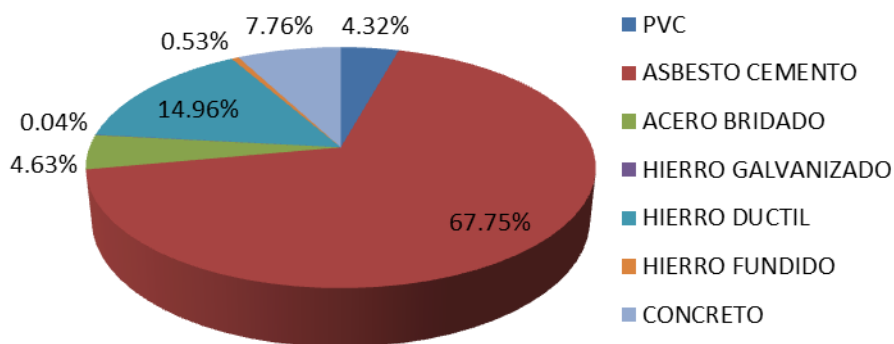
De todos los materiales presentes, se destaca el asbesto cemento con alrededor de un 67.7% de la red en longitud, los demás porcentajes se muestran en la siguiente Tabla 3.

**Tabla 3** Materiales presentes en la longitud de la red

MATERIALES	RUGOSIDAD	LONGITUD [m]	PORCENTAJE [%]
PVC	0.0015	2964.35	4.32
ASBESTO CEMENTO	0.03	46492.27	67.75
ACERO BRIDADO	0.09	3179.63	4.63
HIERRO GALVANIZADO	0.15	28.32	0.04
HIERRO DUCTIL	0.25	10269.28	14.96
HIERRO FUNDIDO	0.26	366.64	0.53
CONCRETO	0.3	5324.34	7.76
<b>TOTAL</b>		68624.83	100.00

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

**Figura 8** Distribución porcentual de los materiales de la red



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Además de la caracterización basada en los materiales, las redes de distribución de agua potable también pueden describirse a través de los diámetros de las tuberías que lo integran. Para el caso de la red matriz se presentan una gran variedad de diámetros, de los cuales el más utilizado en longitud de tubería son 14 in que corresponden al 23.02% de la red, seguidos por diámetros entre 12 in que corresponden al 21.68% de la red, diámetros de 16 in que corresponden al 14.1%, diámetros de 24 in que corresponden al 11.92%, diámetros de 8 in que corresponden al 7.66%, diámetros de 10 in que corresponden al 7.87%, diámetros de 20in que corresponden al 4.54%, diámetros de 6 in (que corresponden al

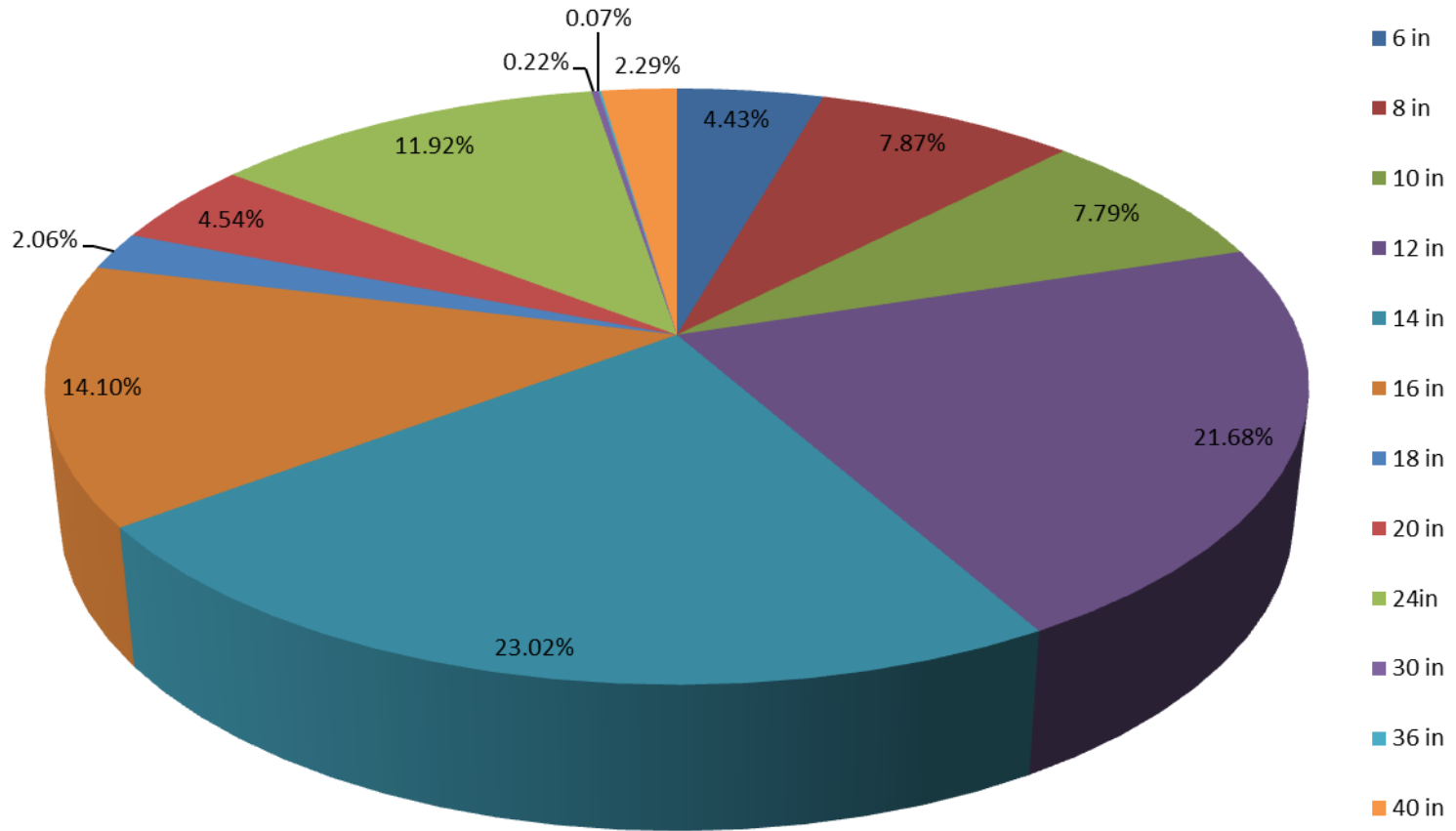
4.43%. El resto de diámetros representan longitudes de la red pequeñas, inferiores al 3%.

**Tabla 4** Diámetros presentes en la longitud de la red matriz

<b>DIAMETROS [in]</b>	<b>LONGITUD [m]</b>	<b>PORCENTAJE [%]</b>
6 in	3042.89	4.43
8 in	5402.03	7.87
10 in	5349.29	7.79
12 in	14876.94	21.68
14 in	15797.81	23.02
16 in	9677.47	14.10
18 in	1414.76	2.06
20 in	3114.92	4.54
24in	8178.76	11.92
30 in	151.5	0.22
36 in	47.82	0.07
40 in	1570.64	2.29
<b>TOTAL</b>	<b>68624.83</b>	<b>100.00</b>

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

**Figura 9** Distribución porcentual de los diámetros de la red matriz



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

### **3.2.3 Descripción del uso de la red matriz**

Un componente de gran importancia, en cuanto infraestructura se refiere, para la conducción y distribución de agua potable son las redes por donde se conduce y se distribuye; la red matriz es la malla principal del servicio del Área Metropolitana, la cual está conformada por los municipios de Bucaramanga, Girón, Floridablanca y Piedecuesta, que distribuye el agua procedente de la conducción desde las plantas de tratamiento o tanques de almacenamiento, los cuales son operados por la sección de abastecimiento del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb S.A E.S.P, a las redes secundarias.

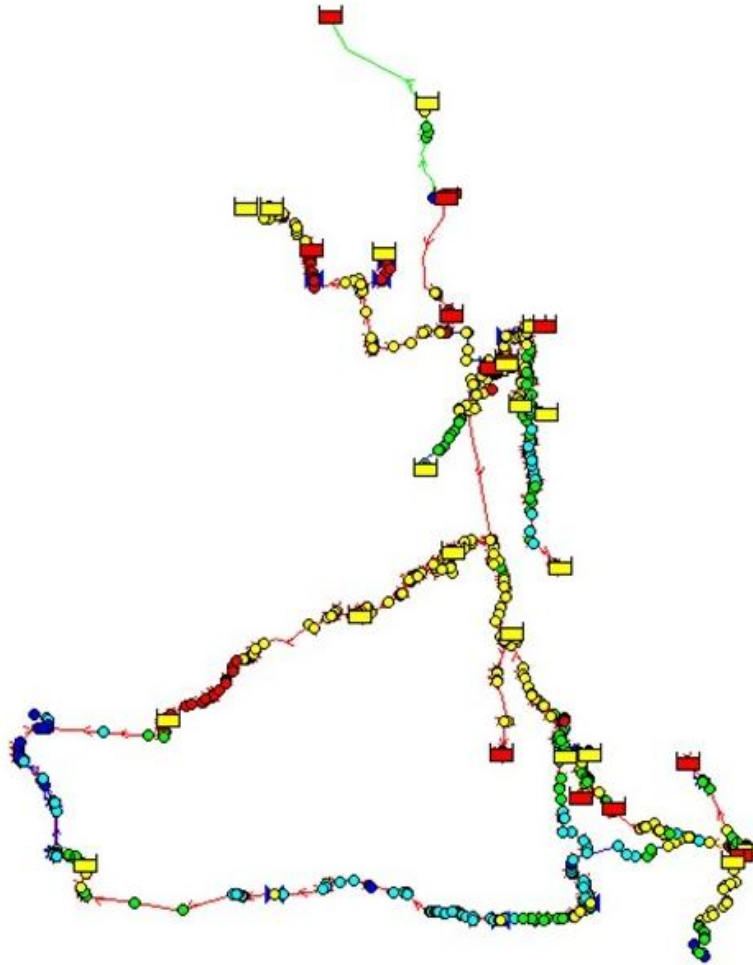
El Acueducto Metropolitano de Bucaramanga asegura una presión para el área metropolitana de 15 [m.c.a] de servicio para el funcionamiento apropiado de todo el sistema.

### **3.2.4 Generación del archivo de modelación (\*.INP)**

A nivel mundial existen distintos programas diseñados para simular la hidráulica de redes presurizadas que transportan o suministran agua potable; cada uno tiene configuraciones particulares en la forma con que manejan las estructuras de datos y el método de solución de las matrices que resultan al aplicar las ecuaciones que rigen los sistemas.

La transformación de la información topológica de un sistema del tamaño de la red matriz de Bucaramanga en un archivo de modelación \*INP fue entregado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, razón por la cual en esta tesis se usó el programa EPANET herramienta informática que se ajusta a las características de la información del amb E.S.P para conseguir así construir modelos hidráulicos detallados.

**Figura 10** Archivo de simulación de la red matriz de Bucaramanga



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb E.S.P.

### **3.2.5 Montaje de embalses y tanques de almacenamiento**

Para efectos de la modulación hidráulica las plantas de tratamientos se representan a través de embalses los cuales simulan la presencia de cuerpos de agua que tienen la capacidad de proporcionar agua ilimitadamente a las redes. Los embalses no representan una geometría específica y su principal característica dentro de los modelos hidráulicos es la elevación (cota) de nivel de agua.

### **3.2.6 Sectorización**

El proceso de establecer el estado de todas las válvulas del sistema para determinar las rutas que el flujo deba seguir, y garantizar el funcionamiento óptimo de la red, se conoce con el nombre de sectorización. Su implementación puede representar de forma correcta el comportamiento en campo.

### **3.2.7 Macromedición**

Consiste en medir datos adquiridos a través de medidores de caudal y presión instalados en campo, los cuales permiten monitorear de forma continua el comportamiento de la masa y energía al interior del sistema.

En el caso del modelo hidráulico de la red matriz de Bucaramanga uno de los aspectos más importantes que se consideraron para la construcción fue el hecho de construirlo a partir de series diarias medidas que permitieran simular con precisión el comportamiento de los caudales y presiones, bajo distintos esquemas de operación. Por tal razón esta tesis realizó un extenso proceso de recolección georeferenciación, procesamiento y asignación de datos para garantizar un funcionamiento óptimo del modelo hidráulico desarrollado. **(Ver Anexo A).**

#### **3.2.7.1 Ubicación medidores de caudal**

El amb E.S.P. cuenta con amplia red de medidores de caudal distribuidos en toda el Área Metropolitana, a través de los cuales es posible conocer en todo momento, el comportamiento de los principales elementos que conforman la red matriz, debido a su importancia estratégica en la operación del sistema, se realizó un proceso de ubicación dentro de las redes, en la cual se identificaron los medidores de caudal los cuales fueron suministrados por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

**Tabla 5** Zonas de ubicación de los caudalímetros

<b>ZONA</b>	<b>No</b>	<b>CAUDALÍMETRO</b>
<b>Noroccidental</b>	1	Caudal entrante del Tanque Estadio al Tanque Bienestar
	2	Caudal de salida de Tanque centro a Distrito Centro
	3	Caudal de entrada de Tanque Morro Bajo a Tanque Centro
	4	Caudal de entrada a Tanque Regadero de Tanque Estadio
	5	Caudal de salida de Tanque Estadio incluido Bienestar y Regadero
	6	Caudal en cámara San Francisco
	7	Caudal de salida Bosconia a Tanque Estadio
	8	Caudal de salida Bosconia a Colorados
<b>Oriente</b>	9	Caudal de salida de tanque La Flora a Conducción de Oriente
	10	Caudal de salida del Tanque La Flora a Tanque Norte Bajo
	11	Caudal de salida Tanque Morro Alto a Distrito Morro
	12	Caudal de salida del Tanque Norte Alto a Tanque Morro Alto
<b>Sur</b>	13	Caudal de salida Distribución Norte Bajo
	14	Caudal de salida desde Tanque El Carmen
	15	Caudal de salida desde Tanque El Carmen a Distrito La Cumbre
	16	Caudal de salida Tanque Antigua Florida hacia Bucarica-Caracolí
	17	Caudal salida Tanque Antigua Florida hacia Florida
	18	Caudal de salida Tanque Antigua Florida hacia Santana-Zapamanga
	19	Caudal de salida Tanque Zapamanga y Malpaso hacia Girón
	20	Caudal salida Tanque Antigua Florida hacia Panorama
<b>Central</b>	21	Caudal de entrada y salida Planta de Tratamiento Florida
	22	Caudal entrante desde la Planta Morrórico a Tanque Malpaso
	23	Caudal de salida a Distrito Provenza
	24	Caudal de salida a distrito Porvenir
	25	Caudal de entrada desde Tanque Morro Bajo a Tanque Puerta del Sol
	26	Caudal de entrada desde Tanque Morro Bajo a Tanque Puerta del Sol y Malpaso
	27	Caudal de Planta Morrórico a Tanque Cañaveral
	28	Caudal La Victoria
<b>San Juan</b>	29	Caudal conducción Tanque Girón a Distrito Chimitá
	30	Caudal del Tanque San Juan Alto a Distrito San Juan (Parte alta Girón)
	31	Caudal Vertical San Juan Refuerzo
	32	Caudal de entrada desde Tanque Puerta del Sol a Tanque San Juan
	33	Caudal de entrada desde Tanque San Juan al Tanque Girón
	34	Caudal de entrada desde la Planta de Tratamiento Florida al Tanque Girón
	35	Caudal de salida medido en sitio desde el Tanque Girón

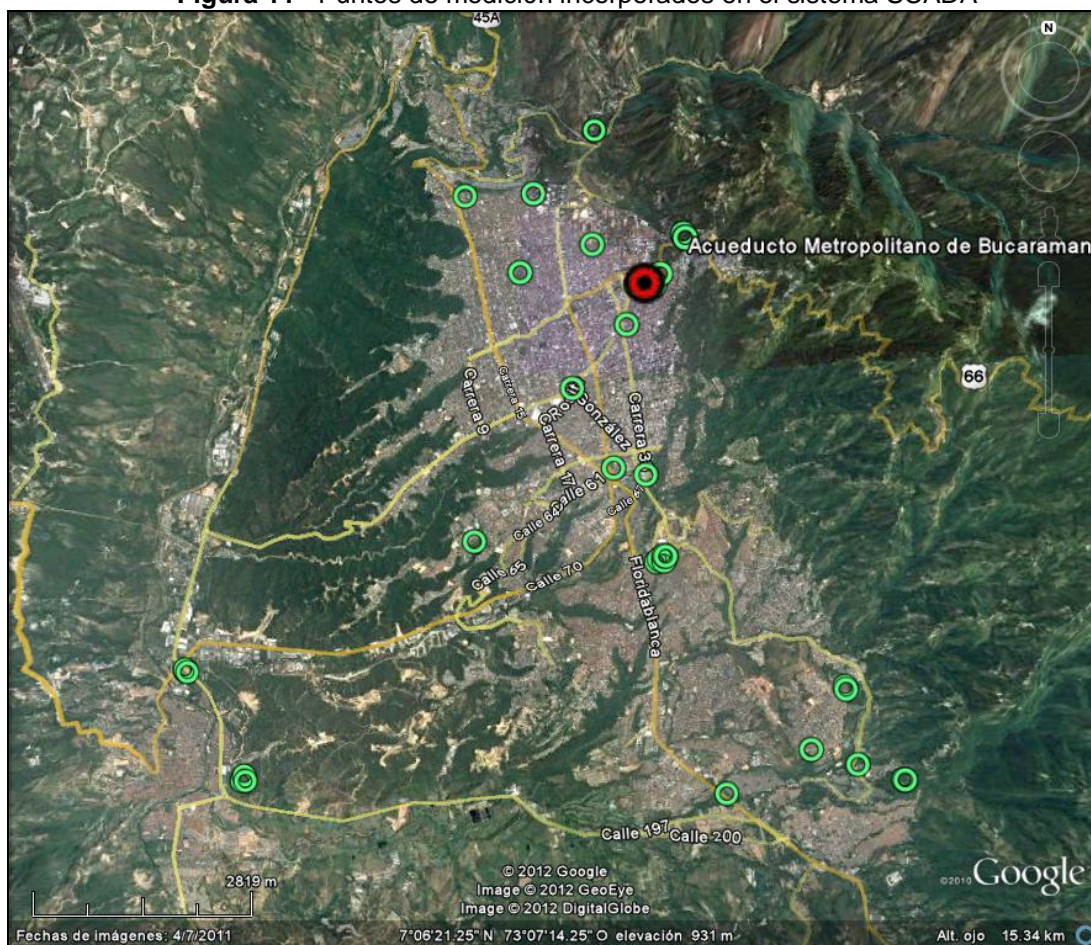
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

