

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA CALIBRACIÓN DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN DEL DISTRITO MALPASO-CAÑAVERAL DEL ACUEDUCTO
METROPOLITANO DE BUCARAMANGA Y ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE
DE AGUA NO CONTABILIZADA**

**FENIX ELLA YANIRA ARDILA PATIÑO
YURANIS BOHORQUEZ ARRIETA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

**PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA CALIBRACIÓN DE REDES DE
DISTRIBUCIÓN DEL DISTRITO MALPASO-CAÑAVERAL DEL ACUEDUCTO
METROPOLITANO DE BUCARAMANGA Y ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE
AGUA NO CONTABILIZADA**

**FENIX ELLA YANIRA ARDILA PATIÑO
YURANIS BOHORQUEZ ARRIETA**

**Trabajo de Grado modalidad investigación para optar al título
de Ingeniera Civil**

**Director:
LUÍS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS
Ingeniero Civil, M.sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2011

A mis padres Luis Eduardo Ardila y Elsa Yanira Patiño por su apoyo incondicional, porque siempre estuvieron pendientes de mí, para que nada me hiciera falta.

A mi hermano Daniel Eduardo Ardila por su compañía y la ayuda que me brindo durante mi carrera.

A mi familia y amigos por brindarme su compañía y su ánimo para seguir adelante.

Fenix Ardila Patiño

Quiero en primera instancia agradecerle a papá Dios por este logro en mi vida, que Él es mi inspiración y el que me motiva a ser perseverante y hacer realidad mis sueños.

A mi familia, A mis hermosos padres Hibel y Eder Rafael, mi hermanita Yule, a mi tía Elvis, a todos por su inmenso cariño, por estar siempre ahí brindándome su apoyo.

A mis amigos Cindy Solano, Nayi Barragán, Laura Muñoz, Jairo Barbosa y Camilo Rodríguez por ser esas personitas que tanto quiero y las que estuvieron animándome siempre, por compartir conmigo sus experiencias, alegrías y momentos difíciles.

A Fenix, por realizar este proyecto conmigo, y por brindarme su confianza y amistad, por ser tan paciente.

A todos mis amigos y compañeros de carrera que compartieron conmigo momentos de alegría. Gracias a todos, los quiero.

Yuranis Bohorquez Arrieta

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a:

A Dios, por iluminar nuestro camino y ser el responsable de este logro.

Por habernos apoyado en el transcurso de nuestra formación y lograr el desarrollo del presente proyecto queremos agradecer:

Al profesor LUÍS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS, Director de nuestro proyecto, por brindarnos sus conocimientos, por confiar en nosotras, por dedicarnos parte de su tiempo y la idea de desarrollar este proyecto.

A nuestros familiares por brindarnos su apoyo en todo momento, por ser las personas que más queremos y las más importantes en nuestras vidas.

A todos nuestros amigos y compañeros de carrera por compartir con nosotras en todos estos años de estudio.

Gracias a la Universidad Industrial de Santander por hacer de nosotras unas profesionales.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	21
2. OBJETIVOS	22
2.1 OBJETIVO GENERAL	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3. MARCO REFERENCIAL	23
3.1 INFORMACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN	23
3.1.1 Localización del sector	23
3.1.2 Catastro de la red	24
3.1.2.1 Materiales	24
3.1.2.2 Diámetro	25
3.1.2.3 Funcionamiento y localización de tanques y estaciones reguladoras de presión	30
3.1.2.4 Usuarios por estrato y por uso	32
3.2 PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES	36
3.3 ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA	36
3.4 PÉRDIDAS EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	38
3.5 PRESIÓN VS AGUA NO FACTURADA	39
3.6 ASPECTOS ECONÓMICOS DE LAS FUGAS	39
3.6.1 Aspectos económicos de las fugas	39
3.6.2 Pérdidas comerciales	40
3.6.3 Pérdidas técnicas	41
3.6.4 Factores que afectan las fugas	41
3.6.4.1 Presión	41
3.6.4.2 Movimiento del suelo	42
3.6.4.3 Condición de la tubería	42
3.6.4.4 Baja calidad de los materiales	42

3.6.4.5 Características del suelo	42
3.6.4.6 Carga de tráfico	42
3.6.4.7 Edad	42
3.7 ECUACIONES UTILIZADAS	42
3.7.1 Tipo de Flujo	43
3.7.2 Número de Reynolds	44
3.7.3 Darcy-Weisbach o de resistencia	44
3.7.4 Colebrook- White	46
3.7.5 Pérdidas Menores	46
3.7.6 Pérdidas totales de energía	47
3.7.7 Conservación de la masa	47
3.7.8 Conservación de energía	47
3.7.9 Ecuación de fugas	48
3.8 CALIBRACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE REDES DE AGUA POTABLE	48
3.8.1 Variables Hidráulicas	49
3.8.1.1 Demandas Desconocidas	49
3.8.1.2 Emisores	49
3.8.2 Variables Topológicas	49
3.9 DISEÑO METODOLÓGICO	49
3.9.1 EPANET 2.0	49
3.9.2 Calibra	51
4. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES	53
4.2.1 Ubicación de las estaciones reguladoras de presión	53
4.2.2 Macromediciones	53
4.2.3 Micromediciones	53
4.2.4 Mediciones de Presión	53
4.2.5 Índice de agua no contabilizada	54
4.2.6 Calibración	54

4.2.6.1 Parámetros de calibración	57
4.3 MODELO INICIAL	58
4.4 LÍNEA BASE 1	59
4.4.1 Análisis por Demandas	60
4.4.2 Análisis por Emisores	67
4.5 LÍNEA BASE 2	71
4.5.1 Análisis por Diámetros	74
4.5.2 Análisis por pérdidas menores	78
4.5.3 Análisis por rugosidades	80
4.6 MODELO UNIFICADO	82
4.7 ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA	84
4.8 ANÁLISIS DEL DISTRITO EN RÉGIMEN DE PRESIÓN ALTA	86
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXOS	93

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Materiales presentes en longitud de la red de distribución.	24
Tabla 2. Diámetros de PVC presentes en la red de distribución.	25
Tabla 3. Diámetros presentes de Hierro Galvanizado en la red de distribución	26
Tabla 4. Diámetros presentes de Asbesto Cemento en la red de distribución.	27
Tabla 5. Diámetros presentes de Hierro Forjado en la red de distribución.	28
Tabla 6. Diámetros presentes de Hierro Dúctil en la red de distribución.	29
Tabla 7. Cantidad de usuarios según el uso del sector de Malpaso.	32
Tabla 8. Cantidad de usuarios según el uso del sector de Cañaverál.	33
Tabla 9. Cantidad de usuarios según el estrato del sector de Cañaverál	34
Tabla 10. Cantidad de usuarios según el estrato del sector de Malpaso	35
Tabla 11. Comportamiento del flujo	44
Tabla 12. Factores multiplicadores de la demanda utilizados en los distintos estratos durante los escenarios de calibración propuestos en el análisis inicial por demandas de la red de distribución	62
Tabla 13. Análisis por emisores	68
Tabla 14. Coeficientes de Escenarios por emisores.	69
Tabla 15. Coeficientes de emisores en la conformación de la Línea base 2 de la red de distribución del distrito Malpaso Cañaverál.	73
Tabla 16 se presentan los escenarios utilizados durante el análisis por diámetros de la red de distribución del distrito Malpaso Cañaverál	76
Tabla 17. Escenarios de calibración por pérdidas menores.	78
Tabla 18. Escenarios de calibración por rugosidades	80
Tabla 19. Caudales de salida y volumen de planta y modelo.	84

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localización del distrito Malpaso Cañaveral	24
Figura 2. Distribución porcentual de los materiales de la red	25
Figura 3. Cantidad de tuberías de PVC en la red de distribución según el diámetro	26
Figura 4. Cantidad de tuberías de HF y HG en la red de distribución según el diámetro (in)	27
Figura 5. Cantidad de tuberías de AC en la red de distribución según el diámetro (in)	28
Figura 6. Cantidad de tuberías de HD en la red de distribución según el diámetro.	30
Figura 7. Cantidad de usuarios según el uso del sector de Malpaso.	32
Figura 8. Distribución porcentual de usuarios según el uso del sector de Cañaveral	33
Figura 9. Cantidad de usuarios según el estrato del sector Cañaveral	34
Figura 10. Cantidad de usuarios según el estrato del sector de Malpaso	35
Figura 11. Pérdida por fricción debida al desplazamiento de una masa de fluido a través de una longitud	43
Figura 12. Interfaz gráfica del distrito en Epanet 2.0	50
Figura 13. Interfaz de Calibra	52
Figura 14. Diagrama de flujo de metodología empleada.	54
Figura 15. Caudal de salida medido y sin calibrar distrito Porvenir	58
Figura 16. Comportamiento del punto de medición del caudal de salida del distrito de porvenir en la Línea Base 1	59
Figura 17. Comportamiento del punto de presión 27824 en la Línea Base 1	60
Figura 18. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito porvenir en el análisis por demandas	63

Figura 19. Comportamiento del punto de medición de presión 274919 de la red del distrito en el análisis por demandas	64
Figura 20. Comportamiento del punto de medición de presión 27754 de la red del distrito en el análisis por demandas	65
Figura 21. Comportamiento del punto de medición de presión 27624 de la red del distrito en el análisis por demandas	66
Figura 22. Comportamiento del punto de medición de presión 25678 de la red del distrito en el análisis por demandas	66
Figura 23. Comportamiento del punto de medición de presión 274918 de la red del distrito en el análisis por demandas	67
Figura 24. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito porvenir en el análisis por emisores	70
Figura 25. Comportamiento del punto de medición de presión del nodo 27824 en el análisis por emisores	71
Figura 26. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito de porvenir en la Línea Base 2	73
Figura 27. Comportamiento del punto de medición de presión 27824 en Línea Base 2	74
Figura 28. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito porvenir en el análisis por diámetros	77
Figura 29. Comportamiento del punto de medición de presión del nodo 27824 en el análisis por diámetros	77
Figura 30. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito porvenir en el análisis por pérdidas menores	79
Figura 31. Comportamiento del punto de medición de presión del nodo 27824 en el análisis por pérdidas menores	79
Figura 32. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito porvenir en el análisis por rugosidades	81
Figura 33. Comportamiento del punto de medición de presión del nodo 27824 en el análisis por rugosidades	81