**Tabla 6** Coordenadas de los caudalímetros

<b>Caudalímetro</b>	<b>Coordenada X</b>	<b>Coordenada Y</b>
Conducción a Norte bajo	1107428.02	1280808.43
Conducción de Oriente	1107425.72	1280803.44
Conducción a Norte alto	1107405.87	1280865.75
Distribución Norte bajo	1107051.03	1280239.4
Distribución Morro alto	1106810.21	1280248.39
Conducción Morrórico-Malpaso	1106681.56	1279723.28
Conducción Angelinos	1106269.18	1282638.87
Conducción Bosconia-Estadio	1106279.37	1282634.03
Distribución Estadio-Regadero-Bienestar	1106215.69	1280795.46
Distribución San Francisco	1105240.58	1280441.8
Conducción Estadio-Regadero	1105419.3	1281515.24
Conducción Estadio-Bienestar	1104480.09	1281511.64
Distribución Centro	1105950.09	1278879.56
Conducción a Puerta del sol	1106514.31	1277801.34
Distribución Morro-bajo (regla Victoria)	1106955.57	1277710.86
Conducción Puerta del sol-San Juan-Mutis	1104600.75	1276793.48
Distribución San Juan refuerzo	1100394.46	1274917.11
Distribución San Juan	1100393.99	1274934.59
Distribución Chimitá	1100430.47	1274895.01
Conducción Girón-San Juan mayor	1101300.88	1273466.43
Distribución Girón mayor	1101271.64	1273392.08
Conducción Malpaso-Girón (entrada Girón)	1101324.72	1273397.28
Conducción Morrórico-Malpaso (entrada Malpaso)	1107207.59	1276616.54
Conducción Malpaso-Girón (salida Malpaso)	1107227.98	1276603.62
Distribución Porvenir	1107145.29	1276562.48
Distribución Provenza	1107206.28	1276538.94
Conducción Morrórico-Malpaso (entrada Cañaverál)	1107109.24	1276525.94
Distribución la Cumbre	1109654.1	1274825.03
Distribución el Carmen	1109641.01	1274862.45
Conducción Malpaso-Girón (Lagos II)	1108108.31	1273296.46
Conducción Florida-Zapamanga	1109186.83	1274010.81
Conducción Florida-Panorama	1109864.4	1273766.81
Distribución Florida	1110434.89	1273625.32
Conducción Florida-Caracolí-Bucarica	1110418.76	1273627.29
Conducción Norte alto-Morro alto	1107121.22	1280377.31

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

**Figura 11** Puntos de medición incorporados en el sistema SCADA



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

### 3.2.7.2 Procesamiento de las series de datos

El resultado de la recopilación y descarga de la información almacenada por equipos electrónicos de monitoreo de cualquier sistema de transporte o distribución de agua potable, consiste en una gran cantidad de registros puntuales los cuales, dependiendo de la frecuencia de toma de valores, pueden alcanzar varios cientos de miles de datos en pocas horas. Para que esta información tenga algún sentido y pueda utilizarse como elemento fundamental de la gestión y operación de los sistemas de distribución de agua potable, debe ser sometida primero a un conjunto de análisis que incluyen procesos estadísticos, a través de los cuales se buscan tendencias y se descartan lecturas atípicas. **(Ver Anexo A).**

Una vez se han depurado las mediciones consideradas erróneas, el siguiente paso es procesar la gran cantidad de puntos, de forma que se obtenga una serie representativa la que consolide el comportamiento promedio de la variable monitoreada lo cual se puede ver con más detalle en el **(Ver Anexo B)**.

Los análisis de las series se dividen en tres rangos dependiendo el día de la semana en que se realizaron: días ordinarios, fines de semana y días totales. A través de este procedimiento se encontró que en algunas zonas de la ciudad de Bucaramanga se presentan diferencias entre los días ordinarios y los fines de semana, como se observa en el **(Anexo B)**. Debido a esta situación, se tomó la decisión de alimentar los modelos hidráulicos a partir de los resultados de las mediciones de los días totales.

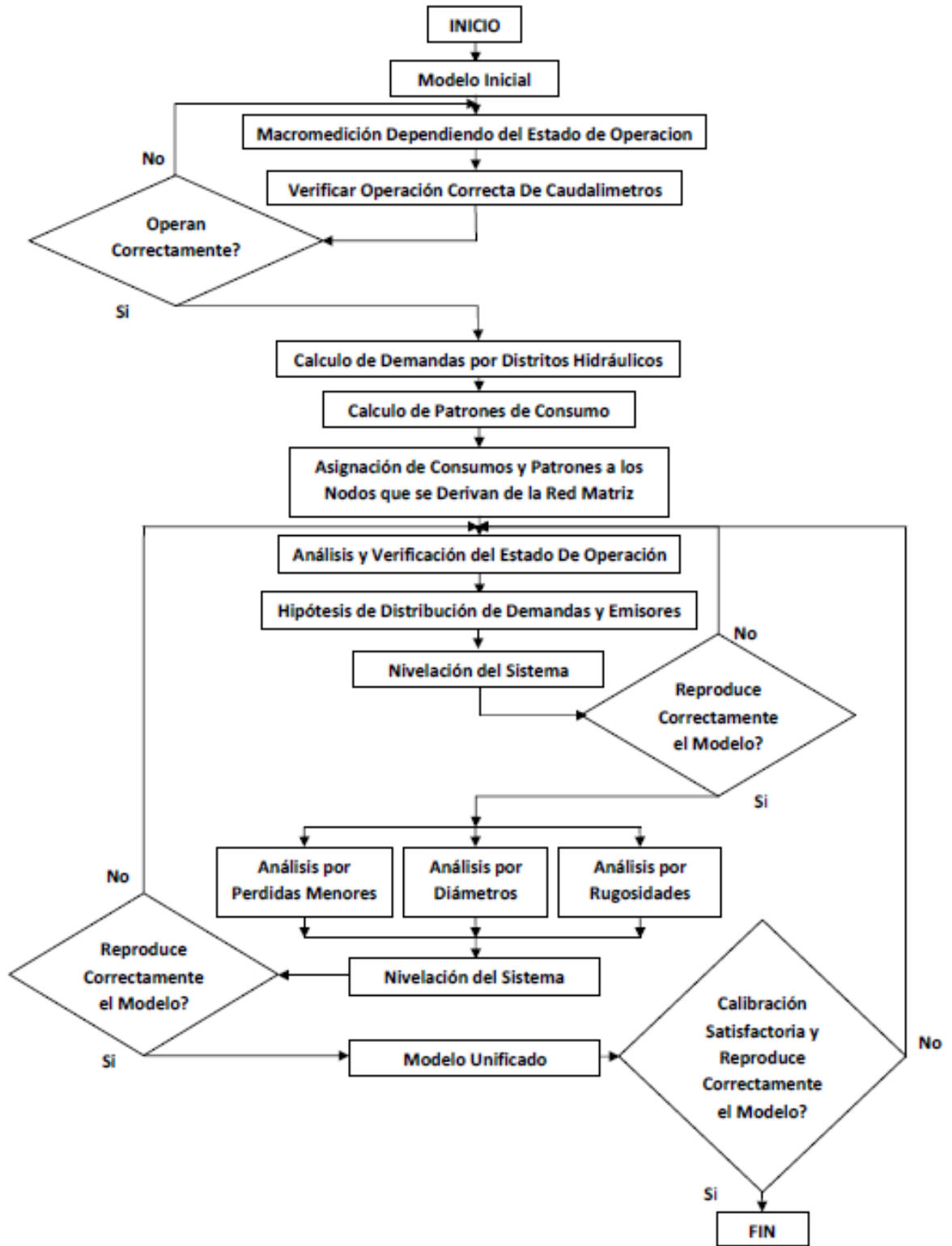
#### **4 METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE LA RED MATRIZ DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA amb E.S.P.**

Es importante poder representar de manera adecuada los resultados que ocurren en campo, para lograrlo es necesario ajustar un conjunto de parámetros únicos de cada sistema que determinan el comportamiento y distribución de la masa y la energía de la red analizada. Este proceso se le conoce con el nombre de calibración. A continuación se muestra el algoritmo creado para llevar a cabo el proceso de calibración de Redes Matrices<sup>18</sup>.

---

<sup>18</sup> (Universidad de los Andes, Centro de Investigaciones en Acueducto y Alcantarillados CIACUA, 2009)

Figura 12 Algoritmo para la calibración de Redes Matrices



En comparación los parámetros para la calibración de una RDAP, en redes matrices, existen algunos parámetros adicionales, los cuales están directamente relacionados con el comportamiento hidráulico de los diferentes estados de operación y tanques presentes en la red. Así como los consumos de las redes menores adyacentes y su comportamiento diario.

Entre los parámetros considerados, se enfatiza en el cálculo de las demandas a partir de los resultados de la macromedición, teniendo en cuenta los estados de operación implementados en el sistema de red matriz. Este aspecto no se presenta en la calibración de redes menores ya que usualmente los consumos se obtienen a partir de la lectura de micromedidores, los cuales son independientes de la forma en que haya funcionado el sistema.

Otro aspecto que se observa, es el análisis y verificación del estado de operación, que está relacionado con la calibración de masas dentro de los modelos hidráulicos. En este caso se parte de la regulación inicial de las diferentes válvulas, operación de bombas y tanques en el sistema, para luego suponer un escenario adecuado del sistema en el ajuste con la macromedición realizada.

De esta forma, el análisis de masas en la metodología de calibración de redes matrices se realiza a partir de la distribución de los consumos y sus respectivos patrones al interior de los sectores, en los nodos que se sabe que registraron demandas. Este es un proceso iterativo, el cual requiere que se planteen y prueben múltiples alternativas para cada tramo, hasta que se encuentre la mejor que se ajusta a las mediciones de campo.

El ajuste del sistema a través de la nivelación de tanques y modificación de que estados de válvulas reguladoras de caudal, es otro aspecto adicional que se observa en el algoritmo de la Figura 12 su importancia radica en el hecho de que cada que se realiza una modificación a la superficie de presiones del sistema,

pueden presentarse cambios en la cantidad de agua que dan o reciben los tanques, lo que hace que el sistema de desbalance. En un sistema que no se encuentre balanceado el comportamiento a lo largo de varias simulaciones no es estable y pueden generarse situaciones en que se desborden o se queden sin agua los tanques.

#### **4.1 CÁLCULO, DISTRIBUCIÓN Y ASIGNACIÓN DE CONSUMOS**

Durante la construcción del modelo hidráulico de un sistema típico de distribución de agua potable normalmente se dispone de la ubicación de los suscriptores que hacen uso de las redes. A partir de esta información se realiza un cruce espacial con respecto a las características topológicas de las tuberías, de forma que los consumos se cargan al modelo hidráulico en el nodo más cercano.

No obstante, cuando se trata de modelos hidráulicos de Redes Matrices, las demandas de los usuarios no se realizan directamente sobre las tuberías, razón por la cual la metodología del plano estrella no es apropiada. En estos casos los consumos están representados por las conexiones con redes menores, las cuales deben disponer de algún tipo de medición que permita conocer la cantidad de masa que deja la red matriz.

Así mismo, pueden presentarse situaciones en las que un distrito hidráulico cuenta con varias derivaciones a redes menores que no se encuentren instrumentadas, en cuyo caso, no será posible conocer de antemano el comportamiento ni la magnitud de los caudales que son demandados a la red.

#### **4.1.1 Nodos de consumo**

El cálculo, distribución y asignación de los consumos es realizado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, el cual genera los consumos facturados en los distritos hidráulicos, basados en el emitido escrito por el usuario, de esta manera se obtiene un listado de usuarios discriminado por el distrito que el usuario considere y por consiguiente generar el consumo micromedido del sector de estudio, una vez calculada la facturación de cada distrito se asignan a los nodos derivados de la red matriz. **(Ver Anexo C).**

#### **4.1.2 Cálculo de patrones de consumo**

Los patrones de consumo (o curvas de modulación de la demanda) corresponden a uno de los elementos más importantes dentro de la modelación hidráulica, ya que permiten reproducir las variaciones horarias en las demandas que se presentan a lo largo del día, haciendo posible que las simulaciones se realicen en periodo extendido. El cálculo de los patrones de consumo se lleva a cabo convirtiendo en unitarias, las series representativas obtenidas como resultado del procesamiento de la macromedición de campo. Este procedimiento consiste en dividir cada uno de los elementos de las curvas en el caudal medio diario (Qmd) de todos los datos.

### **4.2 ANÁLISIS POR RUGOSIDADES**

Al interior de las paredes de las tuberías existe un conjunto de pequeñas irregularidades que provocan resistencia al flujo y generan turbulencia, lo cual consume parte de la energía disponible. El efecto de este fenómeno sobre conductos presurizados se representa por intermedio del factor  $K_s$ , en la Ecuación 8 del Capítulo 1 conocida con el nombre de la ecuación de Colebrook-White.

Comúnmente los fabricantes de las tuberías realizan pruebas de laboratorio a través de las cuales establecen las rugosidades de sus productos una vez salen del proceso de producción. Sin embargo, con el paso del tiempo, la rugosidad de las tuberías que se encuentra en operación puede registrar algunos cambios, debido entre otros factores a la fricción con el agua que transportan, a la generación de biopelículas o a la aparición de sedimentos. Por esta razón, es importante que durante el proceso de calibración de cualquier modelo se evalúe el impacto que sobre su funcionamiento presentan las variaciones en el valor de la rugosidad de sus tuberías.

### **4.3 ANÁLISIS POR DIÁMETROS**

Las paredes de las tuberías que se encuentran en operación en un sistema de transporte o distribución de agua potable pueden sufrir algunas modificaciones causadas por distintos aspectos tales como la fricción con el líquido en movimiento, la presencia de depósitos o incrustaciones, entre otros, que pueden afectar el área transversal disponible para el flujo. Debido a lo anterior, durante el proceso de calibración se realizan análisis para evaluar el impacto de este aspecto en la distribución de masas y energías al interior del modelo hidráulico.

### **4.4 PÉRDIDAS MENORES**

La presencia de accesorios, válvulas y demás elementos al interior de los sistemas de transporte y distribución de agua potable generan distorsiones en las líneas de flujo, las cuales ocasionan pérdidas locales de energía, conocidas con el nombre de Pérdidas Menores o Pérdidas Locales . Matemáticamente éstas se

expresan como el producto entre el cuadrado de la velocidad del flujo y un coeficiente propio de cada caso, como se observa en la Ecuación 14:

$$H_m = \sum K_m * \frac{v^2}{2g}$$

**Ecuación 14** Pérdidas menores en una tubería

Donde:

$H_m$  =pérdidas menores. [m]

$\sum K_m$  =sumatoria de los coeficientes de pérdida menores en el tramo.

[adimensional]

$v$  =velocidad media de la tubería. [m/s]

Un sistema del tamaño de la red matriz de Bucaramanga incluye una gran cantidad de válvulas y accesorios, los cuales pueden presentar cambios de estado significativos durante la implementación de los distintos estados de operación. El valor de los diferentes coeficientes de pérdidas menores no se puede conocer de antemano, por lo que es necesario estimarlo durante el proceso de calibración.

#### **4.5 AJUSTE DE VÁLVULAS DE CONTROL DE CAUDAL Y NIVELACIÓN DEL SISTEMA**

A la entrada de los tanques de almacenamiento, comúnmente se instalan estructuras que permiten regular la masa que ingresa, de forma tal que exista la posibilidad de controlar los niveles de los mismos dependiendo del consumo de los usuarios. En el caso específico de la red matriz de Bucaramanga, estos

elementos se encuentran presentes en todos sus tanques, algunos de los cuales se pueden manipular en tiempo real desde el Centro de Control.

La simulación de dichas estructuras dentro de los modelos hidráulicos se realiza mediante el uso de válvulas que limitan el caudal que puede pasar por determinada línea, a través de un parámetro conocido como “Estado”. El estado de las válvulas de control de caudal en los modelos hidráulicos se representa como un valor constante a lo largo de todo el periodo de simulación.

Al interior del modelo hidráulico de la red matriz de la ciudad de Bucaramanga, existen en la actualidad un total de 39 tanques, de los cuales 4 están simulados como embalses (tanques de las plantas de tratamiento). El valor del Estado de las válvulas del modelo hidráulico está relacionado con los consumos que reporten los usuarios, con la distribución de energía del sistema y con los caudales producidos por las distintas plantas de tratamiento, por lo cual debe encontrarse dependiendo del comportamiento de la red, durante el proceso de calibración.

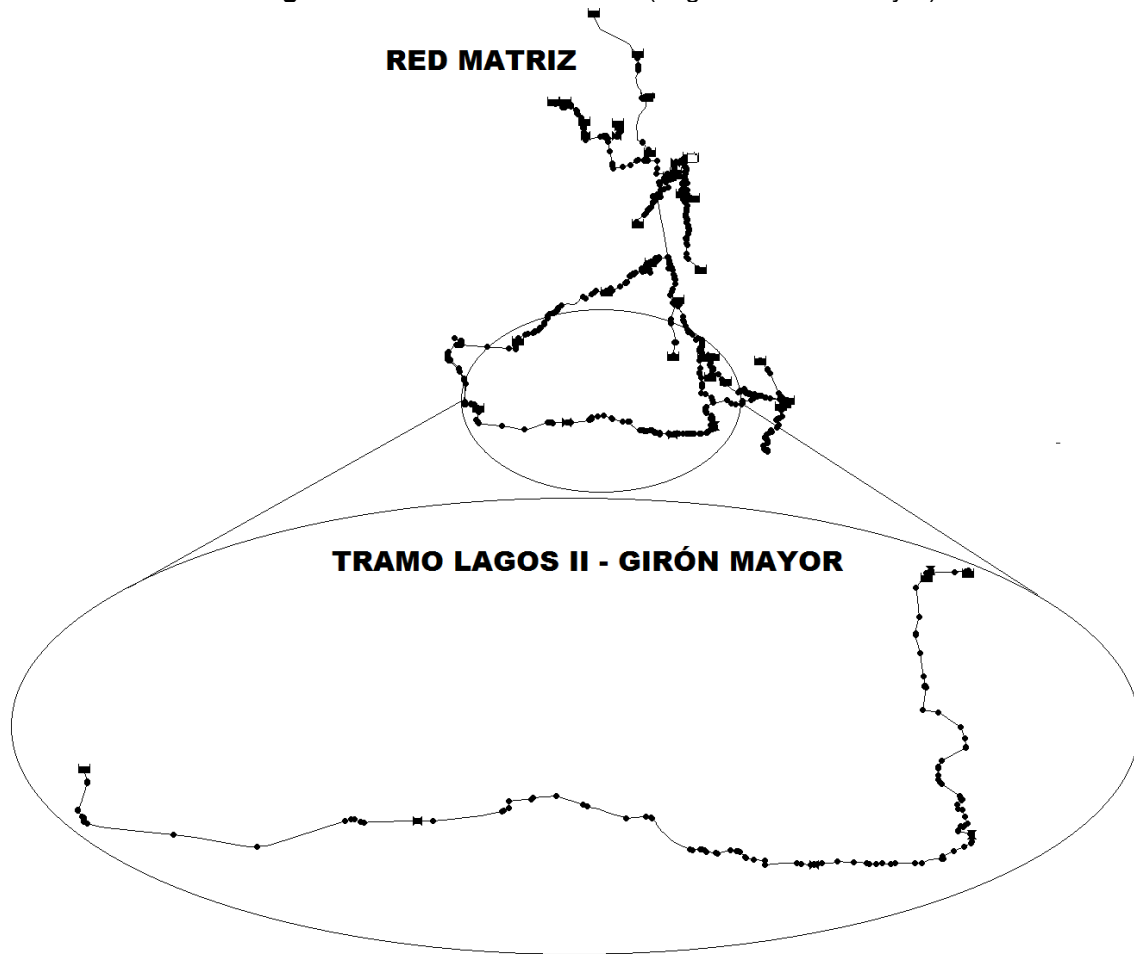
Otro tema importante que debe considerarse durante la calibración de una red de conducción con el nivel de complejidad de la ciudad de Bucaramanga, es garantizar el correcto comportamiento de los niveles de los tanques a lo largo de todo el horizonte de simulación. Este objetivo se alcanza al comparar los resultados de las mediciones con las mediciones que arroja el modelo hidráulico al interior de estos elementos.

Si los valores de las válvulas reguladoras de caudal y los niveles de los tanques en el modelo hidráulico no se encuentran correctamente establecidos, es posible que el comportamiento de las simulaciones sea fluctuante a lo largo de los días, lo que podría desencadenar en algunos casos que los tanques se derramen o se vacíen.

## 5 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN DE LA RED MATRIZ AL TRAMO FLORIDABLANCA - GIRÓN

En el presente capítulo se aplica la metodología expuesta al tramo específico de la red matriz correspondiente a la conducción Floridablanca- Girón en el periodo comprendido del mes de mayo de 2012; esta metodología es aplicable a los demás tramos de la red matriz.

**Figura 13** Tramo de red matriz (Lagos II - Girón Mayor)



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

## 5.1 DESCRIPCIÓN DEL TRAMO DE RED MATRIZ FLORIDABLANCA – GIRÓN

El tramo de red matriz Floridablanca – Girón está conformado por 11.36 [km] de tuberías de diferentes diámetros y rugosidades, se encuentran 3 tipos de materiales de los cuales el asbesto cemento es el más utilizado.

El sistema de abastecimiento está conformado por tres tanques, del cual que proveen las redes de distribución de los distritos adyacentes al tramo.

El tramo de red matriz, se encuentra equipado con 4 válvulas reguladoras de caudal y 165 tuberías que en total suman 11.36 [km].

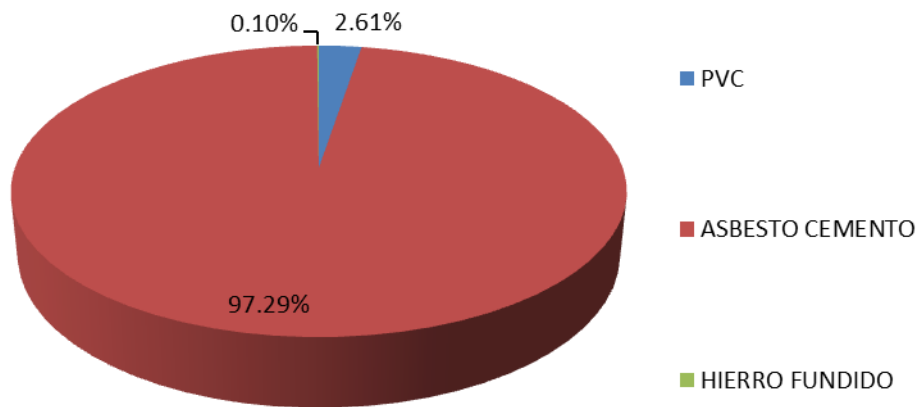
**Tabla 7** Materiales presentes en el tramo de red matriz

<b>MATERIALES</b>	<b>RUGOSIDAD</b>	<b>LONGITUD [m]</b>	<b>PORCENTAJE [%]</b>
PVC	0.0015	296.81	2.61
ASBESTO CEMENTO	0.03	11052.29	97.29
HIERRO FUNDIDO	0.26	11	0.10
<b>TOTAL</b>		<b>11360.1</b>	<b>100.00</b>

**Tabla 8** Diámetros presentes en el tramo de red matriz

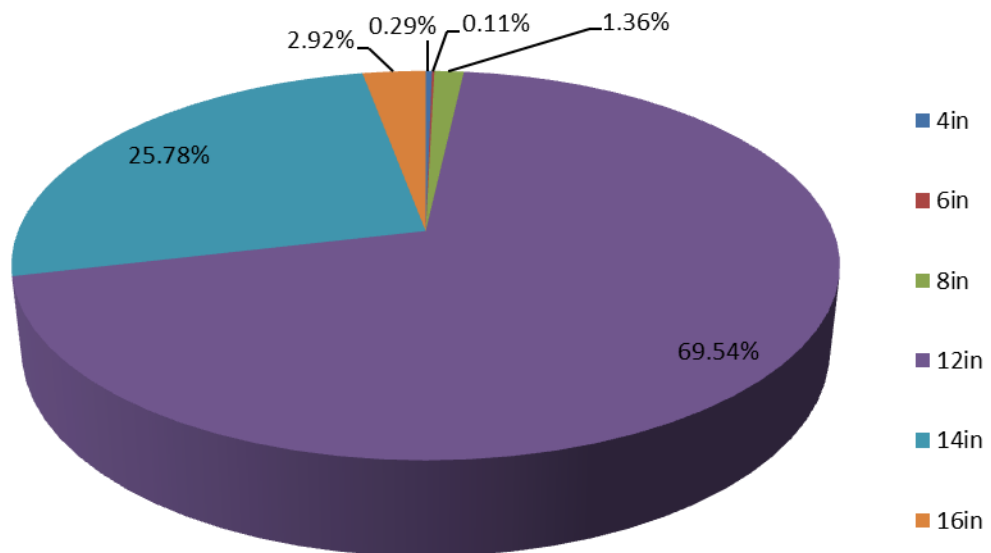
<b>DIAMETROS [in]</b>	<b>LONGITUD [m]</b>	<b>PORCENTAJE [%]</b>
4in	33.18	0.29
6in	12.59	0.11
8in	154.27	1.36
12in	7899.93	69.54
14in	2928.38	25.78
16in	331.75	2.92
<b>TOTAL</b>	<b>11360.1</b>	<b>100.00</b>

**Figura 14** Distribución porcentual de rugosidades en el tramo de red matriz



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

**Figura 15** Distribución porcentual de los diámetros en el tramo de red matriz



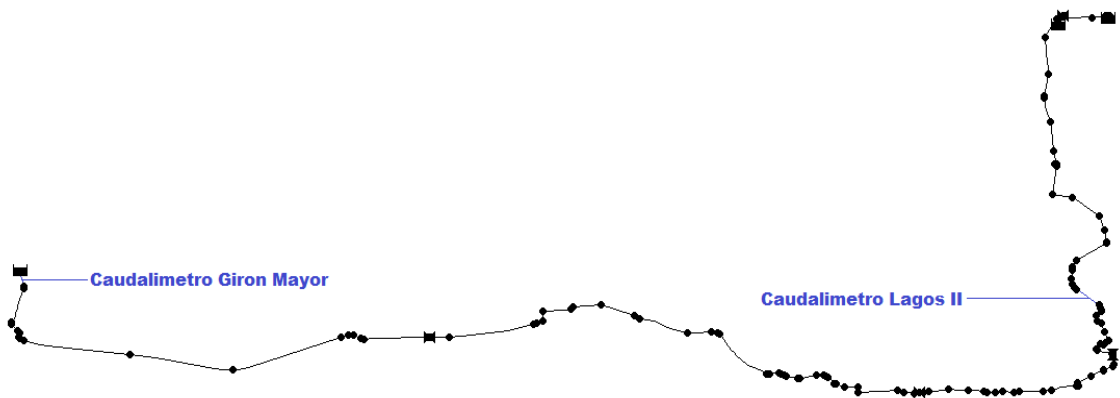
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

## 5.2 MACROMEDICIÓN Y ESTADO DE OPERACIÓN

La macromedición tomada para realizar la calibración del tramo Lagos II–Girón Mayor, fue medida por el caudalímetro ubicado en Lagos II, el cual mide la entrada al tramo y por el caudalímetro ubicado en la entrada al Tanque Girón Mayor que mide la salida del tramo.

El estado de operación de la medición tomada está dado por cuatro válvulas que se encuentran reguladas de diferente manera a lo largo del tramo. Las mediciones fueron realizadas para el estado de operación de mayo de 2012.

**Figura 16** Ubicación de los caudalímetros en el tramo de red matriz



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Figura 17 Caudales Lagos II

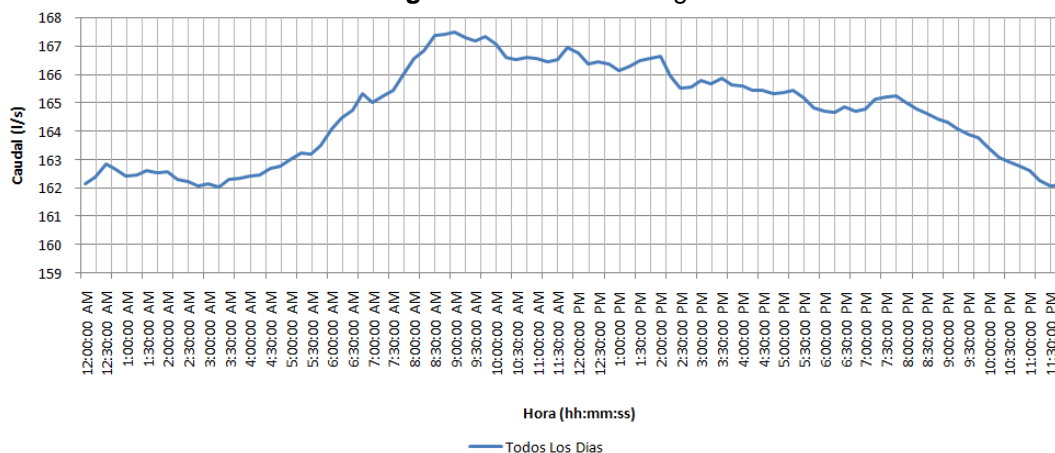
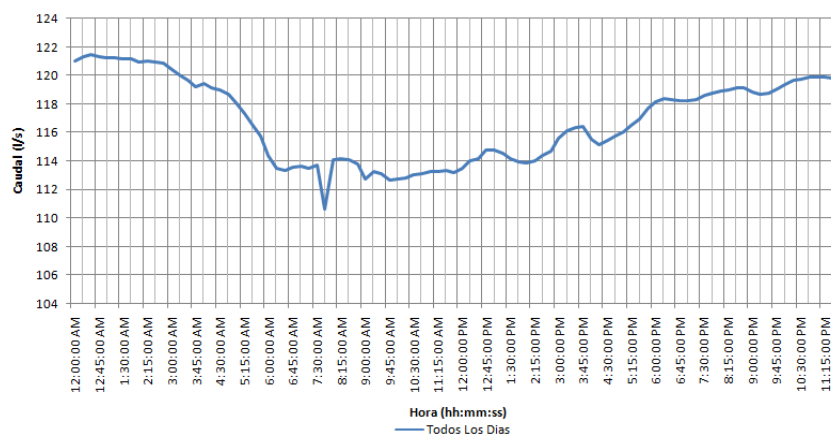


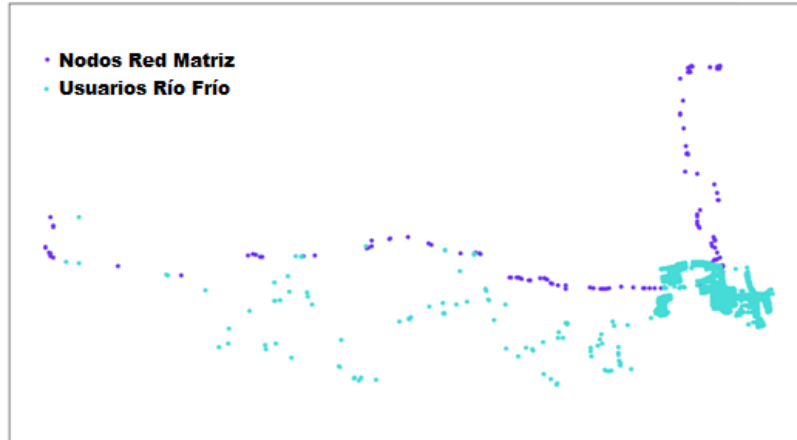
Figura 18 Caudales Entrada Girón Mayor



### 5.3 CÁLCULO DE DEMANDAS POR DISTRITOS HIDRÁULICOS

Para el cálculo de las demandas, se tomaron los consumos facturados de los usuarios del distrito adyacente al tramo de red matriz, conocidos como usuarios Río Frío. Estos consumos son asignados mediante la extensión de ArcView denominada Geoprocésing, la cual sitúa las demandas a los nodos más cercanos del tramo de red matriz, ya que de estos se deriva el flujo al distrito.

**Figura 19** Usuarios de consumo y nodos del tramo de red matriz



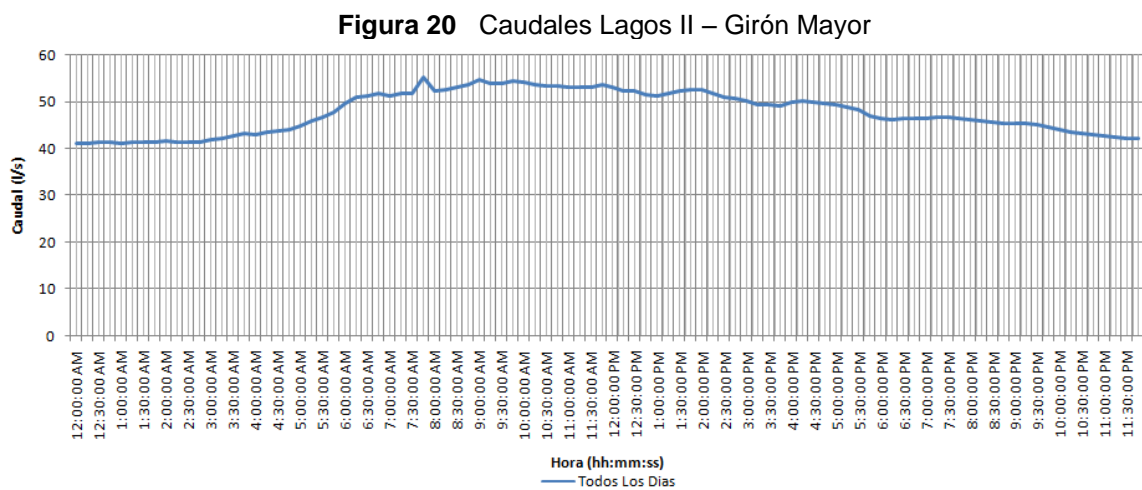
**Tabla 9** Consumo de los nodos respectivos

Nodo de red matriz	Consumo Total [L/s]	Nodo de red matriz	Consumo Total [L/s]
269418	0.12345679	30113	0.00617284
274787	0.844521613	31982	0.144675926
274811	0.004243827	59325	1.07330247
274812	1.413966056	7942	2.08256173
29405	0.394290124	7989	0.966820991
29507	0.339506173	7990	1.328703705
29510	0.727623457	7999	0.041280865
29512	0.050154321	8000	1.212577169
29518	0.339506173	8037	0.104166667
29520	0.091049383	8038	4.285879642
29604	0.167438272	8039	1.961805554
29613	0.22646605	8041	0.718750003
29614	0.070601852	8042	0.182484568
29623	0.245370371	8043	1.062500004
29626	0.103395061	8044	0.106095677
29725	0.340277778	8054	0.519290126
29741	0.201774691	8055	0.11419753
29838	2.189043211	8057	1.850694447
29845	0.739583334	vf_275585	0.008873457
29847	0.06095679	vf_29682	0

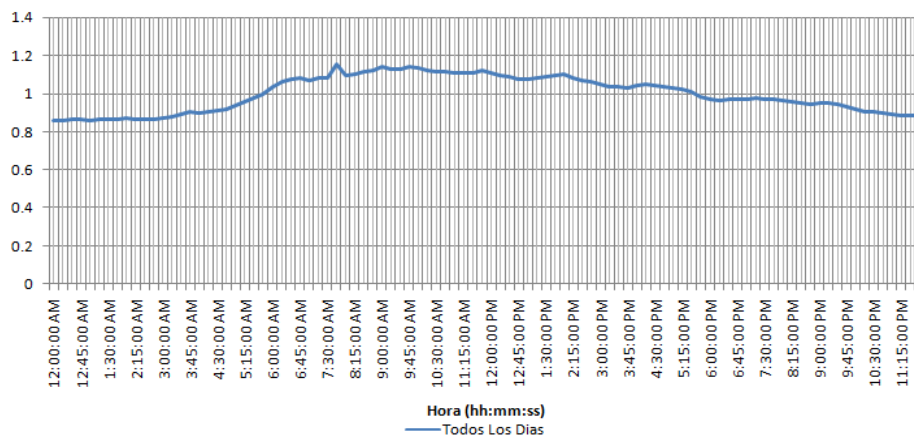
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

## 5.4 CÁLCULO DE PATRONES DE CONSUMO

El cálculo del patrón de consumo para el tramo de red matriz se llevó a cabo mediante la resta de las series medidas a la entrada del tramo (Lagos II) y las series a la salida del tramo (Girón Mayor). Se hace la resta a las series cada 15 minutos, se promedian y luego los datos se dividen por este valor promedio, generando así el patrón de consumo del tramo de red matriz.