Figura 34 Modelo Unificado para el punto de medición de caudal.	82
Figura 35. Modelo Unificado para el punto de medición de presión.	83

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Fotografías Caudalímetro Digital	93
Anexo B. Fotografías Manómetro Digital	95
Anexo C. Gráficas de Presión por Análisis de Demandas	96

RESUMEN

TÍTULO: PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA CALIBRACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DEL DISTRITO MALPASO-CAÑAVERAL DEL ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA Y ESTIMACIÓN DEL ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA*

AUTORES: ARDILA PATIÑO, Fenix Ella Yanira
BOHORQUEZ ARRIETA, Yuranis**

PALABRAS CLAVE: Plano Óptimo De Presiones, Calibración de Redes, Redes de Distribución, Índice De Agua No Contabilizada, Epanet, Calibra.

DESCRIPCIÓN

El acueducto metropolitano de Bucaramanga es afectado económicamente por el agua potable que se pierde debido a fugas, estallidos y conexiones clandestinas. A partir de la metodología aplicada en el presente proyecto, se establece un plano óptimo de presiones en el distrito Malpaso Cañaveral y de esta forma reducir los problemas presentados en la operación de dicho distrito.

A partir de una recopilación de datos tomados en campo y datos generados en el programa Epanet 2.0 se creó una serie de escenarios con base en parámetros hidráulicos, socioeconómicos y topológicos. Mediante el software Calibra se incorporaron datos con el fin de generar las curvas de masas y energía para hacer un gran ajuste de estas.

Con los datos medidos en campo, arrojados por el programa y los datos que finalmente se ajustan, se obtienen curvas diferentes, estas se pueden analizar para así determinar las causas por las cuales se pierde el agua debido a fugas, estallidos y conexiones clandestinas y a su vez determinar los factores que llegan a afectar de forma significativa la sensibilidad del modelo.

La finalidad de este proyecto es disminuir el caudal debido a fugas, estallidos y conexiones clandestinas y encontrar el plano óptimo de presiones para reducir el índice de agua no contabilizada para que el acueducto optimice el servicio y maximice sus ingresos.

* Proyecto de Grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil UIS. Director: Luís Fernando Castañeda Galvis

ABSTRACT

TITLE: METHODOLOGIC PROPOSAL FOR THE CALIBRATION OF DISTRIBUTION NETWORKS OF THE DISTRICT MALPASO-CANAVERAL OF THE METROPOLITAN AQUEDUCT OF BUCARAMANGA AND ESTIMATING THE RATE OF UNACCOUNTED FOR WATER*

AUTHOR: ARDILA PATIÑO, Fenix Ella Yanira
BOHORQUEZ ARRIETA, Yuranis**

KEYWORDS: OPTIMAL PLANE OF PRESSURES, CALIBRATION OF NETWORK, NETWORKS OF DISTRIBUTION, INDEX OF UNACCOUNTED FOR WATER, EPANET AND CALIBRA.

DESCRIPTION

Bucaramanga's Metropolitan Aqueduct is economically affected by drinkable water that is lost due to leaks, escapes and illegal connections. From the methodology applied in this project, an optimal plane of pressure is established in the district of Malpaso-Cañaveral and in this way reduces the problems in the operation of such districts.

From a summary of information taken in field and information generated in the program Epanet 2.0 a series of scenes was created by base in hydraulic, socioeconomic and topological parameters. Through the software CALIBRA the information were incorporated to generate the curves of mass and energy to make a great adjustment of these.

With the field measured pressure and flow data, generated by the program and the information that make a great adjustment, obtained three different curves, these can be analyzed in order to identify reasons that causes flow due to leaks, escapes and illegal connections and determine the factors that they affect significantly the sensitivity of the model.

The purpose of this project is to reduce the flow due to leaks, escapes and illegal connections and find the optimal plane of pressure to reduce the rate of unaccounted for water so that the aqueduct optimizes the service and maximizes its income.

* Grade Project.

** Faculty of Engineerings Physicomechanical. School of Civil Engineering UIS. Director: Luís Fernando Castañeda Galvis

INTRODUCCIÓN

Actualmente el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga está realizando un proceso de calibración de redes, implementando planos óptimos de presiones, los cuales buscan reducir los índices de agua no contabilizada mediante la instalación de válvulas reguladoras de presión e identificar las zonas en la que se están presentando fugas o conexiones clandestinas.

Debido a fugas, estallidos y conexiones clandestinas, el agua que suministra el acueducto a los usuarios es mayor al agua facturada, esto genera pérdidas de agua potable y aumento en el índice de agua no contabilizada.

En este proyecto se implementó una metodología que consta de dos partes. Para el proceso de calibración del distrito de Malpaso-Cañaveral, esta metodología se hará con el fin de reducir las pérdidas de agua en la red teniendo en cuenta las restricciones de presiones máximas y mínimas impuestas por la normatividad nacional del sector agua potable y saneamiento básico.

La primera parte de este proyecto consiste en una recopilación de datos tomados en campo y datos generados por Epanet 2.0, a partir de estos se generaron escenarios basados en criterios hidráulicos, socioeconómicos y topológicos. La segunda parte de este proyecto consiste en ajustar los parámetros del modelo de forma tal que los resultados arrojados por este se asemejen a los medidos en el terreno; se midió la presión y el caudal con los cuales se modeló las curvas de masa y energía y finalmente se ajustan.

El procedimiento se hizo con el fin de establecer una magnitud absoluta de la presión del agua a la entrada del distrito, disminuyendo así el caudal debido a fugas y por lo tanto el IANC, y así optimizar la prestación del servicio.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En Latinoamérica se presenta el mayor porcentaje de Agua no Contabilizada, por lo tanto al reducir ésta, se presentaría un ahorro sustancial de dinero que se utilizaría en otras obras de infraestructura.¹

La razón para desarrollar una metodología de optimización como ésta se debe a que es necesario definir una presión a la entrada de cada sector, disminuyendo las pérdidas de agua en la red de distribución y maximizando los ingresos para la empresa prestadora del servicio.

Un efecto directo al reducir la presión en un distrito, es la disminución de las fugas en las tuberías y por lo tanto la disminución en la ocurrencia de nuevas fugas. El acueducto registra una diferencia entre el agua producida y el agua facturada, la relación entre estas es conocida como eficiencia hidráulica.²

Los ingresos máximos se obtienen cuando se encuentra un nivel de presión en el sector que minimice las pérdidas técnicas de agua, causadas por fugas no detectables, estallidos y conexiones clandestinas, a la vez que minimiza los efectos de disminución sobre el agua facturada, dentro de las restricciones de presiones máximas y mínimas impuestas por la normatividad nacional del sector agua potable y saneamiento básico.³

¹ Aspectos Técnicos del índice de agua no contabilizada en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Diciembre de 2003. Oscar Andrés Benavides.

² Metodología para la calibración de redes de distribución bajo ambiente de fugas. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Enero de 2003. Felipe Leal Villarreal.

³ XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica “Metodología para la determinación del plano óptimo de presiones en una red de distribución de agua potable” Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Juan G. Saldarriaga Profesor Titular, Director Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. A.A 4976. Felipe S. Contreras Jiménez Profesor Investigador.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar una metodología para la calibración y determinación del Índice de Agua no Contabilizada para los regímenes de presión alta y baja en el Distrito Malpaso del Acueducto de Bucaramanga S.A. ESP

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros que influyen en los procesos de Calibración de Redes de Distribución para el Distrito Malpaso Cañaveral realizando análisis de sensibilidad.
- Determinar patrones de consumo para diferentes zonas del Distrito Malpaso Cañaveral.
- Calibrar masa y energía en el Distrito Malpaso Cañaveral.
- Estimar el Índice de Agua no Contabilizada para el Distrito Malpaso Cañaveral en régimen de presión actual.
- Identificar zonas con posibilidad de fugas y fraudes.

3. MARCO REFERENCIAL

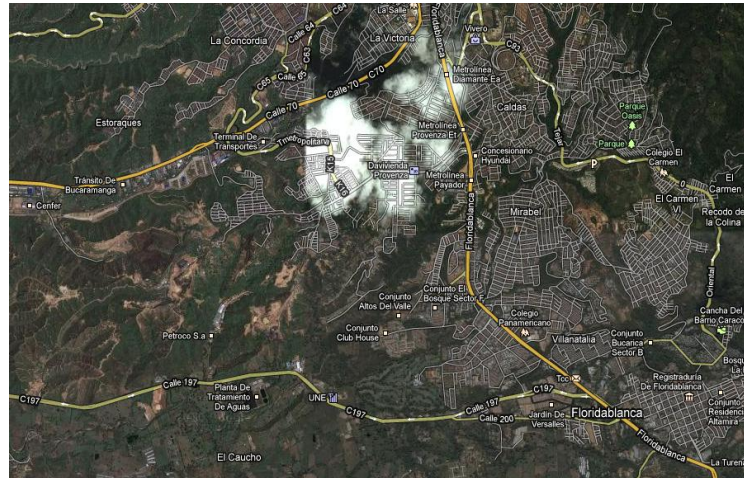
3.1 INFORMACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

3.1.1 Localización del sector. El municipio de Bucaramanga hace parte del Área Metropolitana de Bucaramanga, conformada junto con Floridablanca, Girón y Piedecuesta. El suelo urbano está constituido por las áreas del territorio municipal destinadas a usos urbanos y se encuentra dividido en quince comunas.

El distrito malpaso está conformado por barrios, asentamientos humanos y sectores de las comunas:

- La Pedregosa (comuna No 9): Nueva Granada, Antonia Santos Sur, Urbanización El Sol I y II, Quebrada La Iglesia, San Pedro Claver, San Martín, La Pedregosa, La Libertad, Diamante I, Las Casitas, Asturias, Torres de Alejandría, Aptos. El Sol, Bellavista y Villa Inés.
- Provenza (comuna 10): Neptuno, Diamante II, San Luis, Urb. Provenza, Fontana y El Cristal.
- Sur (comuna 11): Ciudad Venecia, El Rocío, Las Delicias, Manuela Beltrán I y II, Dangond, Toledo Plata, Granjas Julio Rincón, Jardines de Coaviconsá, El Porvenir, Santa María, Villa Alicia, Condado de Gibraltar y El Candado.
- Cañaveral: Club House Campestres, Barrio el Progreso, El Bosque, Cañaveral Campestre, Versalles Campestre, Urbanización Cañaveral, etc.

Figura 1. Localización del distrito Malpaso Cañaveral



Fuente: Tomado de google earth

3.1.2 Catastro de la red

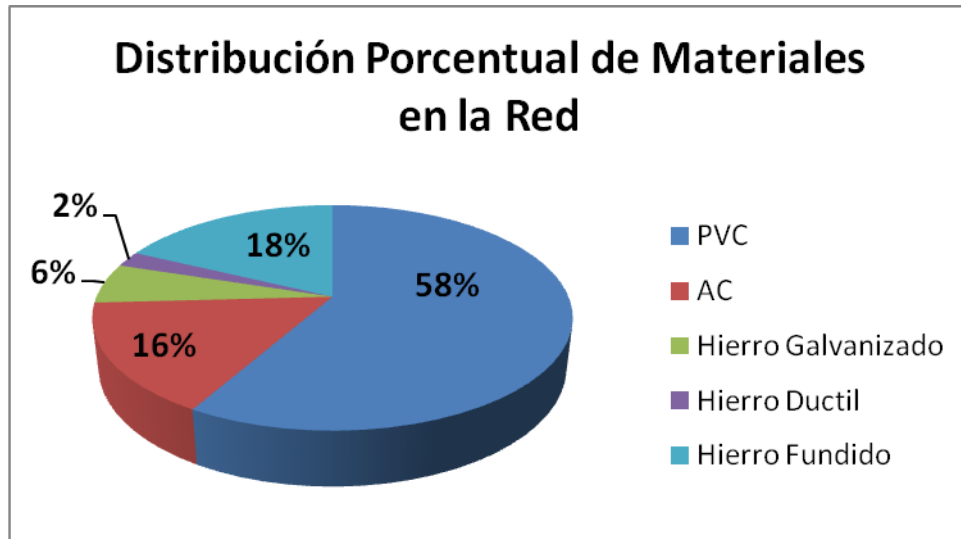
3.1.2.1 Materiales

Tabla 1. Materiales presentes en longitud de la red de distribución.

Tipo de tubería	Rugosidad	Cantidad
PVC	0.0015	3250
AC	0.03	886
Hierro Galvanizado	0.15	321
Hierro Dúctil	0.25	124
Hierro Fundido	0.26	997

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 2. Distribución porcentual de los materiales de la red



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

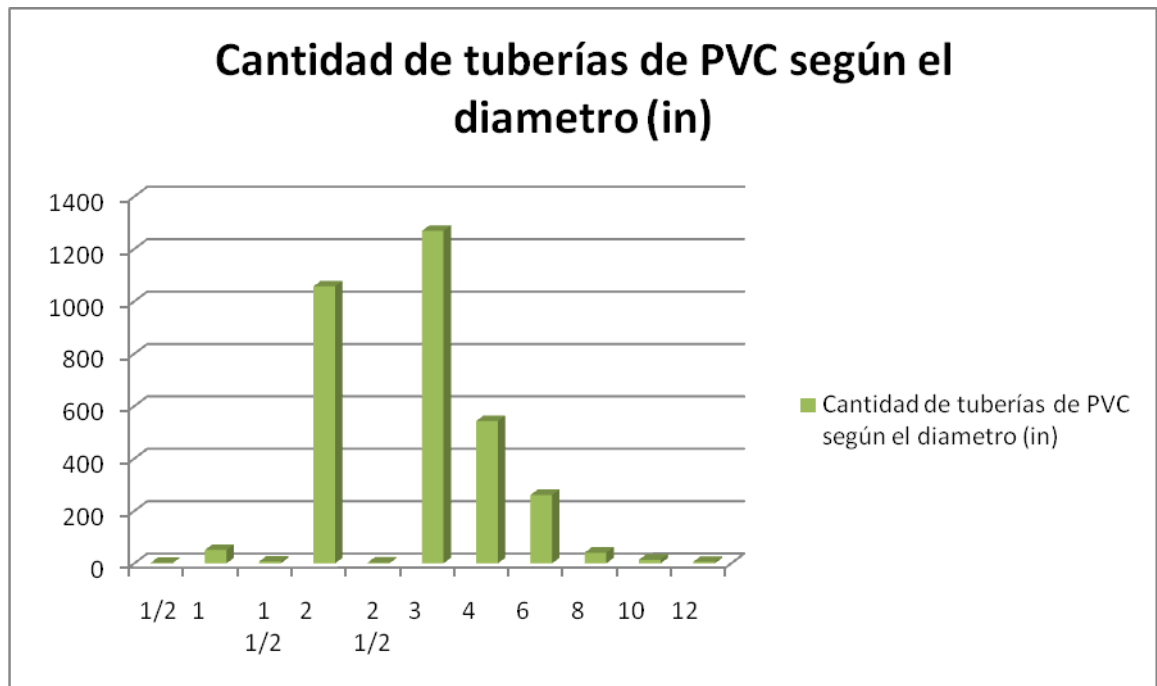
3.1.2.2 Diámetro

Tabla 2. Diámetros de PVC presentes en la red de distribución.

Diámetro (in)	Cantidad
0.5	2
1	51
1.5	7
2	1057
2.5	3
3	1269
4	543
6	261
8	41
10	14
12	6

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 3. Cantidad de tuberías de PVC en la red de distribución según el diámetro



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

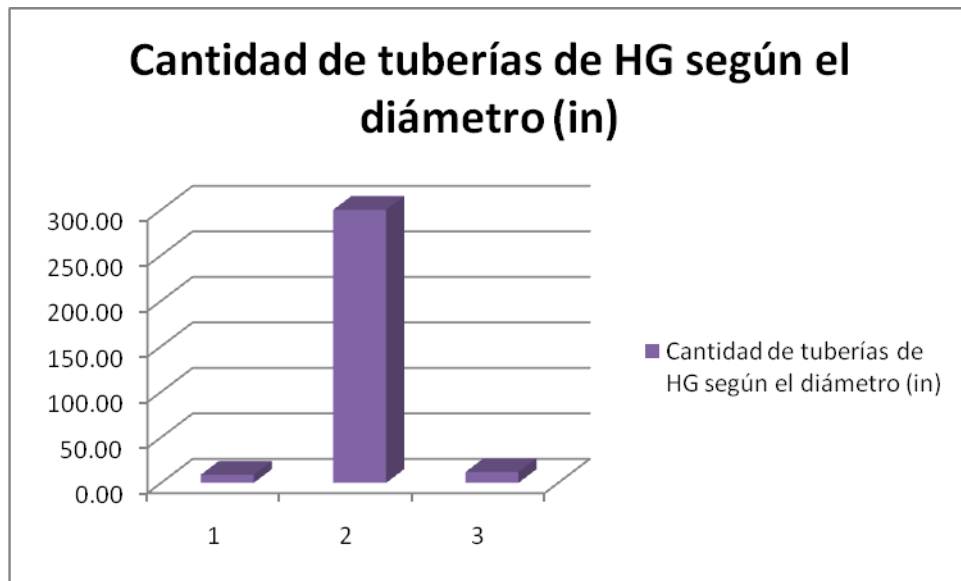
Tubería Hierro Galvanizado

Tabla 3. Diámetros presentes de Hierro Galvanizado en la red de distribución

Tubería Hierro Galvanizado	
Diámetro (in)	Cantidad
1	9.00
2	300.00
3	12.00

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 4. Cantidad de tuberías de HG en la red de distribución según el diámetro (in)



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

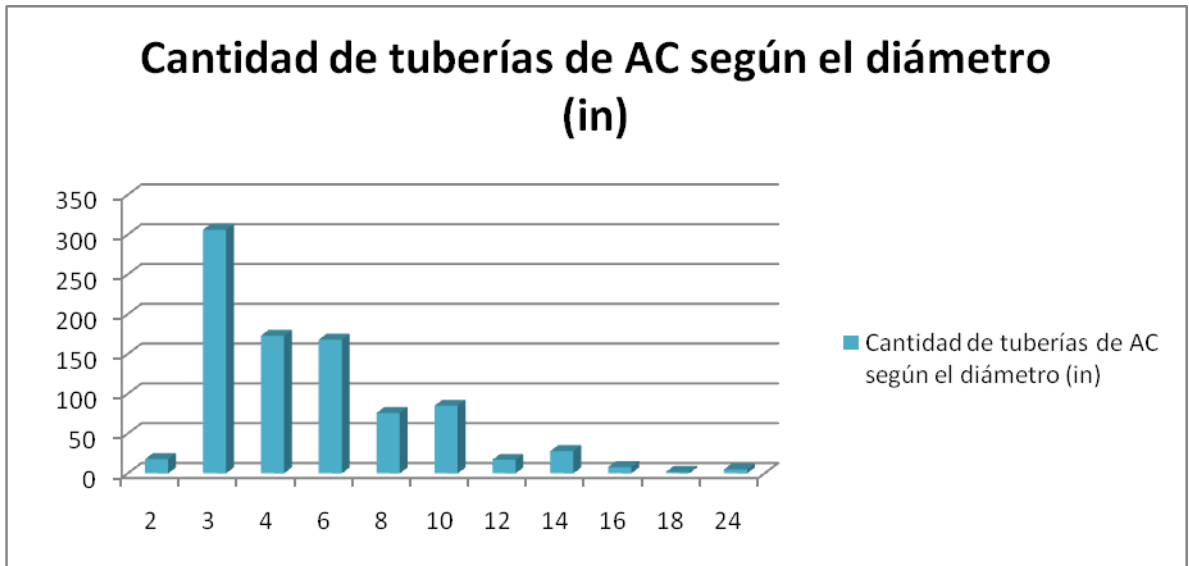
Tubería de Asbesto Cemento

Tabla 4. Diámetros presentes de Asbesto Cemento en la red de distribución.