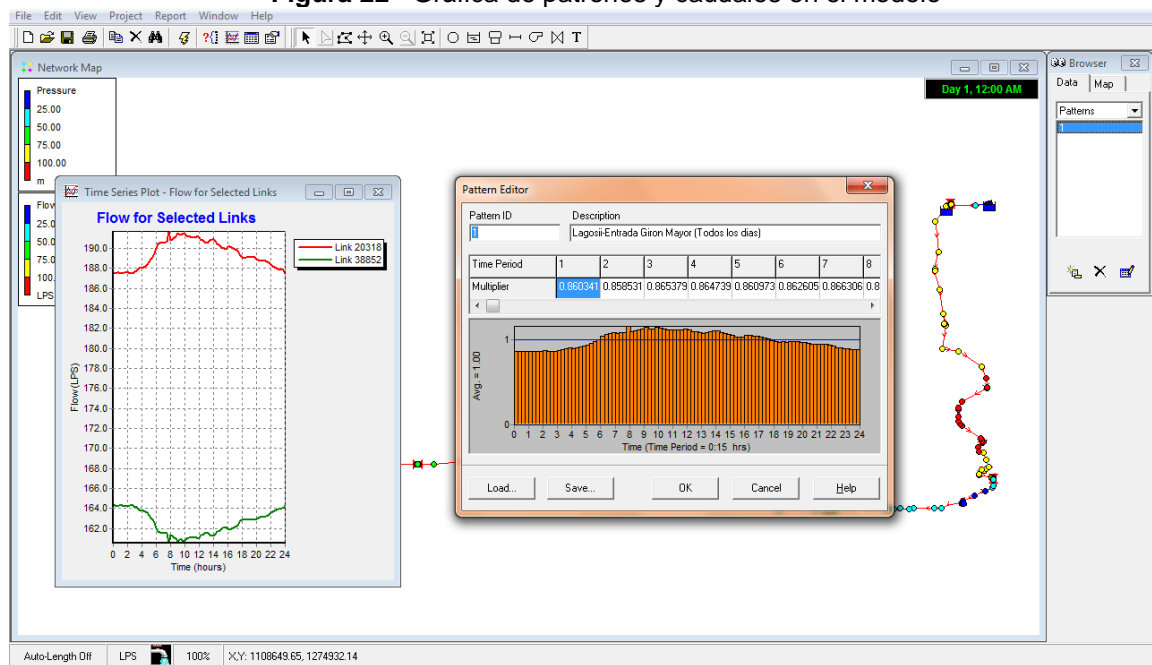
**Figura 21** Patrón de consumo del tramo de Red Matriz



## 5.5 ASIGNACIÓN DE CONSUMOS Y PATRONES AL TRAMO DE RED MATRIZ

Ya calculadas las demandas y los patrones del tramo, se asignan a los nodos respectivos del modelo y se verifica su comportamiento en un estado inicial, para ver su semejanza con las series medidas en campo; este estado inicial depende del estado de operación en que se realizó la macromedición.

Figura 22 Gráfica de patrones y caudales en el modelo

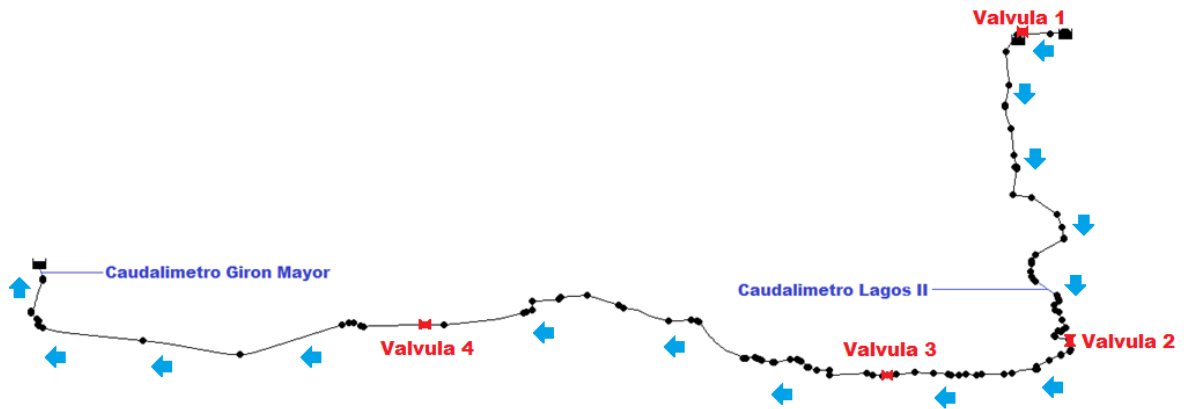


## 5.6 ANÁLISIS Y VERIFICACIÓN DEL ESTADO DE OPERACIÓN

El estado de operación está dado principalmente por la regulación de las válvulas en el tramo; ya que la apertura en que estas se encuentran es de gran importancia

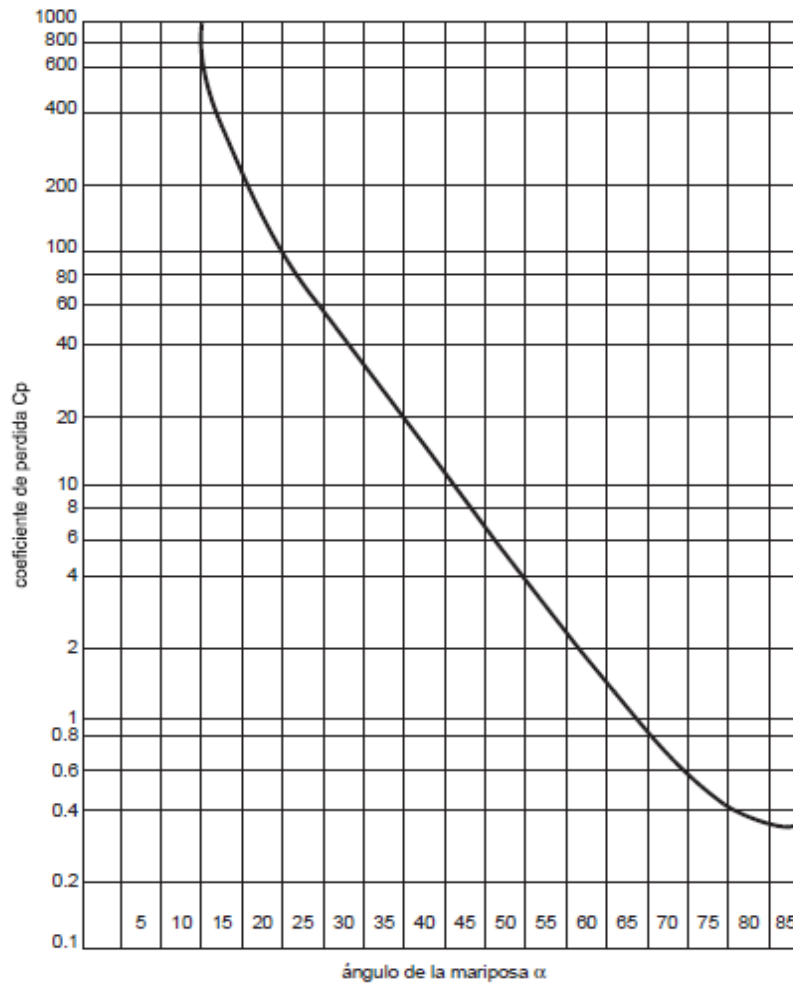
para que se realice una calibración óptima del modelo, debe analizarse su regulación en el modelo antes de hacer los demás análisis.

**Figura 23** Numeración de válvulas según el sentido de flujo en el tramo



Se contó con la información de cuatro válvulas con aperturas iniciales de 50%, 27%, 27% y 100% respectivamente siguiendo la dirección del flujo, lo cual permitió conocer los coeficientes de pérdidas para cada válvula de acuerdo a la Figura 23. Para la calibración de este tramo fue necesario variar el grado de apertura de la segunda y tercera válvula, quedando una configuración final de 50%, 28.8%, 26.7% y 100% respectivamente siguiendo la dirección del flujo.

**Figura 24** Relación de ángulo de apertura con el coeficiente de pérdida



coeficiente de pérdida de Cp de válvula de mariposa  
*CP Loss coefficient*

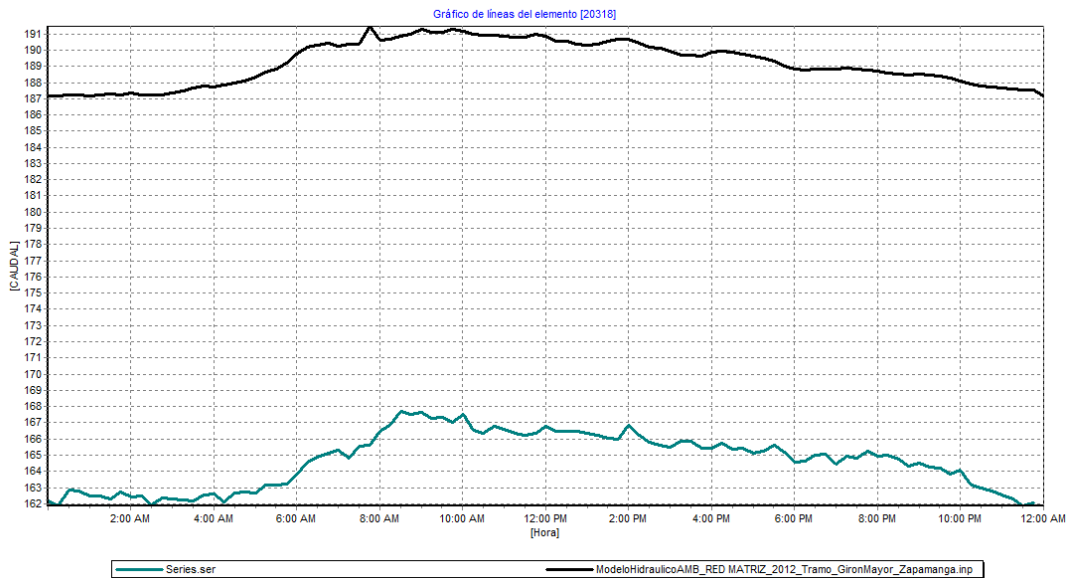
Fuente: Válvulas Mariposa ICO-MAR KV

Nota:  $C_p = Km$  = Coeficiente de pérdida. [adimensional]

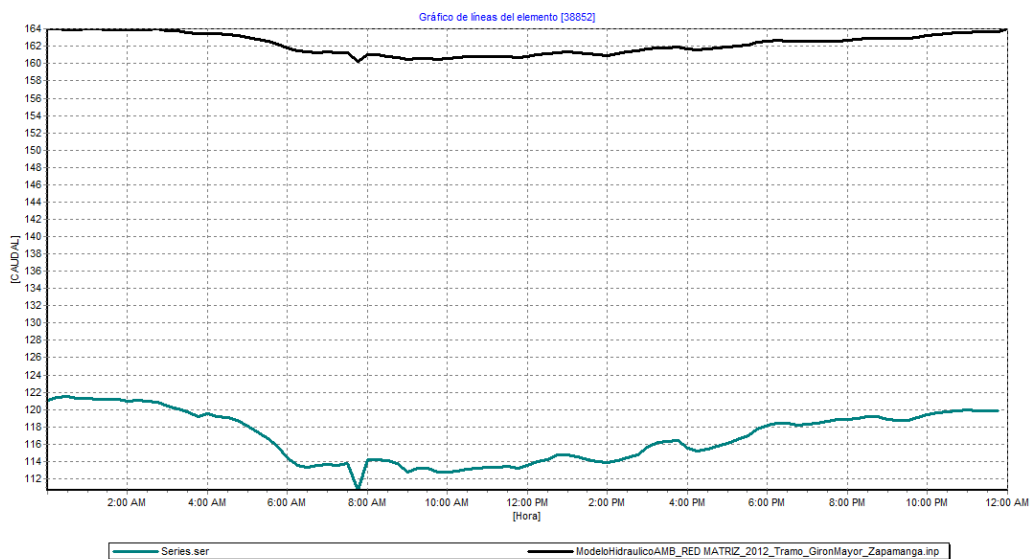
Escenario 1		Regulación de las válvulas	
VALVULAS	ACCION		
Valvula_Antes_De_Caudalimetro	VKM	ASIGNAR	11
Valvula_Igual_Apertura_LagosII	VKM	ASIGNAR	110
Valvula_Igual_Apertura_Penultima	VKM	ASIGNAR	110
Valvula_Final	VKM	ASIGNAR	0.37

Valvula_Antes_De_Caudalimetro	MENORES	ASIGNAR	0.05
Valvula_Igual_Apertura_LagosII	MENORES	ASIGNAR	0.05
Valvula_Igual_Apertura_Penultima	MENORES	ASIGNAR	0.05
Valvula_Final	MENORES	ASIGNAR	0.05

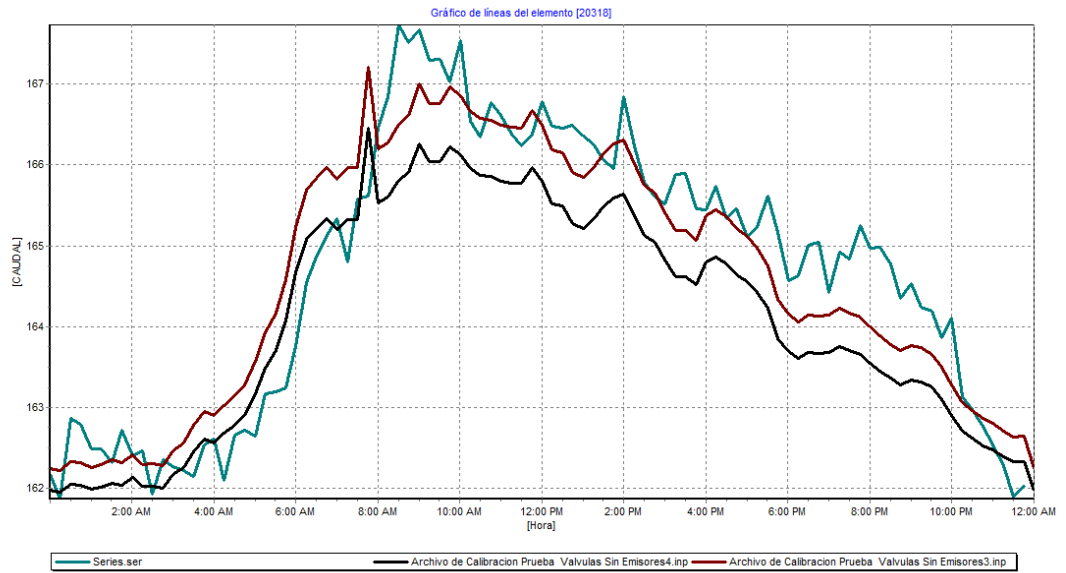
**Figura 25** Regulación inicial de las válvulas entrada del tramo (Lagos II)



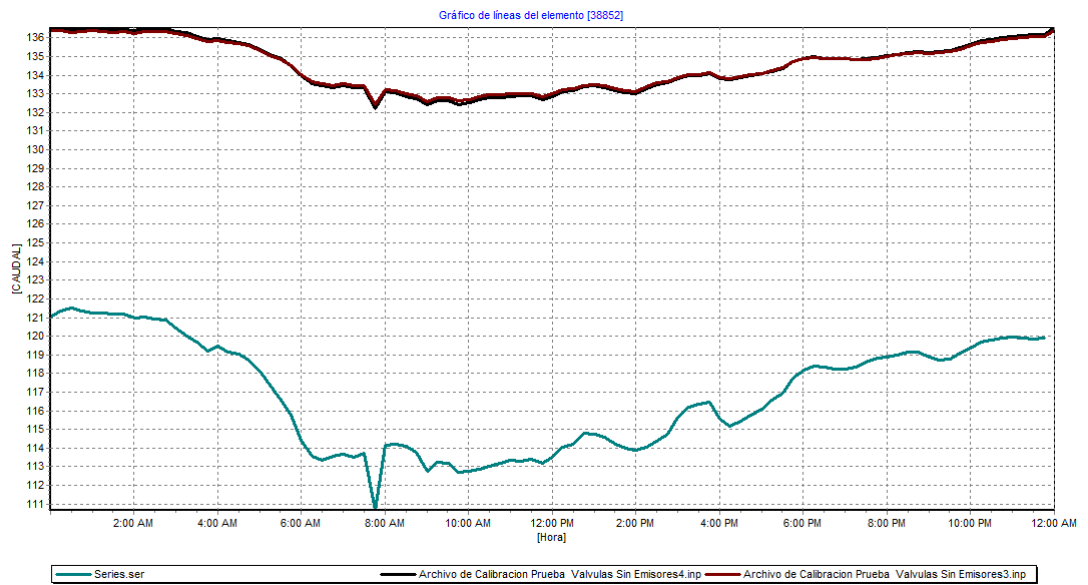
**Figura 26** Regulación inicial de las válvulas salida del tramo (Girón Mayor)



**Figura 27** Diferente regulación de válvulas entrada al tramo (Lagos II)



**Figura 28** Diferente regulación de válvulas salida del tramo (Girón Mayor)



## 5.7 HIPÓTESIS DE DISTRIBUCIÓN DE DEMANDAS Y EMISORES

Una vez regulado el modelo a un estado de operación satisfactorio con las series medidas en campo, se puede plantear una hipótesis de demandas desconocidas o nodos con emisores, estos dos factores son pérdidas de tipo hidráulico, donde las demandas hacen referencia a pérdidas comerciales y los emisores a pérdidas técnicas. Se debe tener en cuenta que tanto las demandas como emisores deben oscilar dentro del rango de Índice de Agua No Contabilizada del sector en estudio.