Tubería Asbesto Cemento	
Diámetro (in)	Cantidad
2	18
3	306
4	173
6	168
8	76
10	85
12	17
14	28
16	8
18	2
24	5

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 5. Cantidad de tuberías de AC en la red de distribución según el diámetro (in)



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Tubería Hierro Forjado

Tabla 5. Diámetros presentes de Hierro Forjado en la red de distribución.

Tuberías de Hierro Forjado		
Diámetro (in)	Cantidad	Longitudes
6	1	18.89

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

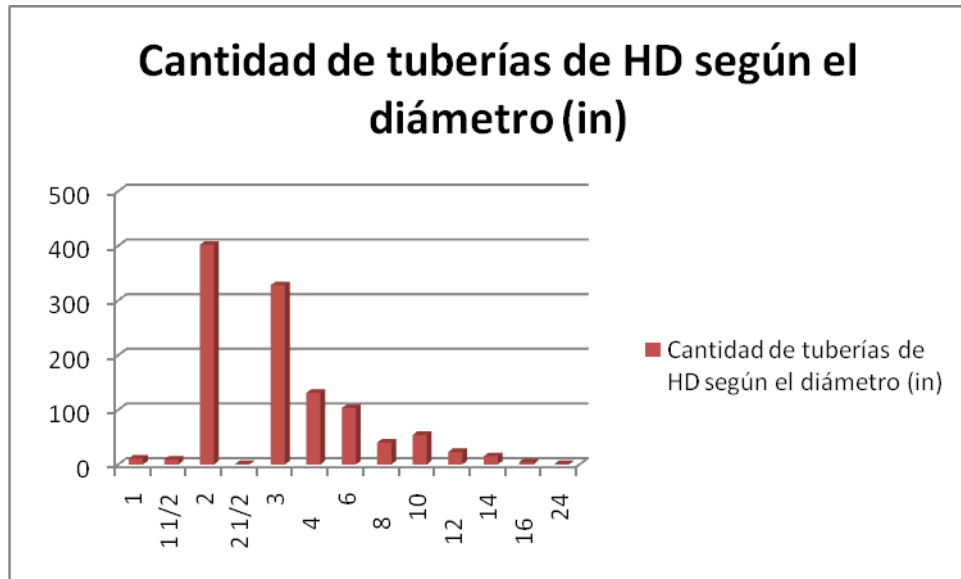
Tubería Hierro Dúctil

Tabla 6. Diámetros presentes de Hierro Dúctil en la red de distribución.

Tubería de Hierro Dúctil	
Diámetro (in)	Cantidad
1	11
1 1/2	9
2	402
2 1/2	1
3	328
4	131
6	103
8	40
10	54
12	23
14	15
16	4
24	1

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 6. Cantidad de tuberías de HD en la red de distribución según el diámetro.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

3.1.2.3 Funcionamiento y localización de tanques y estaciones reguladoras de presión

- **Tanques.** Los tanques de almacenamiento son elementos que pueden estar ubicados a lo largo de toda la red, se encargan de garantizar la presencia del líquido en el sistema en todo momento, aprovechando las horas de bajo consumo para acumular un volumen de agua, el cual es consumido posteriormente durante las horas pico, en el distrito Malpaso Cañaveral se cuenta con los tanques de Malpaso y Cañaveral.

El Tanque de Malpaso está ubicado en el barrio la Pedregosa con el identificador ID 56565, las coordenadas son: 107209.30 X y 76644.42 Y. Su altura total es de 956 m, este suministra agua a algunos barrios de La Pedregosa (comuna 9), a Provenza (comuna 10) y Sur (comuna 11).

El Tanque Cañaverál está ubicado al frente de Lechesan con el identificador ID 1, las coordenadas son: 107065.42 X y 74978.34 Y. Su altura total es de 907.7 este suministra agua al sector de Cañaverál.

- **Válvulas.** Se encuentran válvulas instaladas en diferentes partes del distrito de Malpaso Cañaverál, estas válvulas son reductoras de presión y se encuentran trabajando bajo un parámetro requerido conocido como consigna que indica las condiciones de operación de la válvula.

La válvula V_18437 se encuentra ubicada en la entrada del Barrio San Luis, tiene un diámetro de 101.6 mm y trabaja con una consigna de 20; esta fue una de las primeras válvulas instaladas debido a las altas presiones que se generan en el barrio.

La válvula V_19117 se encuentra ubicada a la entrada del Barrio Diamante II, tiene un diámetro de 101.6 mm, trabaja con una consigna de 22.4, y fue instalada en Mayo del 2010, estas modifican las presiones del Diamante II y a su vez las de San Luis, en caso de no haber instalado esta válvula las presiones en San Luis serían mucho mayores variando de 80 a 108 mca.

La válvula V_18438 se encuentra ubicada a la salida del barrio Porvenir, tiene un diámetro de 142.4 mm, trabaja con una consigna de 30 y fue instalada en el 2010, anteriormente las presiones aguas arriba de la válvula variaban de 9 a 12 mca después de la instalación de la válvula las presiones aumentaron de 36 a 68 mca.

La válvula V_19118 se encuentra ubicada a la entrada del barrio Ciudad Venecia, tiene un diámetro de 76.2 mm, trabaja con una consigna de 31.5; realizando modificaciones en el modelo de Epanet 2.0 las presiones en este barrio son mayores de 70 mca llegando a 107 mca en caso de que la válvula se encontrara

abierta, con la válvula trabajando con su consigna las presiones se encuentran de 30 a 50 mca, reduciéndose así las presiones en cantidades considerables.

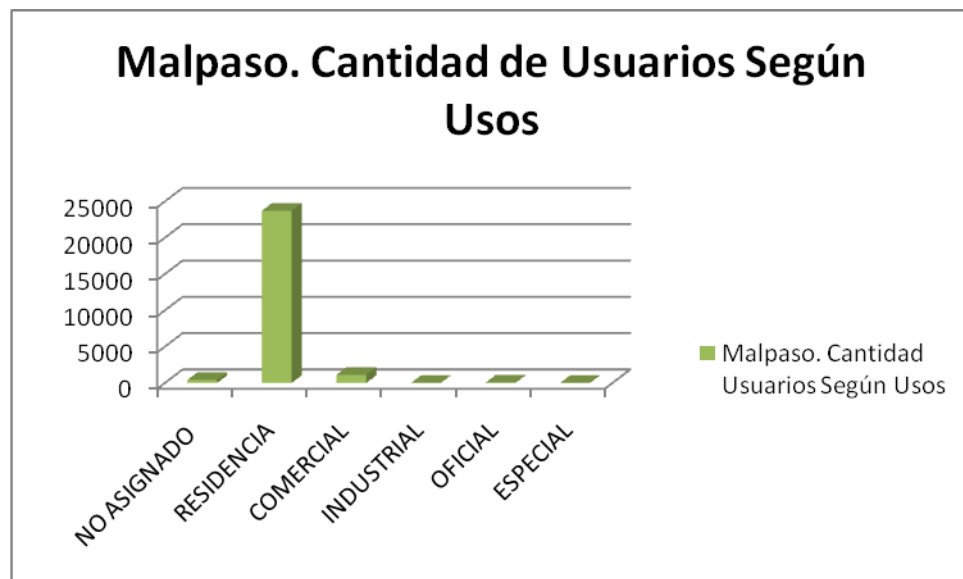
3.1.2.4 Usuarios por estrato y por uso

Tabla 7. Cantidad de usuarios según el uso del sector de Malpaso.

Distrito	Uso	Cantidad
MALPASO	NO ASIGNADO	396
MALPASO	RESIDENCIA	23708
MALPASO	COMERCIAL	1124
MALPASO	INDUSTRIAL	8
MALPASO	OFICIAL	49
MALPASO	ESPECIAL	15
	Total	25300

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 7. Cantidad de usuarios según el uso del sector de Malpaso.