### 5.7.1 Cálculo del Índice de Agua No Contabilizada Para El Tramo de red matriz (Lagos II – Girón Mayor)

El cálculo del Índice de Agua No Contabilizada consiste en relacionar la información obtenida por los macromedidores, con los datos de micromedición de los distritos hidráulicos, este índice se calcula con la siguiente ecuación.

$$IANC = \frac{(Q_{macro} - Q_{micro})}{Q_{macro}} * 100\%$$

**Ecuación 15** Índice de Agua No Contabilizada.

Donde:

$IANC$  =es el Índice de Agua No Contabilizada [%]

$Q_{macro}$  =caudal macromedido [L/s]

$Q_{micro}$  =caudal micromedido o facturado [L/s]

Después de la recopilación de los datos tanto de la entrada como de la salida del tramo, se procede a calcular el Índice de Agua No Contabilizada mediante la

diferencia entre caudales de la macromedición, con la información de la facturación de los distritos adyacentes al tramo. El rango de Índice de Agua No Contabilizada para el tramo es:

$$IANC_{max} = \frac{(55[lps] - 26[lps])}{55[lps]} * 100\% = 52\%$$

$$IANC_{min} = \frac{(41[lps] - 26[lps])}{41[lps]} * 100\% = 36\%$$

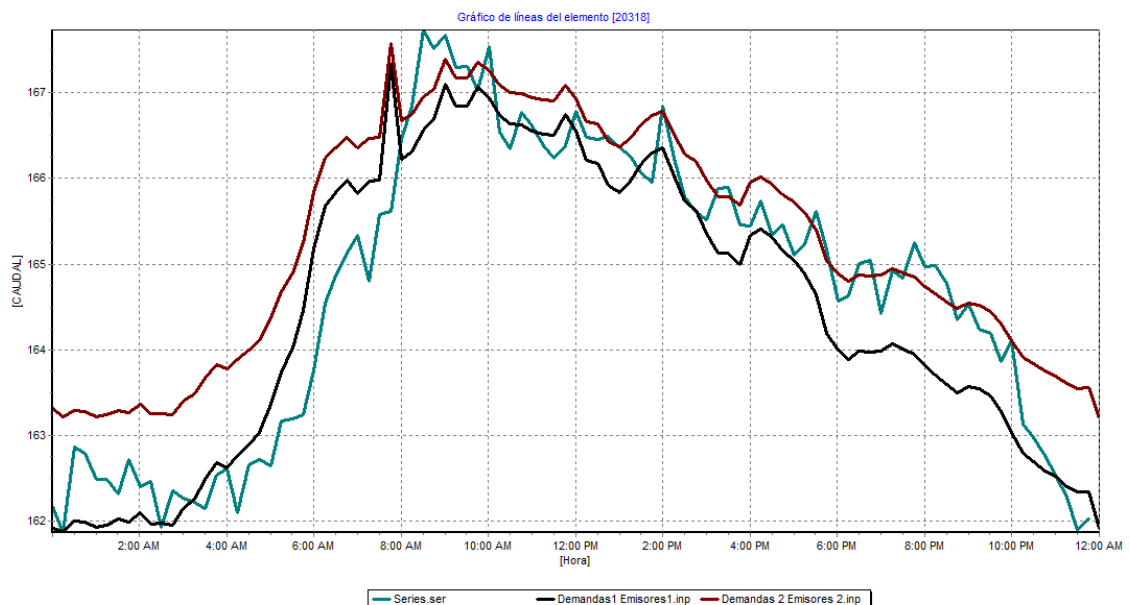
### 5.7.2 DEMANDAS Y EMISORES

Partiendo del análisis del estado de operación del modelo, se puede lograr una mejor semejanza de las series del modelo con las series medidas en campo, mediante el aumento de demandas o asignación de posibles emisores a lo largo del tramo en estudio. Las acciones que se realizaron para el ajuste fueron las siguientes:

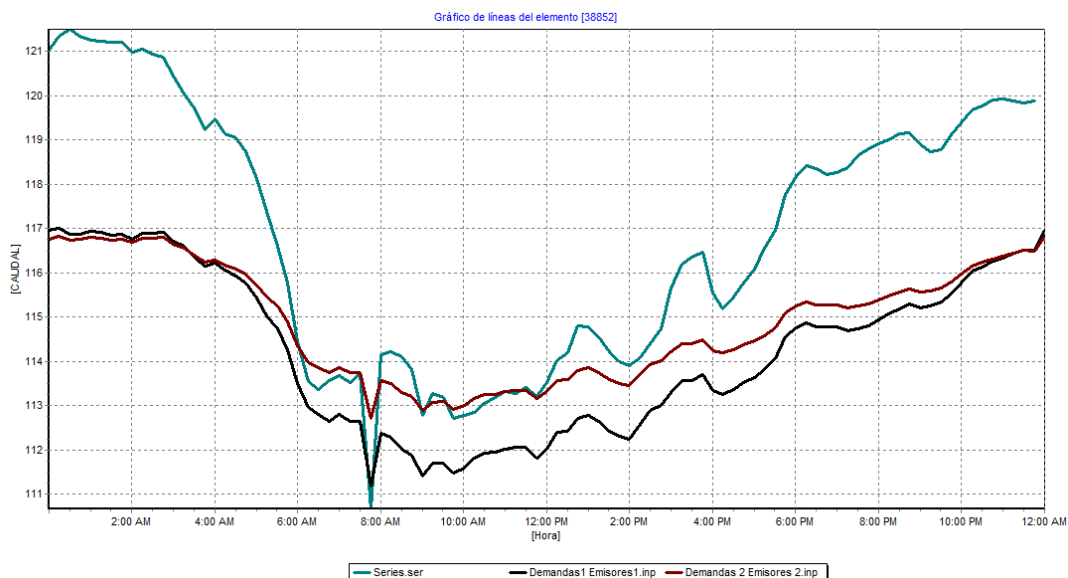
<b>Escenario 2</b> Análisis por Demanda de la población			
<b>DEMANDAS 1</b>		<b>ACCION</b>	
Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Con_Demandas	DEMANDA	MULTIPLICAR	1.2
Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Con_Demandas_Altas	DEMANDA	MULTIPLICAR	1.2
Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Con_Demandas_Medias	DEMANDA	MULTIPLICAR	1.2
Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Con_Demandas_Bajas	DEMANDA	MULTIPLICAR	1.2
Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Sin_Demandas	ASIGNAR	DEMANDA	0.004
<b>EMISORES 1</b>		<b>ACCION</b>	
NODOS_DESPUES_DE_CAUDALIMETRO_SIN_DEMANDAS	COEFICIENTE	ASIGNAR	0.028
NODOS_DESPUES_DE_CAUDALIMETRO_SIN_DEMANDAS	COEFICIENTE	ASIGNAR	0.005
<b>DEMANDAS 2</b>		<b>ACCION</b>	
Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Con_Demandas	DEMANDA	MULTIPLICAR	1
Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Con_Demandas_Altas	DEMANDA	MULTIPLICAR	1.1

Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Con_Demandas_Medias	DEMANDA	MULTIPLICAR	1.1
Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Con_Demandas_Bajas	DEMANDA	MULTIPLICAR	1.5
Nodos_Entre_Vpenultima_Vultima_Con_Demandas	DEMANDA	ASIGNAR	0
Nodos_Despues_Vultima_Con_Demandas	DEMANDA	ASIGNAR	0
<b>EMISORES 2</b>		<b>ACCION</b>	
Nodos_Presiones_Bajas	COEFICIENTE	ASIGNAR	0
Nodos_Presiones_Medias_Entre_Vlagos_Vpenultima	COEFICIENTE	ASIGNAR	0.001
Nodos_Presiones_Medias_Entre_Vpenultima_Vultima	COEFICIENTE	ASIGNAR	0.02
Nodos_Presiones_Medias_Despues_Vultima	COEFICIENTE	ASIGNAR	0.02
Nodos_Presiones_Altas_Entre_Vlagos_Vpenultima	COEFICIENTE	ASIGNAR	0.04
Nodos_Presiones_Altas_Entre_Vpenultima_Vultima	COEFICIENTE	ASIGNAR	0.06
Nodos_Presiones_Altas_Despues_Vultima	COEFICIENTE	ASIGNAR	0.06

**Figura 29** Análisis por Demandas y Emisores entrada del tramo (Lagos II)



**Figura 30** Análisis por Demandas y Emisores salida del tramo (Girón Mayor)



## 5.8 ANÁLISIS POR PÉRDIDAS MENORES, DIÁMETROS Y RUGOSIDADES

El análisis por pérdidas menores, diámetros y rugosidades se lleva a cabo en un mismo escenario de calibración, ya que las reducciones por tramos en la red no son muy altas, igualmente las rugosidades del tramo, se plantea la hipótesis de aumentar las pérdidas menores del tramo, debido a que las pérdidas menores del sistema fluctúan en valores muy pequeños. Las acciones que se realizaron para el ajuste fueron las siguientes:

Escenario 3		Análisis por Diámetros	
DIAMETROS 1	ACCION		
Tuberias_6in_PVC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_12in_PVC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_4in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_6in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_8in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99

Tuberias_12in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_14in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_16in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_4in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_6in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_8in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_12in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_14in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_16in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
<b>RUGOSIDADES 1</b>	<b>ACCIÓN</b>		
Tuberias_6in_PVC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.1
Tuberias_12in_PVC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.1
Tuberias_4in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1,2
Tuberias_6in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_8in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_12in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_14in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_16in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_4in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.3
Tuberias_6in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.3
Tuberias_8in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.3
Tuberias_12in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.3
Tuberias_14in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.3
Tuberias_16in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.3

**Escenario 4** Análisis por pérdidas menores

<b>PERDIDAS MENORES 1</b>	<b>ACCIÓN</b>		
Tuberias_4in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_4in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_6in_PVC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_6in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_6in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_8in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_8in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_12in_PVC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_12in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_12in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_14in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	30

Tuberias_14in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_16in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_16in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	30

**Escenario 5**      Análisis por diámetros

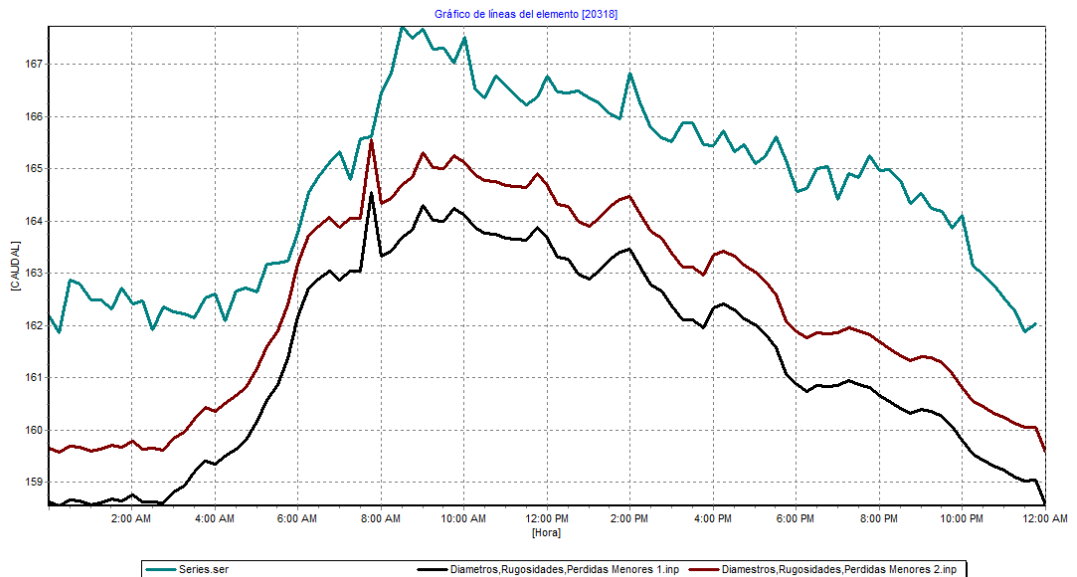
<b>DIAMETROS 2</b>	<b>ACCION</b>		
Tuberias_6in_PVC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_12in_PVC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_4in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_6in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_8in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_12in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_14in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_16in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_4in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_6in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_8in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_12in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_14in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_16in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99

**Escenario 6**      Análisis por rugosidades

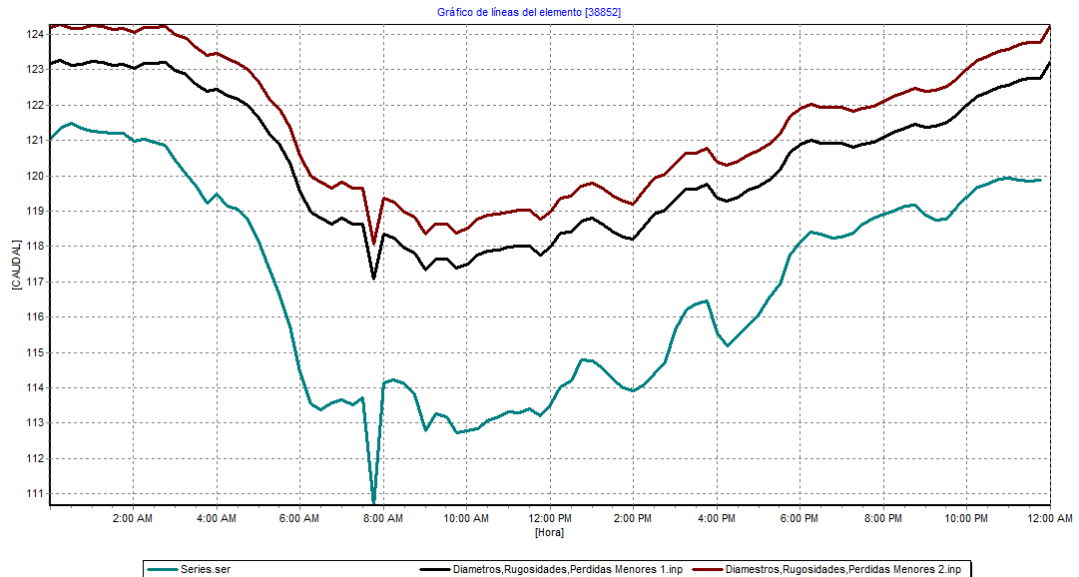
<b>RUGOSIDADES 2</b>	<b>ACCION</b>		
Tuberias_6in_PVC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1
Tuberias_12in_PVC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1
Tuberias_4in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.1
Tuberias_6in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.1
Tuberias_8in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.1
Tuberias_12in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.1
Tuberias_14in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.1
Tuberias_16in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.1
Tuberias_4in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_6in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_8in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_12in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_14in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_16in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2

PERDIDAS MENORES 2	ACCION		
Tuberias_4in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_4in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_6in_PVC	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_6in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_6in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_8in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_8in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_12in_PVC	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_12in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_12in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_14in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_14in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_16in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	29
Tuberias_16in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	29

**Figura 31** Análisis Diámetros, Rugosidades y Pérdidas Menores entrada del tramo (Lagos II)



**Figura 32** Análisis por Diámetros, Rugosidades y Pérdidas Menores salida del tramo (Girón Mayor)



## 5.9 MODELO UNIFICADO

Una vez hechos todos los análisis de calibración, se procede a montar un escenario de calibración con todos los parámetros de análisis, en el cual se realizan acciones en estos parámetros para así lograr la mejor semejanza de las series del modelo con las series medidas en campo. Las acciones que se realizaron para el ajuste fueron las siguientes:

Escenario 7		Análisis por diámetros y rugosidades	
DIÁMETROS	ACCIÓN		
Tuberias_6in_PVC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_12in_PVC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_4in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_6in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_8in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_12in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99

Tuberias_14in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_16in_AC	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_4in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_6in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_8in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_12in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_14in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
Tuberias_16in_HF	DIAMETRO	MULTIPLICAR	0.99
<b>RUGOSIDADES</b>	<b>ACCIÓN</b>		
Tuberias_6in_PVC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.1
Tuberias_12in_PVC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.1
Tuberias_4in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1,2
Tuberias_6in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_8in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_12in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_14in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_16in_AC	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.2
Tuberias_4in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.3
Tuberias_6in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.3
Tuberias_8in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.3
Tuberias_12in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.3
Tuberias_14in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.3
Tuberias_16in_HF	RUGOSIDAD	MULTIPLICAR	1.3

**Escenario 8**      Análisis por pérdidas menores

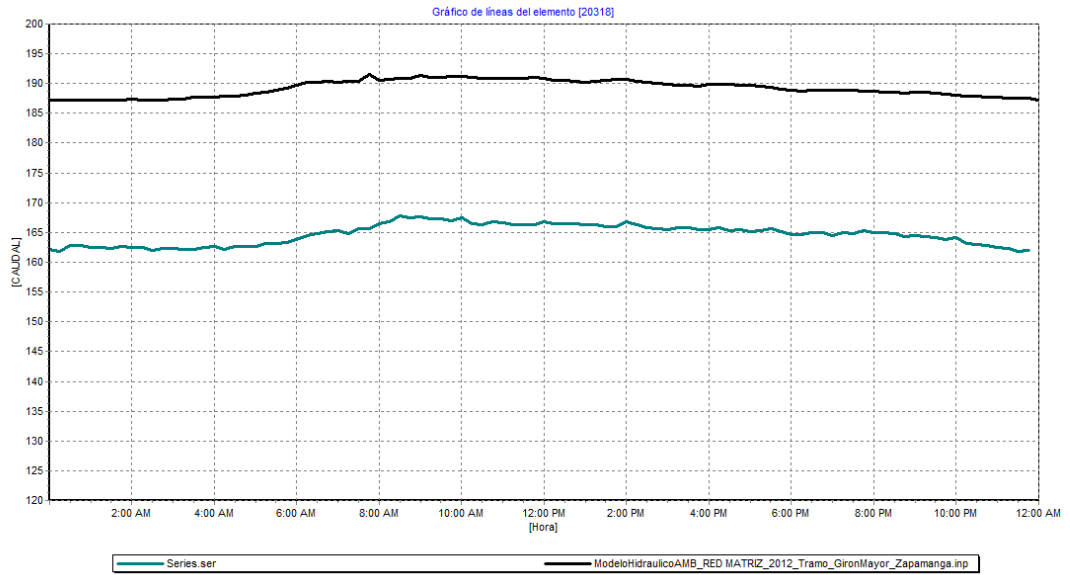
<b>PERDIDAS MENORES</b>	<b>ACCIÓN</b>		
Tuberias_4in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_4in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_6in_PVC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_6in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_6in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_8in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_8in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_12in_PVC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_12in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_12in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_14in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_14in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	30

Tuberias_16in_AC	MENORES	MULTIPLICAR	30
Tuberias_16in_HF	MENORES	MULTIPLICAR	30

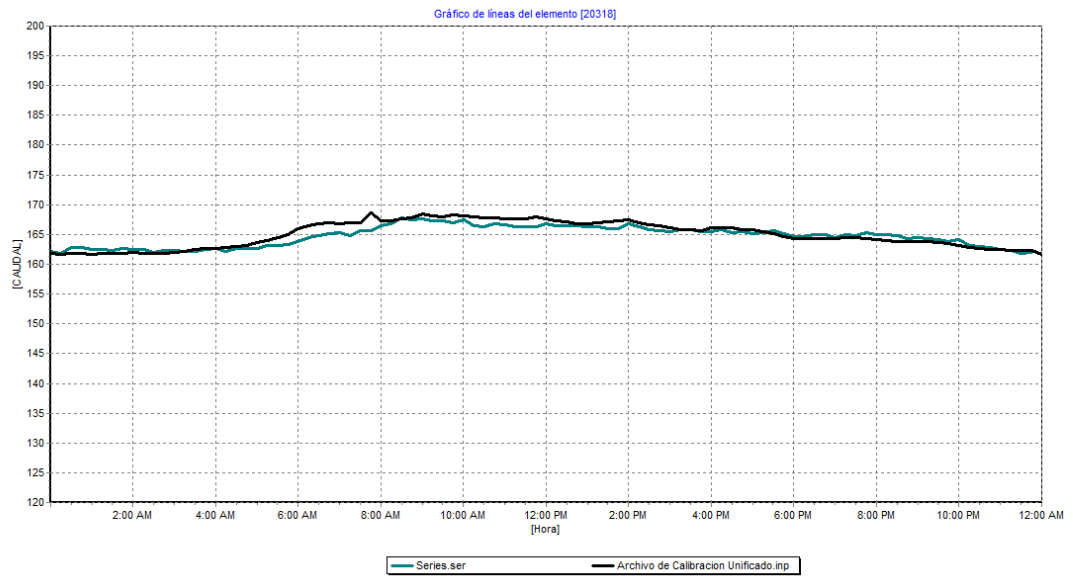
**Escenario 9** Análisis por válvulas, demandas y emisores