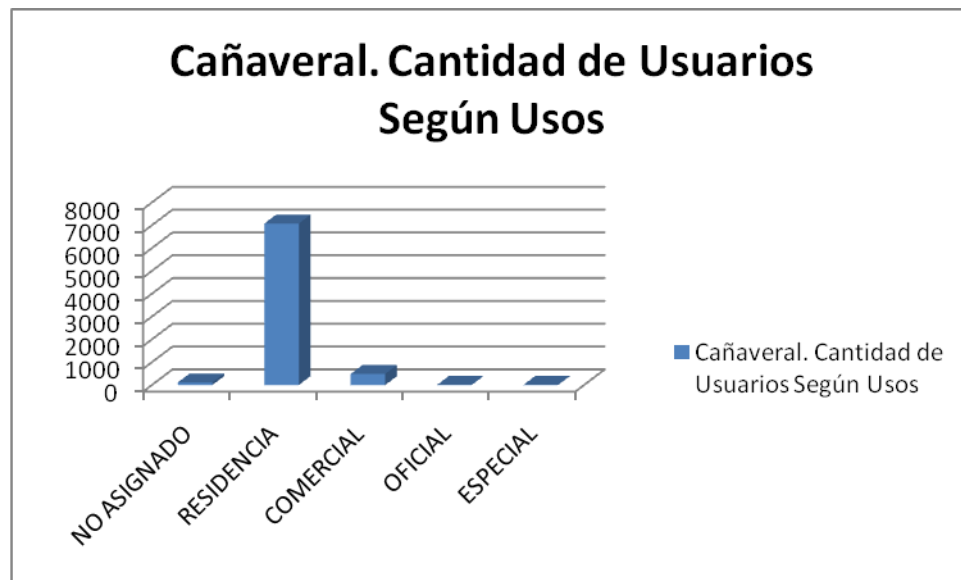
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Tabla 8. Cantidad de usuarios según el uso del sector de Cañaveral.

Distrito	Uso	Cantidad
CAÑAVERAL	NO ASIGNADO	113
CAÑAVERAL	RESIDENCIA	7074
CAÑAVERAL	COMERCIAL	486
CAÑAVERAL	OFICIAL	5
CAÑAVERAL	ESPECIAL	8
	Total	7686

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 8. Distribución porcentual de usuarios según el uso del sector de Cañaveral



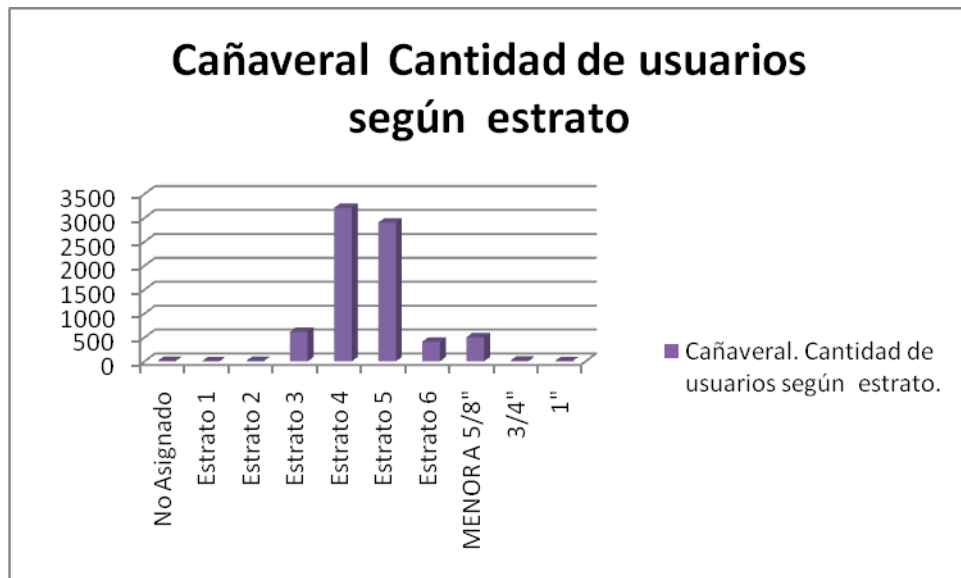
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Tabla 9. Cantidad de usuarios según el estrato del sector de Cañaverál

DISTRITO	ESTRATO	CANTIDAD
CAÑAVERAL	No Asignado	11
CAÑAVERAL	Estrato 1	1
CAÑAVERAL	Estrato 2	6
CAÑAVERAL	Estrato 3	618
CAÑAVERAL	Estrato 4	3210
CAÑAVERAL	Estrato 5	2902
CAÑAVERAL	Estrato 6	413
CAÑAVERAL	MENOR A 5/8"	505
CAÑAVERAL	3/4"	17
CAÑAVERAL	1"	3
	Total	7686

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 9. Cantidad de usuarios según el estrato del sector Cañaverál



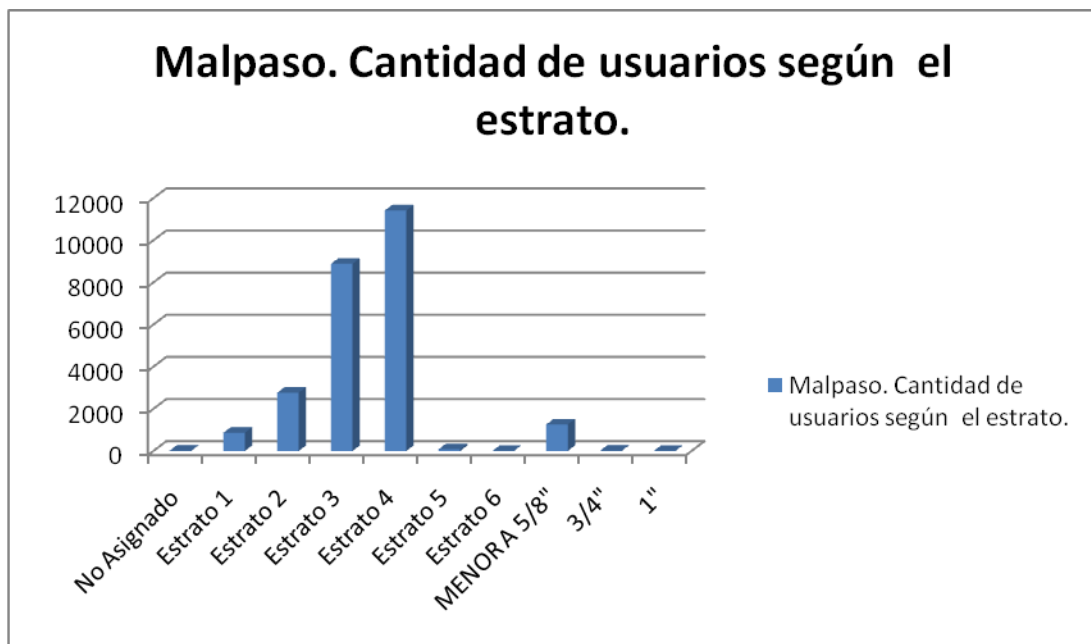
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Tabla 10. Cantidad de usuarios según el estrato del sector de Malpaso

DISTRITO	ESTRATO	CANTIDAD
MALPASO	No Asignado	13
MALPASO	Estrato 1	864
MALPASO	Estrato 2	2763
MALPASO	Estrato 3	8885
MALPASO	Estrato 4	11414
MALPASO	Estrato 5	84
MALPASO	Estrato 6	3
MALPASO	MENOR A 5/8"	1256
MALPASO	3/4"	11
MALPASO	1"	7
	Total	25300

Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 10. Cantidad de usuarios según el estrato del sector de Malpaso



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

3.2 PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES

El plano óptimo de presiones se define como la magnitud absoluta de la presión del agua a la entrada de un sector, sub-sector, distrito o zona de la red de distribución de agua potable (aguas abajo de una válvula controladora o reductora de presión), tal que el caudal por pérdidas totales debidas a fugas no visibles, a daños (roturas de tubos, explosiones causados por terceros, etc.) es minimizado sin que se afecte en forma apreciable el volumen total de agua facturado ni se dejen de cumplir los niveles de presión máxima o mínima en una red establecidos por la normatividad colombiana referente al sector de agua potable y saneamiento básico.⁴

3.3 ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA

Uno de los indicadores más utilizados para medir la eficiencia de las empresas es el Índice de Agua No Contabilizada (IANC), que conceptualmente representa la proporción de agua potable producida que no se factura. Este índice es la relación entre el volumen total de agua que se suministra a las redes (volumen de agua a la salida de una planta o de un distrito) con el volumen total de agua que se factura a los usuarios de ésta en un período determinado.

El índice de agua no contabilizada se calcula realizando la sumatoria del volumen de agua macromedido, a este valor se le resta la sumatoria del volumen de agua micromedido o facturado, dividiendo todo en la sumatoria del volumen de agua macromedido o producido, finalmente el valor se da en términos porcentuales por lo tanto se multiplica por 100. A continuación se muestra la ecuación.

⁴ Efecto del índice de agua no contabilizada en las tarifas para acueductos medianos y pequeños en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Mayo 2004. Susana Lara Mesa.

$$IANC(\%) = \frac{\text{Volumen de agua producido} - \text{Volumen de agua facturado}}{\text{Volumen de agua producido}} * 100$$

Ecuación 1

Esta diferencia de volumen de agua se pierde de la siguiente forma:

- Agua usada para la operación propia de las plantas de tratamiento
- Pérdidas en la planta de tratamiento
- Pérdidas de Estanqueidad en los tanques de almacenamiento
- Pérdidas por roturas o demandas clandestinas en la aducción (agua cruda)
- Perdidas por filtración y/o roturas en las redes de distribución
- Usos no autorizados de agua potable
- Errores en la macro y micro medición

Se presentan tres grandes causas que con llevan a que este índice aumente o disminuya.

1. Por error en la medición (macro o micromedición). Representan entre un 30% y 40% de las pérdidas de la empresa prestadora del servicio.⁵
2. Las fugas. Representan entre un 25% y 35% en las pérdidas.⁶
3. Por conexiones clandestinas, fraudes o robos. Representa el 25% restante.

El IANC representa tanto las pérdidas físicas de volumen de agua, como las pérdidas financieras de la empresa o entidad prestadora del servicio.

Las pérdidas se clasifican en pérdidas físicas y no físicas o comerciales

- Físicas: Es el volumen de agua que aunque inyectado a la red de distribución no llega a ser consumida por los usuarios.
- No Físicas o Comerciales: Es el agua que es consumida pero que no es registrada y por lo tanto no es facturada.

⁵ Aspectos Técnicos del índice de agua no contabilizada en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Diciembre de 2003. Oscar Andrés Benavides.

⁶ Aspectos Técnicos del índice de agua no contabilizada en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Diciembre de 2003. Oscar Andrés Benavides.

Las empresas prestadoras de servicio de acueducto tienden a reducir los IANC a valores admisibles con el fin de mejorar la continuidad del servicio y obtener una mejor eficiencia en el sistema.

3.4 PÉRDIDAS EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Pérdidas en sistemas de distribución.⁷ Se han diseñado metodologías para la estimación de rupturas y pérdidas sub- superficiales. La estimación de estos parámetros está ligada al flujo nocturno y a las pérdidas anuales. La distribución de las pérdidas en un sistema de agua potable se divide en 4:

- Tuberías truncadas
- Servicio de los embalses o tanques de almacenamiento
- Distribución de las tuberías principales
- Comunicación y unión entre las tuberías

Se debe tener en cuenta con qué frecuencia se presentan las rupturas en las tuberías y si estas se relacionan con el mantenimiento y la operación de la red. Las pérdidas en horas nocturnas donde aumenta la presión debido al bajo consumo, pueden ser estimadas a partir de la medición en campo de esos flujos. Por lo tanto es necesario anexar a las órdenes de trabajo un registro de los daños que se han presentado, de esta forma es posible realizar una georeferencia de estos.

⁷ Metodología para la calibración de redes de distribución bajo ambiente de fugas. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Enero de 2003. Felipe Leal Villarreal.

3.5 PRESIÓN VS AGUA NO FACTURADA

Presión vs Agua no facturada.⁸ Al realizar un modelo donde las fugas y las demandas son dependientes de la presión en una red de distribución de agua potable, se obtienen resultados más confiables al hacer simulaciones, como la reducción de la presión para controlar las fugas o restricciones durante sequías prolongadas.

A lo largo de los años es posible trabajar con el mismo caudal de agua, esto se debe a que al disminuir el IANC no es necesario incrementar la demanda ya que el caudal que se perdía anteriormente se puede entregar a nuevos usuarios.

La relación entre el agua registrada y el agua producida se conoce como la eficiencia hidráulica. Al construir modelos hidráulicos de las redes de distribución, se consideran proporcionales los consumos no controlados en las uniones con las demandas, con el fin de garantizar equilibrio entre las entradas y las salidas, pero los consumos y las fugas varían a lo largo del día, dependiendo de las demandas y de las presiones en el sistema, por lo tanto la eficiencia hidráulica no es la misma durante el día que durante la noche.

3.6 ASPECTOS ECONÓMICOS DE LAS FUGAS

3.6.1 Aspectos económicos de las fugas.⁹ Las fugas pueden ser de dos tipos:

Fugas subterráneas: Son fugas Indetectables. Cantidades pequeñas pero de larga duración.

⁸ Metodología para la calibración de redes de distribución bajo ambiente de fugas. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Enero de 2003. Felipe Leal Villarreal.

⁹ Efecto de índice de agua no contabilizada en las tarifas para acueductos medianos y pequeños en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería civil y ambiental. Mayo de 2004. Susana Lara Mesa.

Fugas detectables: Se pueden localizar y reparar. Estas fugas representan grandes cantidades de pérdidas de agua, pero normalmente de corta duración si se reportan.

Las fugas en cualquier sistema son inevitables, pero debe ser considerado un nivel aceptable de fugas el cual debe balancear el costo de localizarlas y repararlas contra el valor del agua perdida y debe ser igual al nivel económico de fugas.

Se considera que el agua no contabilizada se pierde de dos formas:

Pérdidas comerciales

Pérdidas técnicas

Las comerciales son aquellas relacionadas con el funcionamiento de la empresa, como la no detección de conexiones ilegales, deficiencia en la medición y usuarios no facturados (aproximadamente 65% de las pérdidas totales).

Las pérdidas técnicas son aquellas presentes en la estructura de producción y conducción del agua (35% de las pérdidas totales).

3.6.2 Pérdidas comerciales.¹⁰ Son provocadas por errores en la medición. Estos errores tienen diversas consecuencias:

- No se detectan las conexiones
- Se facturan volúmenes menores a los reales cuando los medidores no funcionan adecuadamente.
- La ausencia de medidores puede tener la peor consecuencia de todas, al no facturar el agua consumida a ciertos usuarios.

¹⁰ Efecto de índice de agua no contabilizada en las tarifas para acueductos medianos y pequeños en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería civil y ambiental. Mayo de 2004. Susana Lara Mesa.

3.6.3 Pérdidas técnicas.¹¹ Las más comunes son las pérdidas en accesorios (codos, tees, yees, uniones entre otros), rebosaderos, tanques de almacenamiento y fallas en las redes de conducción. Dentro de las pérdidas técnicas se encuentran dos tipos de fugas: Las visibles, detectables o aparentes (reactivas), son fáciles de eliminar si se cuenta con adecuado sistema de medición y monitoreo y posterior plan de recuperación y rehabilitación. Las no visibles o no detectables (proactivas), son las que se localizan en la red interna del acueducto y se deben localizar con instrumentos tales como geófonos electromecánicos, detectores electrónicos o de metales.

El problema con las fugas de agua va mucho más lejos del efecto que tiene dentro del cálculo de las tarifas de agua. Cuando se pierde agua, se pierde presión en los puntos de suministro, se pueden crear vacíos en las estructuras adyacentes a las tuberías.

3.6.4 Factores que afectan las fugas¹²

3.6.4.1 Presión. Incide de diferentes formas dentro del volumen de agua perdido. Las pérdidas en las uniones y demás accesorios, aumentan con un aumento de presión.

- Los cambios drásticos de presión, causan daños en las tuberías que dan lugar a fugas.
 - Los ciclos de presión pueden desgastar las tuberías.
 - Altas presiones aumentan la tasa a la cual se fuga el agua por huecos o fisuras.
- A pesar de que se producen más fugas, cuando hay mayor presión es más fácil detectarlas.

¹¹ Efecto de índice de agua no contabilizada en las tarifas para acueductos medianos y pequeños en Colombia. Susana Lara Mesa.

¹² Efecto de índice de agua no contabilizada en las tarifas para acueductos medianos y pequeños en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería civil y ambiental. Mayo de 2004. Susana Lara Mesa.

3.6.4.2 Movimiento del suelo. Pueden causar fracturas en la tubería, movimiento de accesorios, o generar una concentración de esfuerzos localizados causando la falla de la tubería, estos movimientos pueden ser causados por cambios de humedad del terreno, temperatura o movimientos naturales como sismos.

3.6.4.3 Condición de la tubería. El problema más serio lo constituye la corrosión en las tuberías metálicas, ya que no solo reduce la sección aumentando la presión, sino que puede eventualmente dañar las tuberías.

3.6.4.4 Baja calidad de los materiales. La baja calidad de los materiales y equipos como accesorios defectuosos, válvulas mal instaladas, sellos pobres y baja resistencia de los materiales de las tuberías, son una fuente de fugas muy importante.

3.6.4.5 Características del suelo. El tipo de suelo en que se encuentre cimentada la red favorece o perjudica el tiempo y duración de la aparición y detección de fugas.

3.6.4.6 Carga de tráfico. Las vibraciones del tránsito vehicular pueden ocasionar fallas en las tuberías.

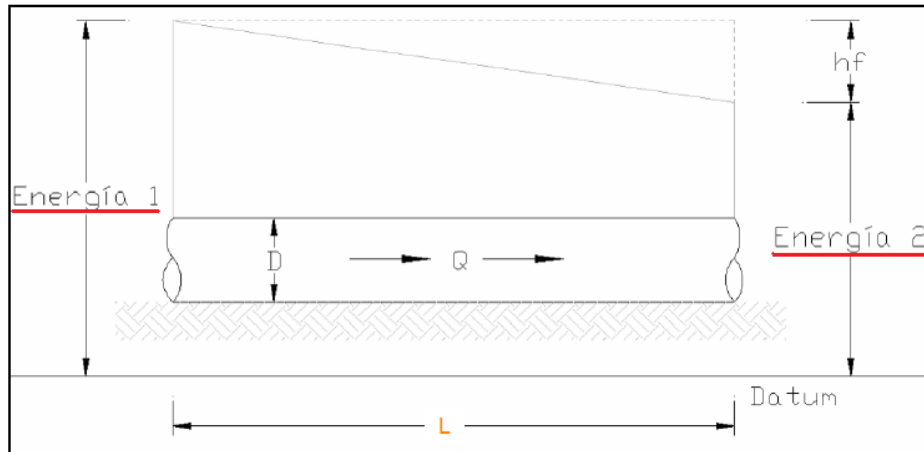
3.6.4.7 Edad. A pesar de no ser un factor relacionado directamente con el estado de la red, a medida en que la tubería envejece pierde sus propiedades físicas y mecánicas.

3.7 ECUACIONES UTILIZADAS

Para el cálculo de la energía requerida para transportar una masa de fluido a través de un conducto cerrado de cierta longitud, se necesitan ciertas ecuaciones que se mostraran a continuación.

La energía que se desea calcular depende de las propiedades, tanto del fluido a transportar como del conducto a través del cual se transportara dicho fluido, y el tipo de fluido.