<b>VALVULAS</b>	<b>ACCION</b>		
Valvula_Antes_De_Caudalimetro	VKM	ASIGNAR	11
Valvula_Igual_Apertura_LagosII	VKM	ASIGNAR	130
Valvula_Igual_Apertura_Penultima	VKM	ASIGNAR	90
Valvula_Final	VKM	ASIGNAR	0.37
Valvula_Antes_De_Caudalimetro	MENORES	ASIGNAR	0.05
Valvula_Igual_Apertura_LagosII	MENORES	ASIGNAR	0.05
Valvula_Igual_Apertura_Penultima	MENORES	ASIGNAR	0.05
Valvula_Final	MENORES	ASIGNAR	0.05
<b>DEMANDAS</b>	<b>ACCION</b>		
Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Con_Demandas	DEMANDA	MULTIPLICAR	1
Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Con_Demandas_Altas	DEMANDA	MULTIPLICAR	1.1
Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Con_Demandas_Medias	DEMANDA	MULTIPLICAR	1.2
Nodos_Despues_De_Caudalimetro_Con_Demandas_Bajas	DEMANDA	MULTIPLICAR	1.5
Nodos_Entre_Vpenultima_Vultima_Con_Demandas	DEMANDA	ASIGNAR	1.18
Nodos_Despues_Vultima_Con_Demandas	DEMANDA	ASIGNAR	1.18
<b>EMISORES</b>	<b>ACCION</b>		
Nodos_Presiones_Bajas	COEFICIENTE	ASIGNAR	0
Nodos_Presiones_Medias_Entre_Vlagos_Vpenultima	COEFICIENTE	ASIGNAR	0
Nodos_Presiones_Medias_Entre_Vpenultima_Vultima	COEFICIENTE	ASIGNAR	0.001
Nodos_Presiones_Medias_Despues_Vultima	COEFICIENTE	ASIGNAR	0
Nodos_Presiones_Altas_Entre_Vlagos_Vpenultima	COEFICIENTE	ASIGNAR	0
Nodos_Presiones_Altas_Entre_Vpenultima_Vultima	COEFICIENTE	ASIGNAR	0
Nodos_Presiones_Altas_Despues_Vultima	COEFICIENTE	ASIGNAR	0

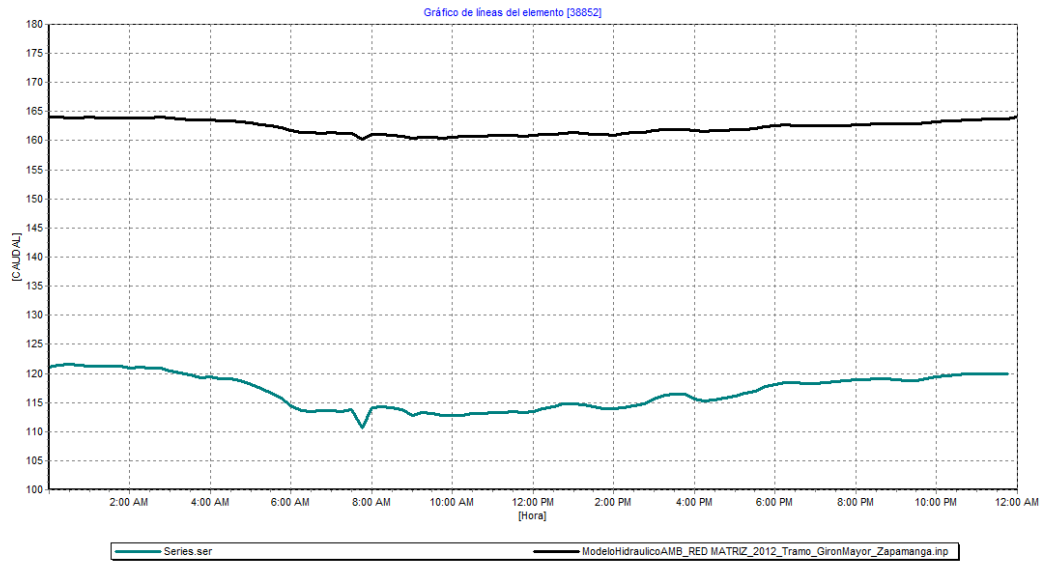
**Figura 33** Modelo sin calibrar con el estado de operación inicial entrada del tramo (Lagos II)



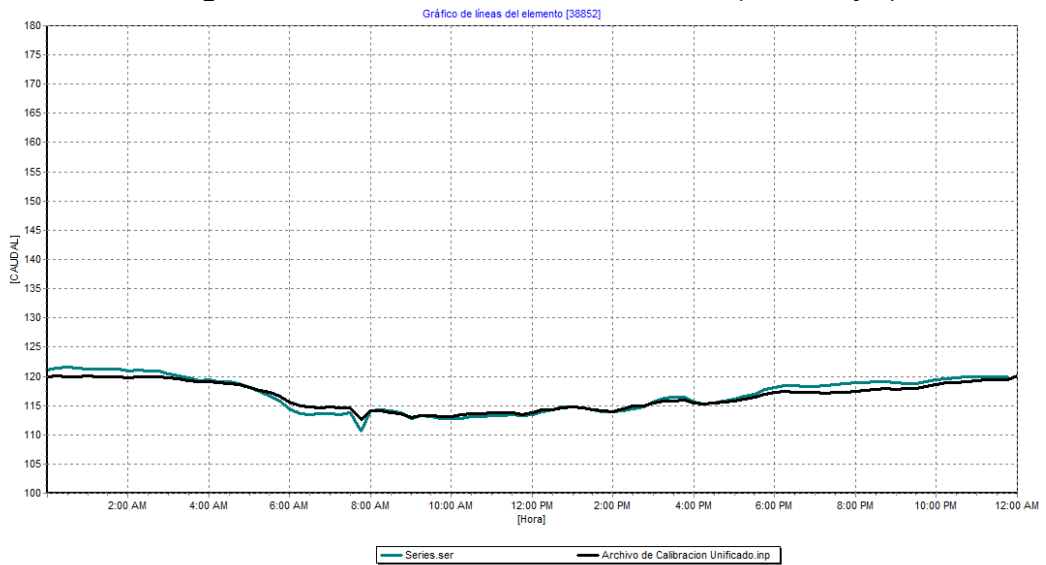
**Figura 34** Modelo Unificado entrada del tramo (Lagos II)



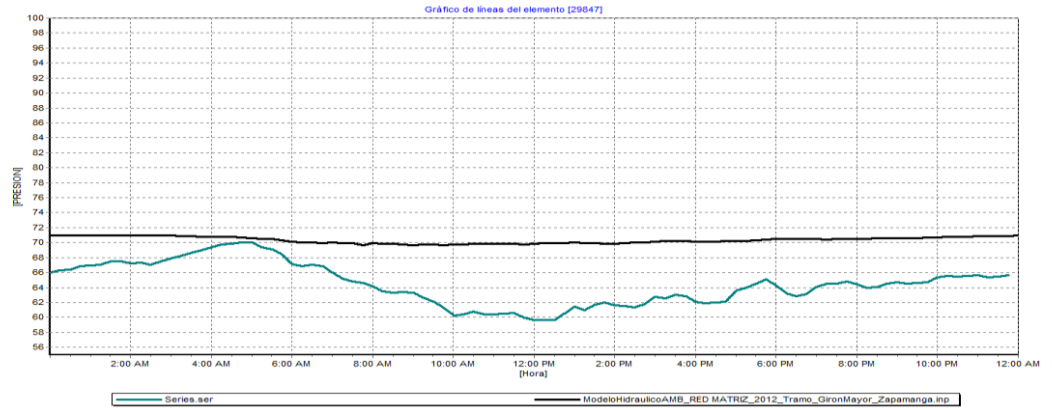
**Figura 35** Modelo sin calibrar con el estado de operación inicial salida del tramo (Girón Mayor)



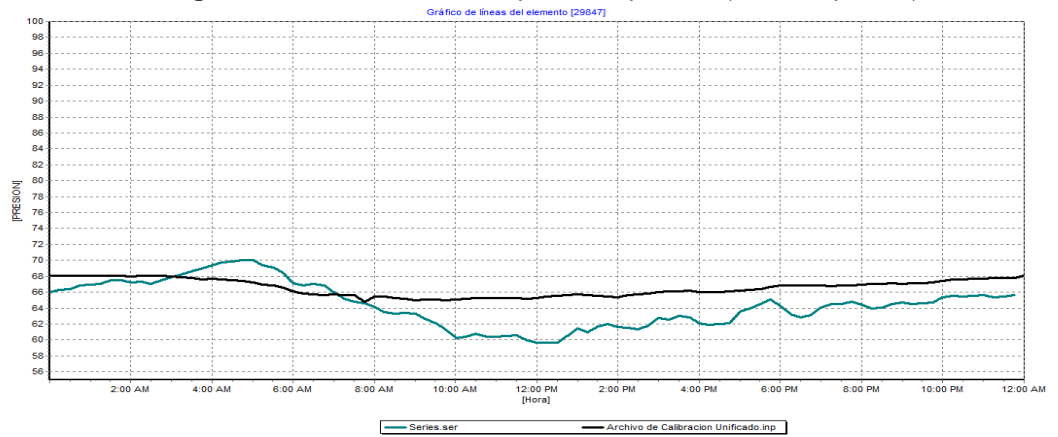
**Figura 36** Modelo Unificado salida del tramo (Girón Mayor)



**Figura 37** Modelo sin calibrar punto de presión (Finca la Pelusa)



**Figura 38** Modelo unificado punto de presión (Finca la pelusa)



## CONCLUSIONES

La presente investigación se conforma de cuatro partes fundamentales; en primera instancia se realizó un estudio de las Redes de Distribución de Agua Potable (RDAP). Posteriormente se procedió a la creación del modelo hidráulico de red matriz del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb. Una vez hecho esto se propuso una metodología de calibración de redes matrices con base en la información recopilada del estudio de las RDAP. Finalmente se aplicó dicha metodología a un tramo específico de la red matriz comprendido entre Lagos II y Girón Mayor. Las conclusiones más significativas se presentan a continuación:

- Respecto al estudio de Redes de Distribución de Agua Potable:
  - Es importante tener presente la metodología de calibración de Redes de Distribución de Agua Potable para construir la metodología de distribución en Redes Matrices, sin embargo hay que tener en cuenta que las Redes Matrices presentan mayor complejidad en sus parámetros fundamentales.
  
- Respecto a la creación del modelo de red matriz:
  - Fue necesario clasificar y organizar los datos suministrados por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb para seleccionar la información competente al presente estudio; con esto se pudo describir detalladamente la red matriz lo cual facilitó el estudio de su funcionamiento y permitió obtener una perspectiva más clara de su comportamiento.

- Respecto a la metodología de calibración de redes matrices:
  - La metodología de calibración presentada en este estudio resultó ser apropiada para la calibración de redes matrices en general.
  - El estado de operación de una red matriz influye significativamente en el comportamiento hidráulico de la misma, y afecta de manera directa la macromedición.
  - Un ajuste de alta semejanza entre las series del modelo y las series en campo no garantiza la correcta operación del modelo hidráulico. Se pueden presentar resultados no deseables como presiones negativas en los nodos debido a que los parámetros que se asumen podrían no estar representando el comportamiento visto en campo.
  - Las pérdidas técnicas no visibles pueden ser fácilmente detectables ya que las altas presiones en la red matriz son indicio de dicha problemática; estas son generadas por el aumento significativo del caudal ocasionando fugas en la tubería.
  
- Respecto a la calibración del tramo específico Lagos II-Girón Mayor para el periodo del mes de mayo de 2012:
  - Para desarrollar la metodología expuesta se calibró el tramo comprendido entre Lagos II y Girón Mayor. El anterior procedimiento es aplicable a los demás tramos de la red matriz.

- Se encontró que las pérdidas menores en los tramos y las demandas en los nodos son los parámetros más influyentes en el ajuste de las gráficas respecto al comportamiento medido en campo.
- Se observó que un aumento generalizado de la demanda en los nodos y una regulación bastante cerrada de las válvulas provoca presiones negativas en los nodos de mayor consumo.
- Se encontró un rango del Índice de Agua No Contabilizada (IANC) entre 36% y 52% siendo este un porcentaje elevado en relación con los valores normalmente observados, por lo cual se presume que existen demandas desconocidas en la red matriz.
- Para el proceso de análisis y verificación del estado de operación fue necesario variar la configuración inicial del grado de apertura de las cuatro válvulas del tramo específico, siendo este aspecto definitivo en la calibración y ajuste apropiado del modelo.
- El ajuste en el modelo de presión no fue tan cercano debido a que la macromedición no pertenecía al mismo estado de operación; es importante tener varios puntos de presión a lo largo de cada tramo.

## BIBLIOGRAFÍA

Ávila Rangel, H. F. (2003). *Determinación de parámetros de fuga para fallas longitudinales y en conexiones domiciliarias en tuberías de PVC, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental*. Universidad de los Andes, Bogotá.

Chow, V. T. (s.f.). *HIDRAULICA DE CANALES ABIERTOS*. McGraw-Hill.

CIACUA. (s.f.). *CALIBRACIÓN*. Bogotá.

EPA. (s.f.). *Manual Epanetv2E*.

L. F. Moody. (1944). *Trans. ASME* (Vol. 66).

Saldarriaga, J. (2007). *HIDRÁULICA DE TUBERÍAS Abastecimiento de Agua, Redes, Riegos*. Bogotá, D.C.: Alfaomega.

Saldarriaga, J. (22, 23 y 24 de mayo de 2008). *Pavco S.A.* Obtenido de <http://pavco.com.co/index.php?view=page&id=154>

Saldarriaga, J. (22, 23 y 24 de mayo de 2008). *Pavco S.A.* Obtenido de <http://pavco.com.co/index.php?view=page&id=154>

Universidad de los Andes, Centro de Investigaciones en Acueducto y Alcantarillados CIACUA. (2009). *Informe de modelación hidráulica de la Red Matriz de Bogotá*. Investigación , Bogotá.

Salas Useche, D. *Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto*. Universidad de los Andes., Bogotá.

Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003

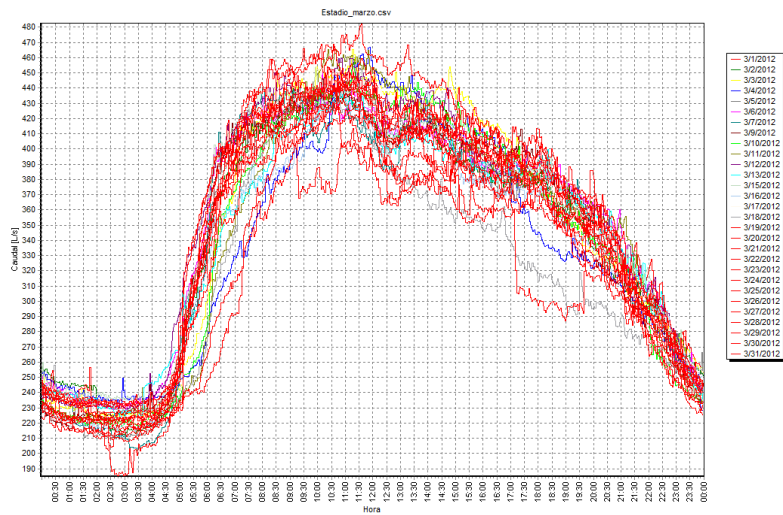
Jurado, Cesar Mauricio. Metodología de Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable. Universidad de los Andes. Bogotá enero de 2007

# ANEXOS

## Anexo A Separador de series

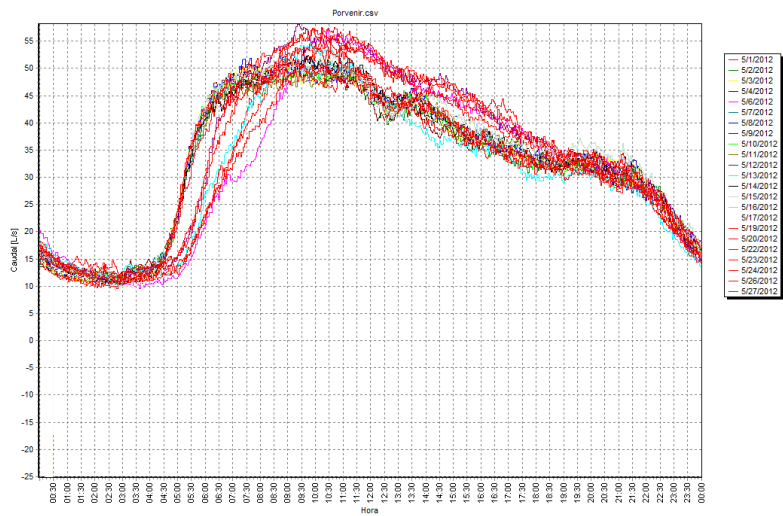
### Zona Noroccidental

#### Series Estadio



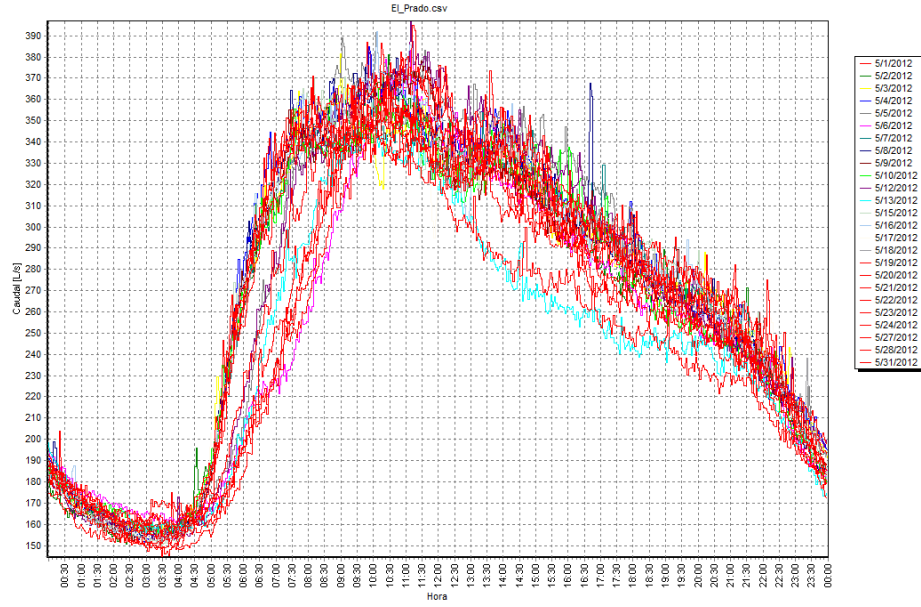
### Zona Central

#### Series Porvenir



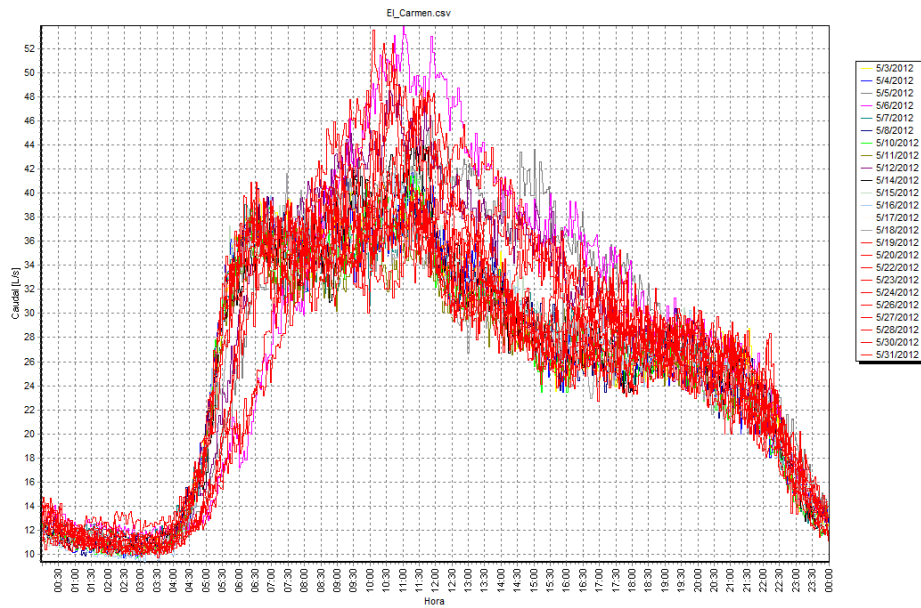
## Zona Oriental

### Serie El Prado



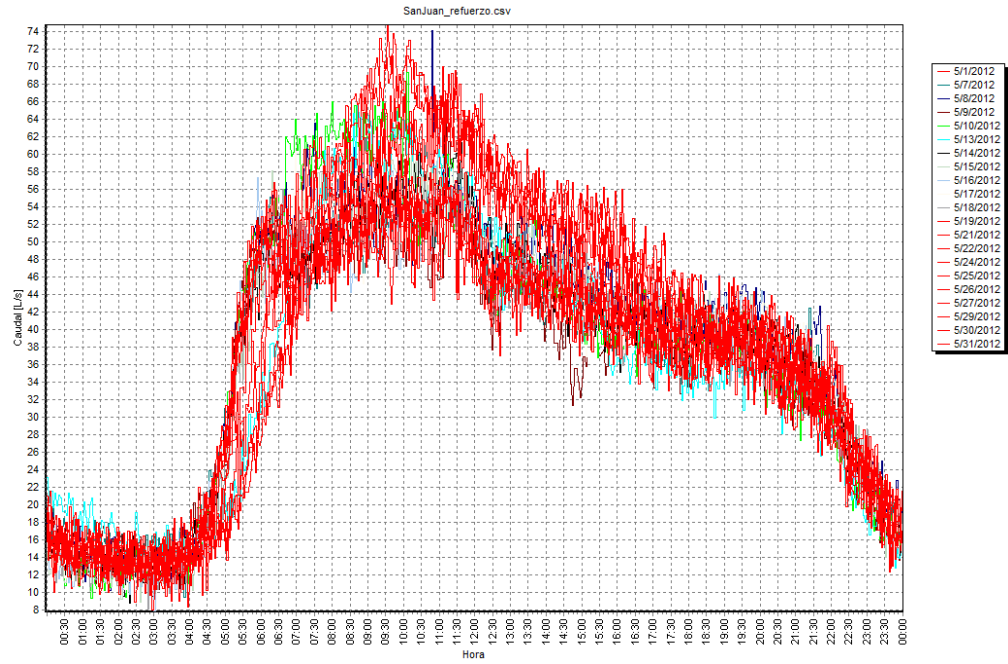
## Zona Sur

### Serie El Carmen



# Zona San Juan

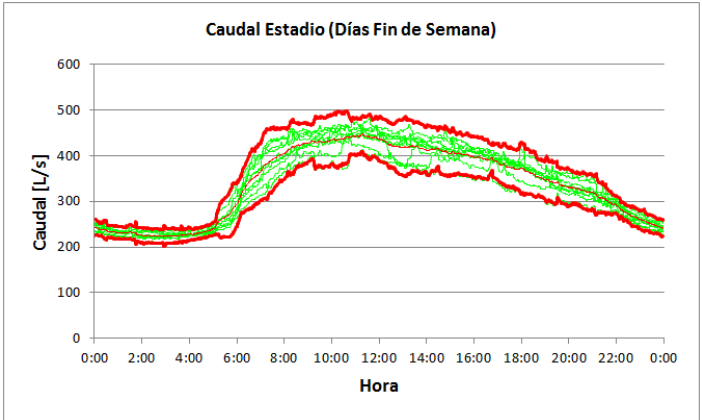
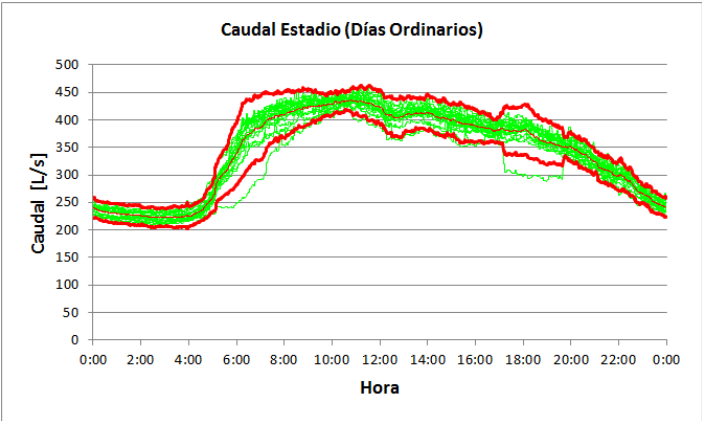
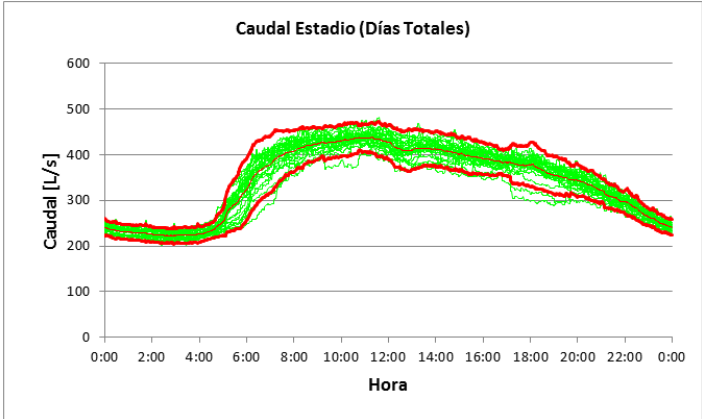
## Series San Juan Refuerzo



# Anexo B Series Procesadas

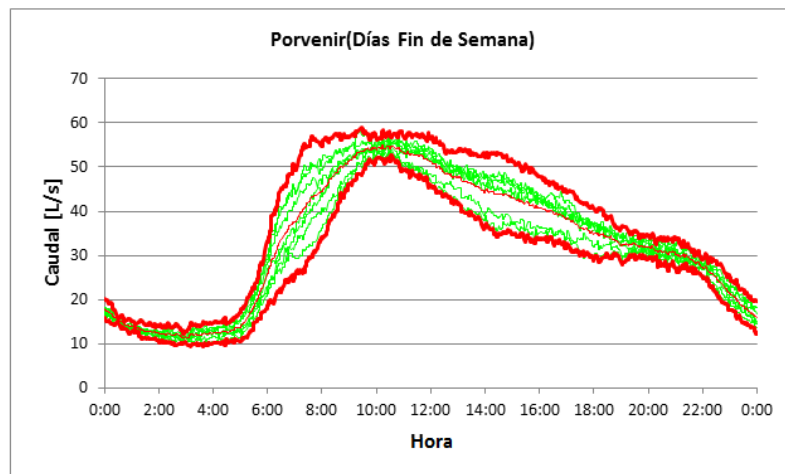
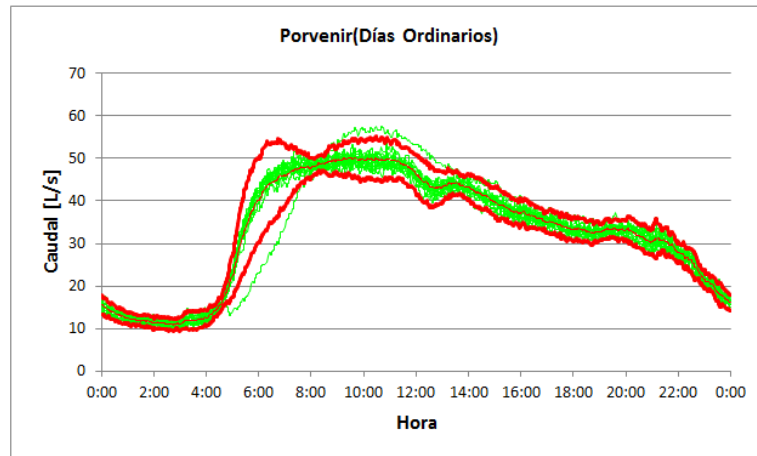
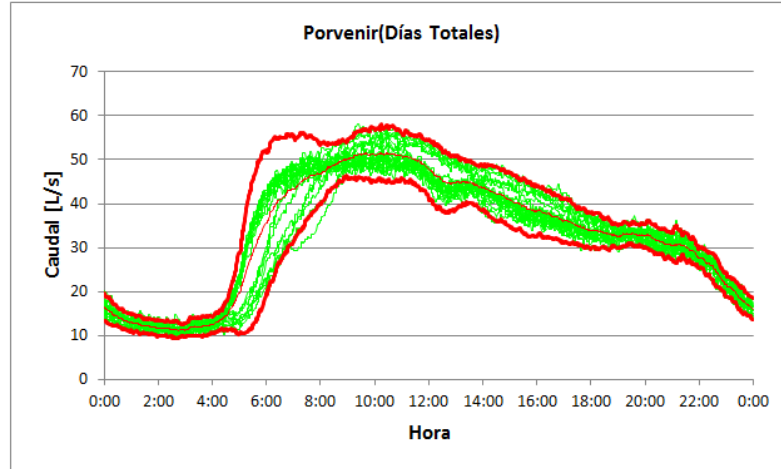
## Zona Noroccidental

### Series Estadio



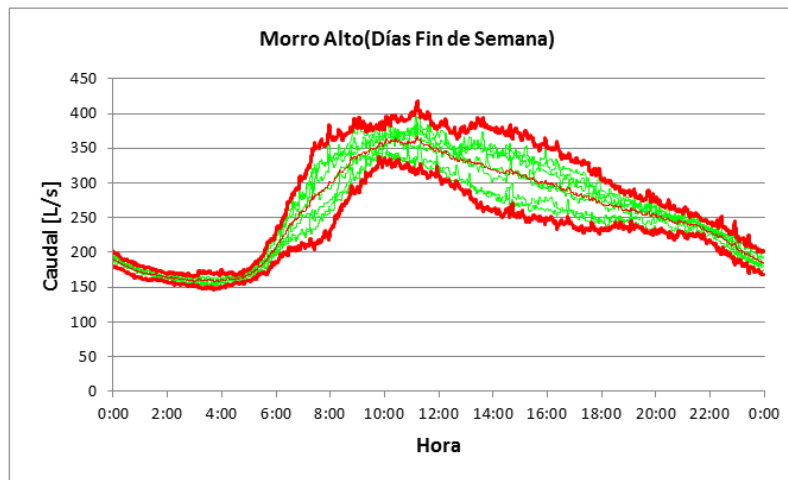
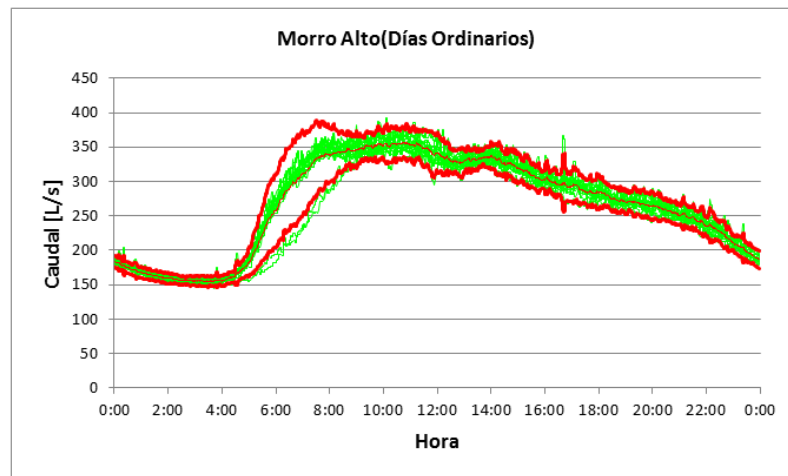
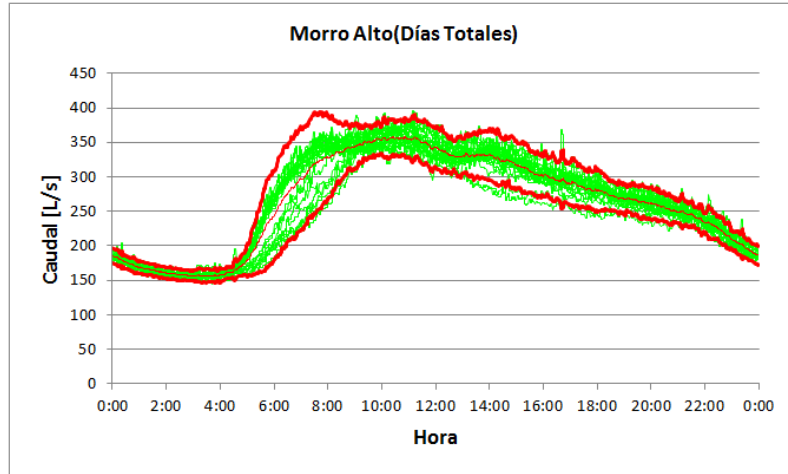
## Zona Central

### Series Porvenir



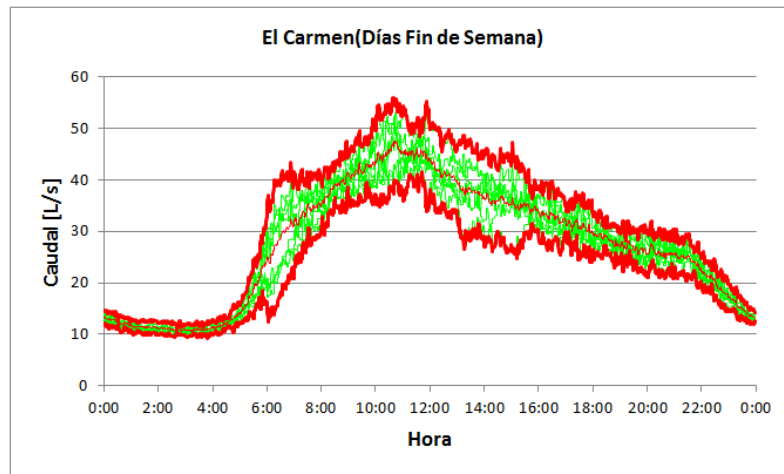
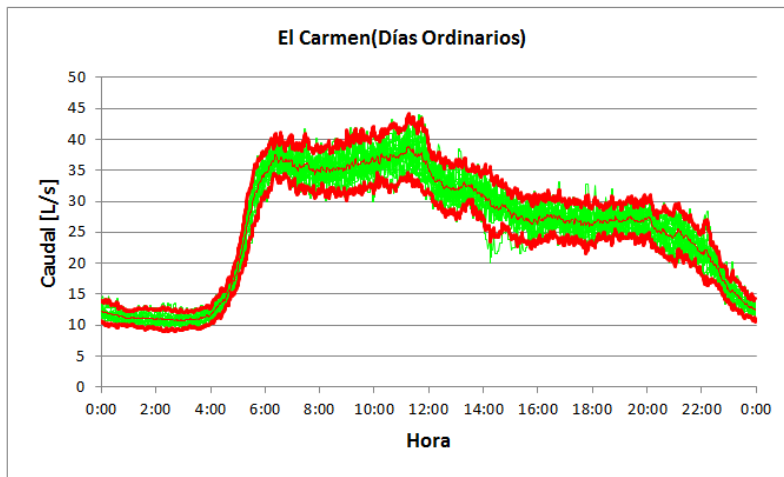
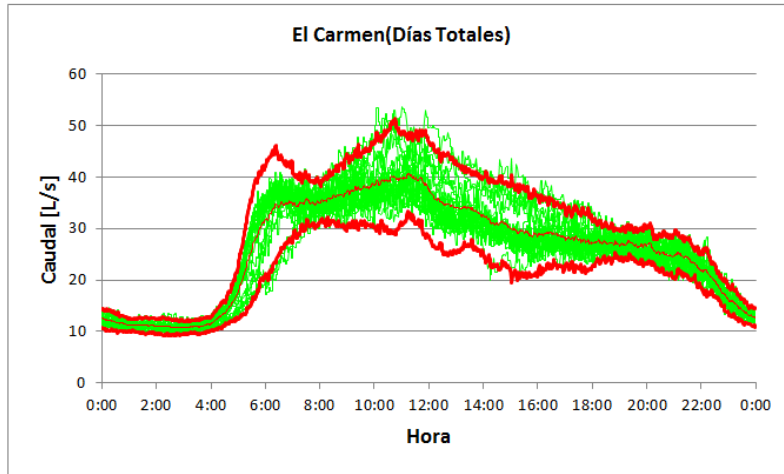
## Zona Oriental

### Series Morro Alto



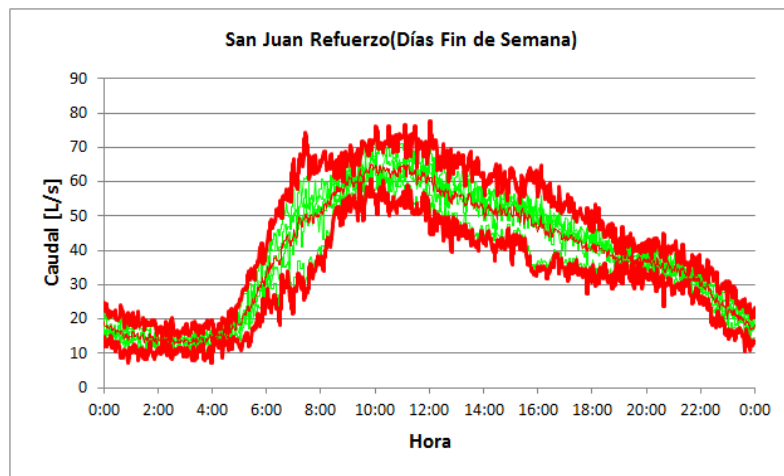
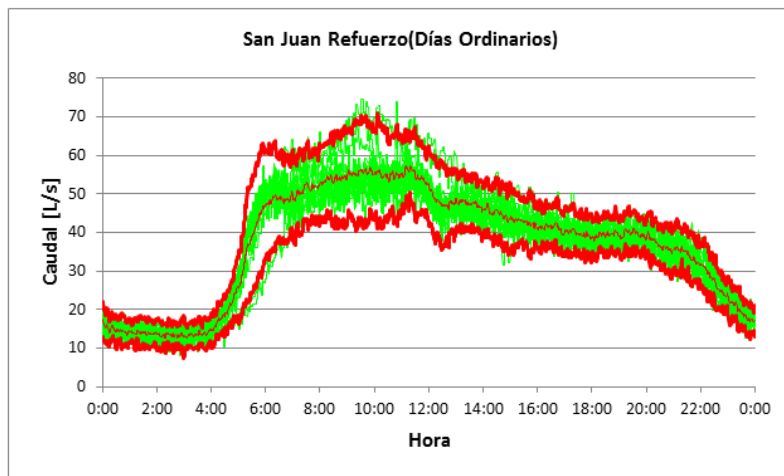
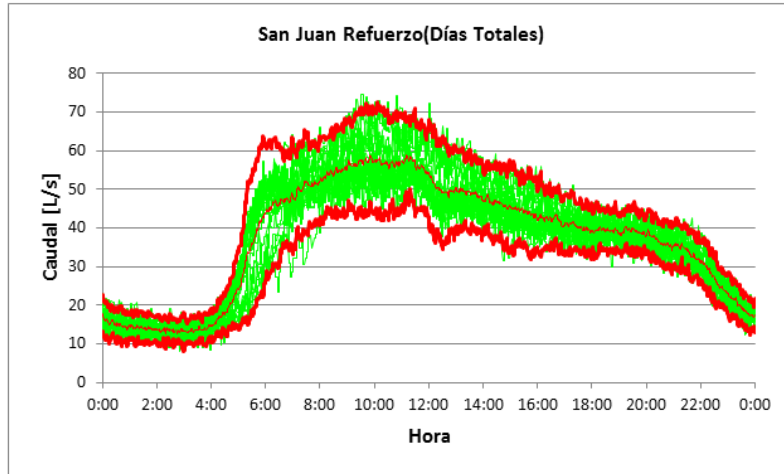
## Zona Sur