Figura 11. Pérdida por fricción debida al desplazamiento de una masa de fluido a través de una longitud



Fuente: Metodología de calibración de redes de distribución de agua potable.
César Mauricio Jurado Toro

Dónde:

D : Diámetro de la tubería (m)

L : Longitud de la tubería (m)

Q : Caudal desplazado a través de la tubería (l/s)

h_f : Pérdida de la carga debido a la fricción (m)

3.7.1 Tipo de Flujo

- Flujo Laminar: Al ser bajo el gradiente de velocidad, la fuerza de inercia es mayor que la de fricción, las partículas se desplazan con muy poca energía, por lo tanto las partículas siguen trayectorias rectilíneas uniformes.
- Flujo Turbulento: Al aumentar el gradiente de velocidad, la fricción entre partículas se incrementa, y estas adquieren una energía de rotación apreciable, se

pierde el efecto de la viscosidad, y debido a la rotación las partículas cambian de trayectoria, las partículas chocan entre sí y cambian de rumbo en forma errática.

3.7.2 Número de Reynolds.¹³ El comportamiento del flujo se encuentra gobernado por la relación entre sus fuerzas inerciales y sus fuerzas viscosas

$$Re = \frac{Vs * \rho * D}{\mu}$$

Ecuación 2. Reynolds

Dónde:

Re: Número de Reynolds (adimensional)

ρ : Densidad del fluido (Kg/m³)

Vs: Velocidad característica del fluido (m)

D: Diámetro de la tubería (m)

μ : viscosidad dinámica del fluido (N s/m²)

Tabla 11. Comportamiento del flujo

Flujo Laminar	Re < 2000
Flujo Transicional	2000 < Re < 4000
Flujo Turbulento	Re > 4000

3.7.3 Darcy-Weisbach o de resistencia.¹⁴ Esta es válida tanto para flujo laminar como para flujo turbulento de cualquier líquido en una tubería. Sin embargo, puede suceder que debido a velocidades extremas, la presión corriente abajo disminuya de tal manera que llegue a igualar, la presión de vapor del líquido, apareciendo el fenómeno conocido como cavitación y los caudales. Con el debido razonamiento

¹³ Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003. Daniel Eduardo Salas Useche

¹⁴ Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003. Daniel Eduardo Salas Useche

se puede aplicar a tubería de diámetro constante o de diferentes diámetros por la que pasa un fluido donde la densidad permanece razonablemente constante a través de una tubería recta, ya sea horizontal, vertical o inclinada.

Para tuberías verticales, inclinada o de diámetros variables, el cambio de presión debido a cambios en la elevación, velocidad o densidad del fluido debe hacerse de acuerdo a la ecuación de Bernoulli.

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 3. Darcy – Weisbach

h_f = pérdida de carga debida a la fricción. (m)

f = factor de fricción. (Adimensional)

L = longitud de la tubería (m)

D = diámetro de la tubería (m)

v = velocidad media del fluido (m)

g = aceleración de la gravedad: $g = 9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$

El factor de fricción f es adimensional y varía de acuerdo a los parámetros de la tubería y del flujo.

Para calcular el factor de pérdidas “ f ” en la región laminar Poiseuille propuso:

$$f = \frac{64}{Re}$$

Y para el cálculo del factor de pérdidas “ f ”, en régimen turbulento, normalmente se usa la ecuación de Colebrook-White.

3.7.4 Colebrook- White¹⁵

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

Ecuación 4. Colebrook – White

Dónde:

Re es el número de Reynolds (Adimensional)

Ks: Rugosidad Absoluta (m)

D: Diámetro de la tubería (m)

f: el factor de fricción (Adimensional)

3.7.5 Pérdidas Menores.¹⁶ La energía total requerida a lo largo de la tubería corresponde a la consumida por la fricción (Ver Ecuación 3) más las pérdidas menores, y estas son generadas por los bordes de las uniones, contracciones, codos.

El total de las perdidas menores en la tubería se puede ver en la Ecuación 3.

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

Ecuación 5. Pérdidas Menores

Dónde:

Km: Coeficiente de pérdidas menores de los elementos (m)

V: Velocidad (m/s)

g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

¹⁵ Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003. Daniel Eduardo Salas Useche

¹⁶ Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003. Daniel Eduardo Salas Useche

3.7.6 Pérdidas totales de energía. El gasto total de energía a lo largo de una tubería se puede ver en la Ecuación 5.

$$H = H_f + H_m$$

Ecuación 6. Pérdidas totales de energía

3.7.7 Conservación de la masa.¹⁷ Describir el comportamiento físico de la red de distribución tiene que ver con el principio de conservación de masa en toda la red y en cada uno de sus nodos. El caudal total que entra a cada nodo debe ser igual al caudal total que sale. Para cada nodo tenemos:

$$\sum_{i=1}^I Q_i = \sum_{s=1}^S Q_s + D$$

Ecuación 7. Conservación de masa

Dónde:

I: Cantidad de tubos que aportan caudal al nodo (adimensional)

S: Cantidad de tubos que reciben caudal del nodo (adimensional)

D: Caudal demandado en el nodo (l/s)

Qi: Caudal aportado al nodo por el tubo i (l/s)

Qs: Caudal recibido por el tubo s (l/s)

3.7.8 Conservación de energía.¹⁸ Son las pérdidas de energía que ocurren a lo largo de las tuberías. La energía total aguas abajo de una tubería es igual a la energía total al principio de la tubería, menos las pérdidas que ocurren a lo largo de esta:

$$E_F = E_I - L$$

Ecuación 8. Conservación de la Energía

¹⁷ Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003. Daniel Eduardo Salas Useche

¹⁸ Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003. Daniel Eduardo Salas Useche

Ef: Energía total al final de la tubería

Ei: Energía total al inicio de la tubería

L: Perdidas de energía a lo largo de la tubería (m)

3.7.9 Ecuación de fugas.¹⁹ Investigaciones actuales a nivel mundial, muestran que el caudal de las fugas técnicas en la red se comporta potencialmente con respecto a la presión. Las fugas se modelan entonces como emisores de riego. Estos son elementos que emiten un caudal dependiente de la presión.

$$Q_f = C_f * P^{ef}$$

Ecuación 9. Ecuación de Fugas

Qf: El caudal de una fuga (l/s)

P: La presión en ese punto (m)

ef.: Exponente de fuga (que depende de la forma de la falla). Varía entre 0.5 y 2.5 (l/(s.m^{0.5}))

Cf: Coeficiente de fuga (que depende del tamaño de la falla) (m)

3.8 CALIBRACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE REDES DE AGUA POTABLE²⁰

Cuando se encuentran en funcionamiento las redes de distribución, es difícil estimar las variables, debido a que las propiedades de los materiales, han variado a lo largo de su uso, por lo tanto mediante modelos hidráulicos se busca representar correctamente el funcionamiento en campo de la red. Este proceso es llamado calibración y se realiza para que pueda ser usado en la toma de decisiones, mantenimiento y prevención.

¹⁹ Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003. Daniel Eduardo Salas Useche

²⁰ Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003. Daniel Eduardo Salas Useche

Los variables que intervienen en el proceso de calibración son:

3.8.1 Variables Hidráulicas. Llamada así porque representa la cantidad de agua, que circula en la red, puede ser originada por:

3.8.1.1 Demandas Desconocidas. Representan los problemas de tipo comercial, asociados a conexiones ilegales, descalibración en micro medidores, errores en mediciones o falta de ellos.

3.8.1.2 Emisores. En la modelación hidráulica son consideradas como fugas, el caudal que es arrojado a la atmosfera es función de la presión.

3.8.2 Variables Topológicas. Son aquellas características físicas que intervienen en la dirección y velocidad de flujo. Entre ellas encontramos: diámetros, rugosidad y pérdidas menores.

3.9 DISEÑO METODOLÓGICO

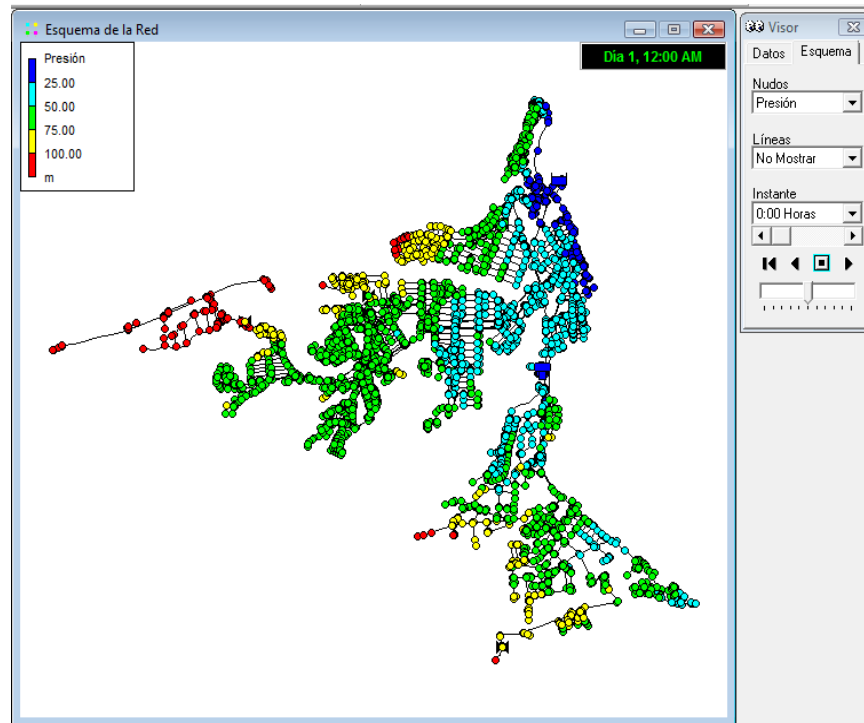
3.9.1 EPANET 2.0. ²¹EPANET es un programa que sirve para analizar el comportamiento hidráulico en la red de distribución de agua. El programa simula el comportamiento hidráulico en periodos prolongados. Una red puede estar constituida por tuberías, nodos, bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses. EPANET 2.0 realiza un seguimiento de los caudales en las tuberías, las presiones en los nodos, los niveles en los tanques, a lo largo del periodo de simulación discretizado en múltiples intervalos de tiempo.