### Series El Carmen



# Zona San Juan

## San Juan Refuerzo

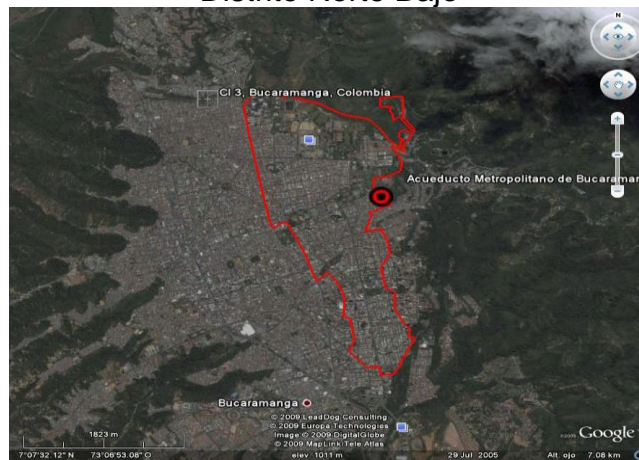


## Anexo C Macromedición por distritos

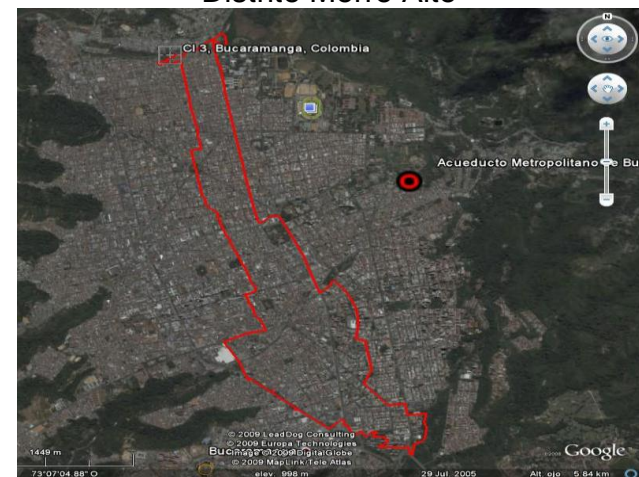
### Distritos Conducción Oriente



### Distrito Norte Bajo



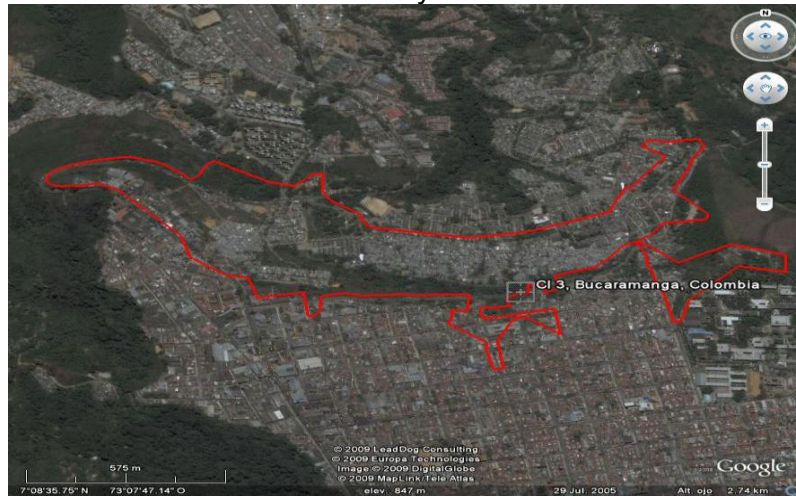
### Distrito Morro Alto



### Distrito Angelinos y Colorados



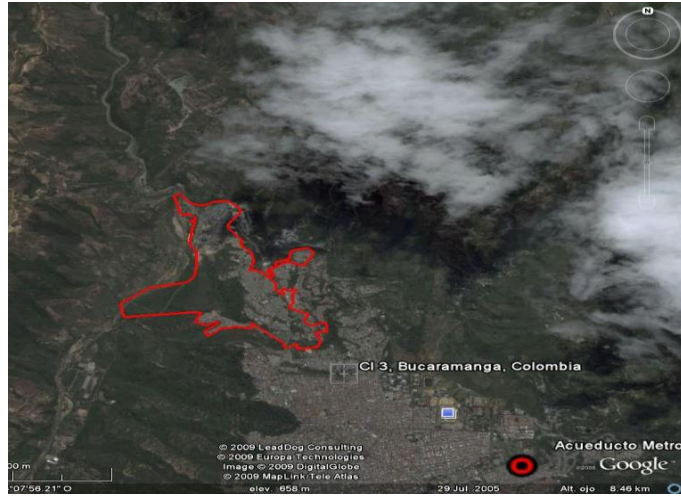
### Distrito Estadio y Subsectores



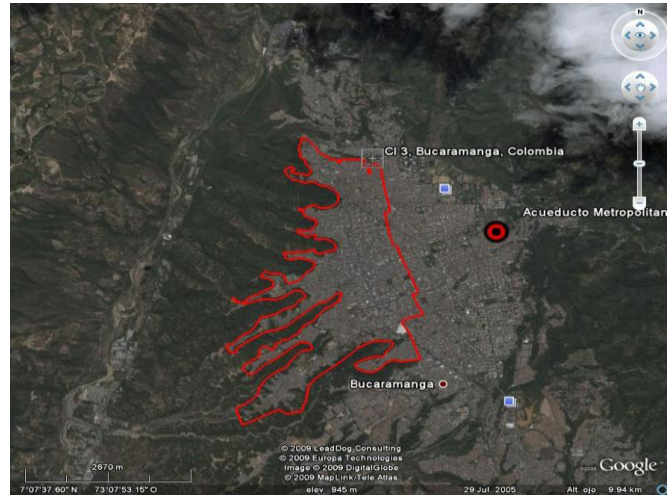
### Distrito Regadero



### Distrito Bienestar



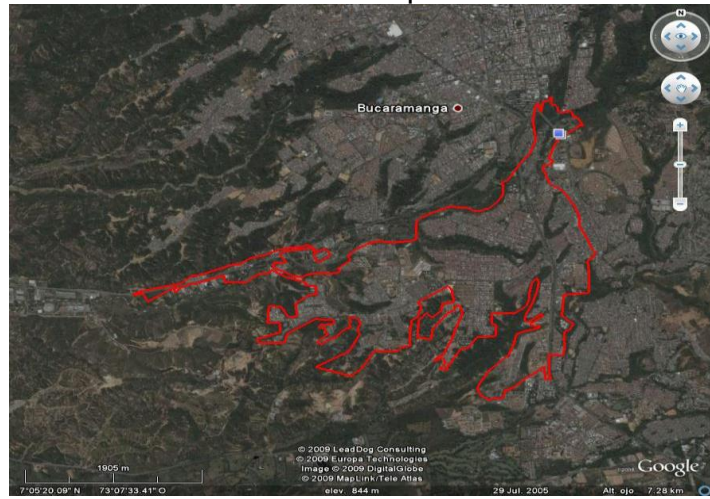
### Sector San Francisco



### Distritos Conducción Morro Bajo



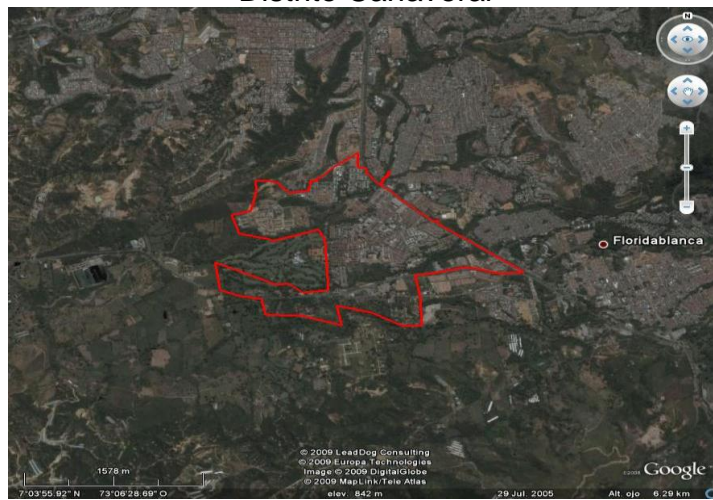
### Distrito Malpaso



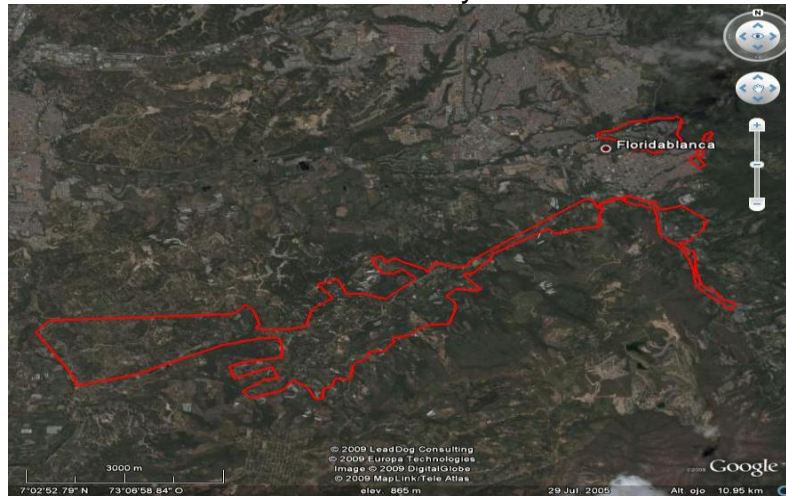
### Distritos Puerta del Sol y la Iglesia



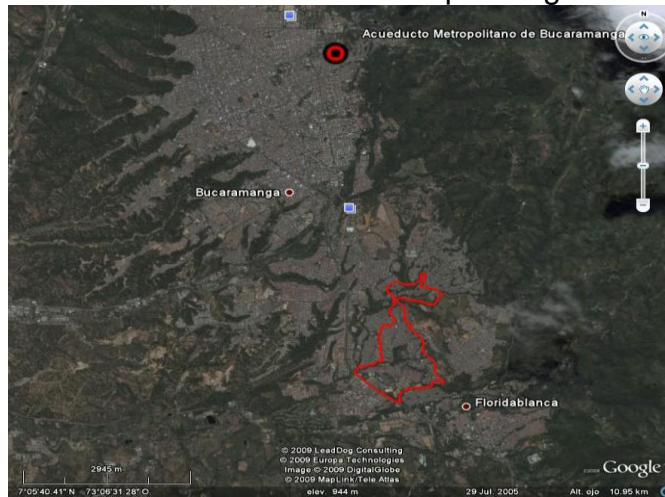
### Distrito Cañaveral



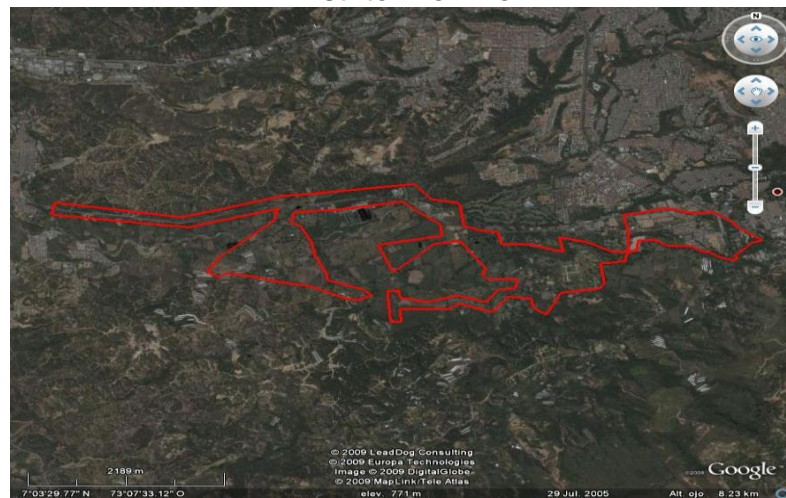
### Distritos Bucarica y Caracolí



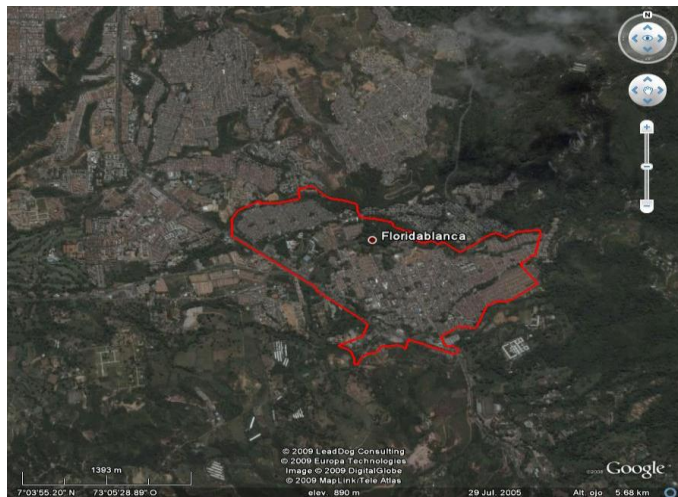
### Distritos Conducción Zapamanga



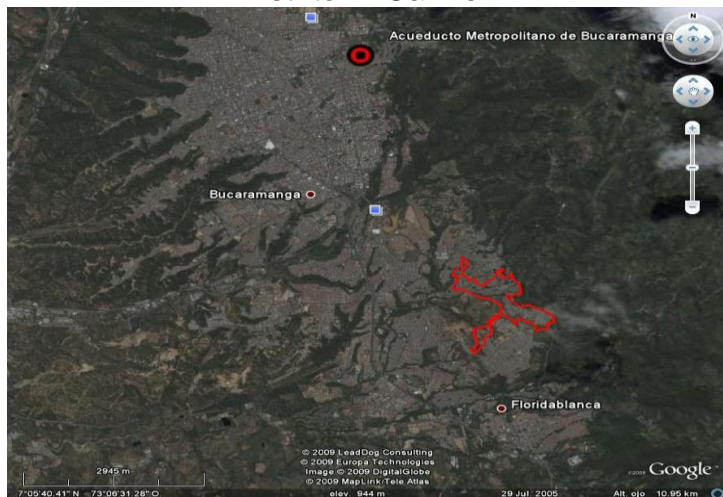
### Distrito Rio Frío



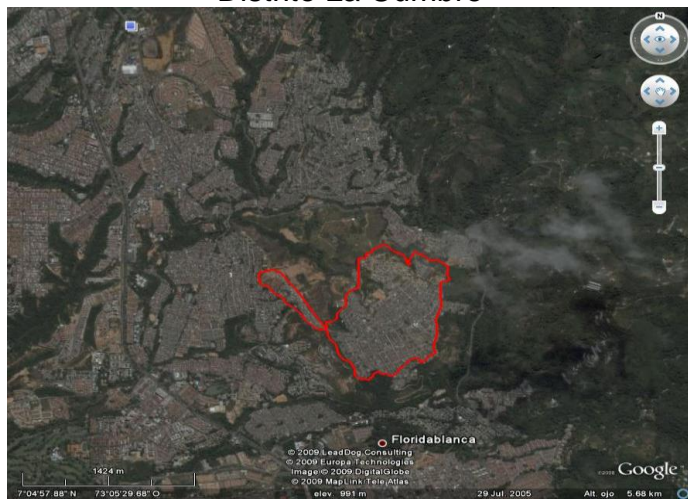
### Distrito Florida



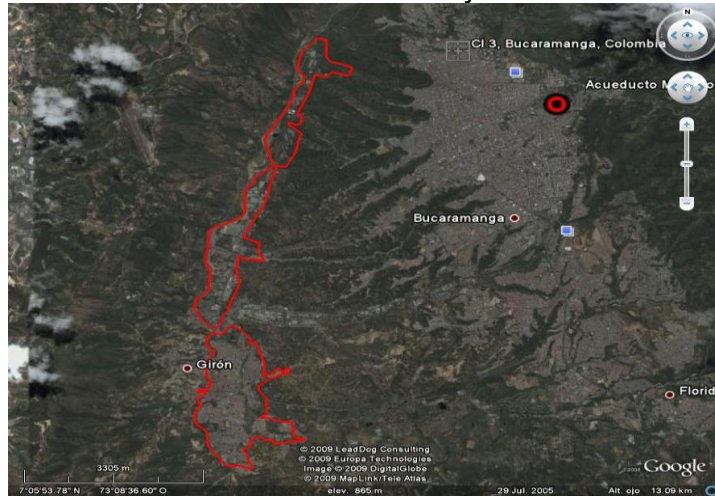
### Distrito El Carmen



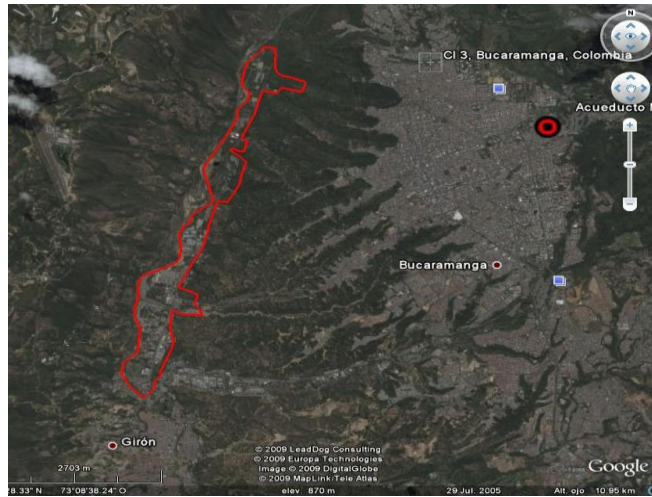
### Distrito La Cumbre



### Distrito Girón Mayor



### Sector Chimita



### Distrito San Juan