EPANET 2.0 permite la edición de los datos de entrada a la red y brinda resultados en diferentes formatos, entre éstos se incluyen mapas de la red

²¹ EPANET 2, Manual de Usuario en Español, traducido por Fernando Martínez Alzamora, Universidad Politécnica de Valencia, España.

codificados por colores, tablas numéricas, gráficas de evolución y mapas de isolíneas.

Figura 12. Interfaz gráfica del distrito en Epanet 2.0



Con este programa se importó el trazado de las tuberías de la red desde un fichero de texto. La red se describe con los identificativos ID de los nodos, junto con sus coordenadas, y los identificativos ID de las líneas, junto con los ID de sus nodos extremos correspondientes. Los elementos tales como depósitos se importan como nodos y las bombas y válvulas, se importan como tuberías.

Al ejecutar una simulación hidráulica EPANET emite mensajes de Error y de Advertencia si surge algún problema durante la simulación del modelo hidráulico, ya sea porque la red se encuentra desconectada, por la existencia de presiones negativas, etc.

Como se dijo anteriormente los resultados del esquema se diferencian a partir de colores que se utilizan para fijar los rangos numéricos con que se visualizará una determinada magnitud sobre el esquema de la red. Los resultados del análisis y ciertos parámetros de diseño, también pueden visualizarse utilizando diferentes tipos de gráficas como curvas de evolución, perfiles longitudinales, balances de caudal, etc.²²

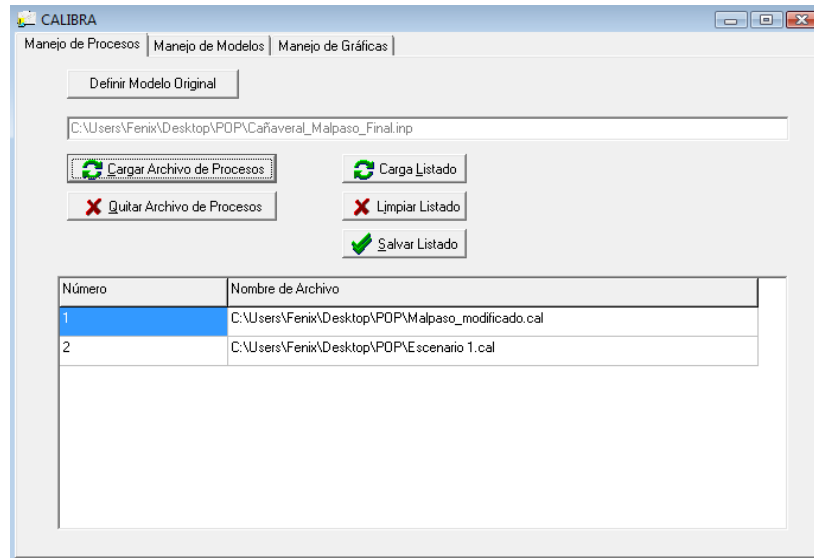
3.9.2 Calibra.²³ Es un programa desarrollado por el centro de investigación CIACUA de la Universidad de los Andes de Colombia que facilita el proceso de calibración por ensayo y error de modelos de tuberías a presión. Con el software se crean escenarios en los que se generan distintas hipótesis que son aplicadas al modelo para después compararlos entre sí con los datos de medición de campo, tanto de caudal como de energía, mediante una poderosa interfaz gráfica que contiene una serie de útiles herramientas estadísticas.

La creación del programa surge por la necesidad de optimizar el proceso de calibración y que la red de distribución trabaje de la mejor manera en un adecuado Plano Óptimo de presiones.

²² EPANET 2, Manual de Usuario en Español, traducido por Fernando Martínez Alzamora, Universidad Politécnica de Valencia, España.

²³ CALIBRA 2006, Manual de Usuario, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados, Universidad de los Andes, Colombia.

Figura 13. Interfaz de Calibra



4. METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL PLANO ÓPTIMO DE PRESIONES

Con esta metodología se busca obtener los menores valores de presiones en puntos estratégicos, es decir, a la entrada de diferentes sectores del distrito disminuyendo las pérdidas de agua generadas por fugas y conexiones clandestinas y garantizando un buen servicio a los usuarios.

4.2.1 Ubicación de las estaciones reguladoras de presión. Para reducir la presión del sistema se deben instalar unos dispositivos conocidos como válvulas reguladoras de presión, estas se encuentran ubicadas en la entrada de sectores que presentan valores de presión superiores a 50 m.c.a. La ubicación, descripción y funcionamiento de estas válvulas se encuentra en el numeral 4.1.2.3.

4.2.2 Macromediciones. Aquí encontraremos los datos de caudales suministrados por los tanques de almacenamiento a la red. Estos datos fueron tomados por equipos electrónicos que realizan lecturas de caudales con gran precisión y en cortos intervalos de tiempo.

4.2.3 Micromediciones. Durante este proceso se recolecta el registro de caudal realizado por los medidores ubicados a la entrada de los predios de cada suscriptor, con este registro se obtiene el caudal facturado. (Se toma del valor de la facturación)

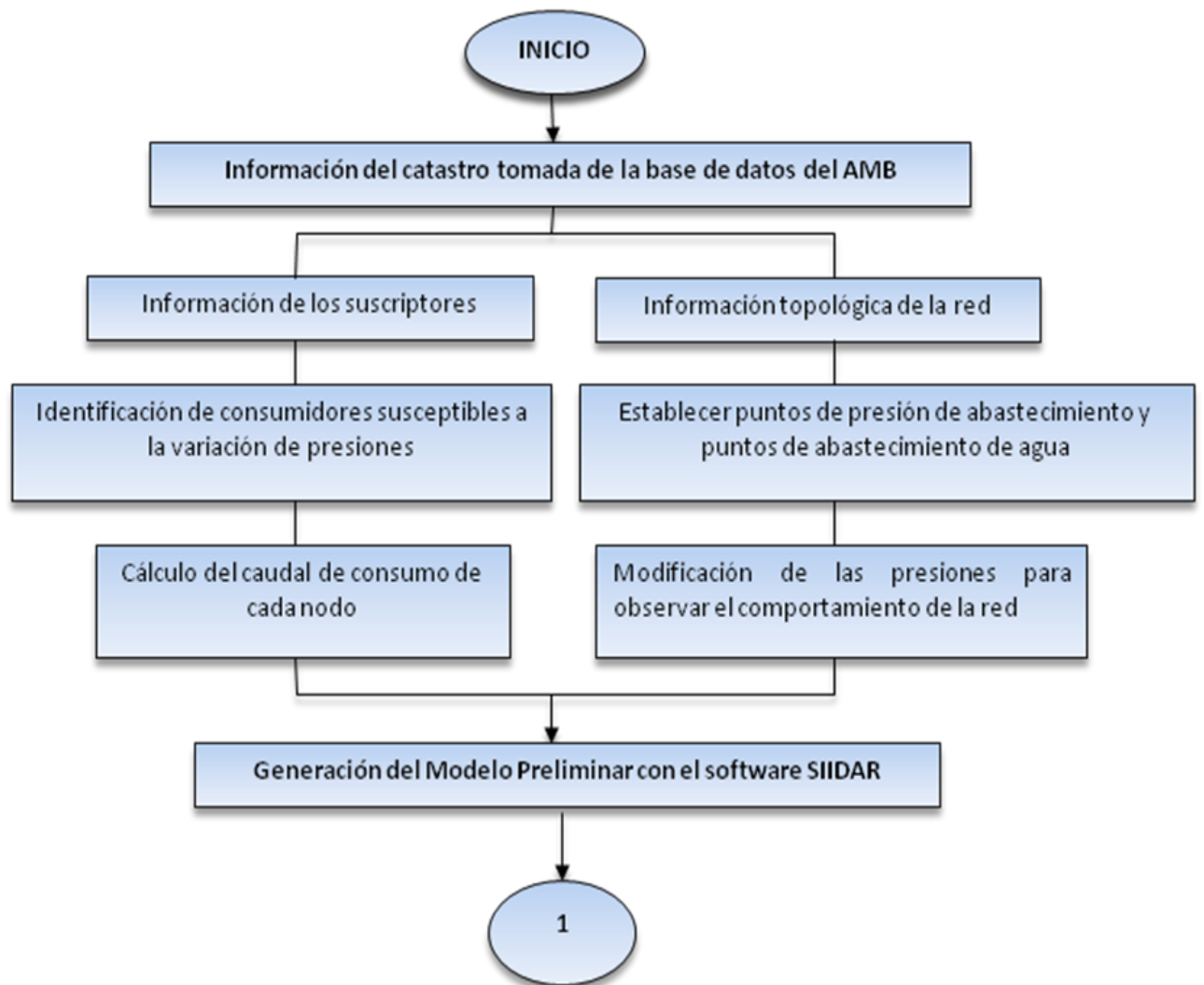
4.2.4 Mediciones de Presión. Las mediciones de presión en la red nos muestran la distribución de la energía a lo largo del día. Para esta toma se instalaron equipos electrónicos que miden la presión en tiempos cortos y con gran precisión. El medidor registró diferentes series diarias, las cuales fueron promediadas y tomadas para realizar el análisis.

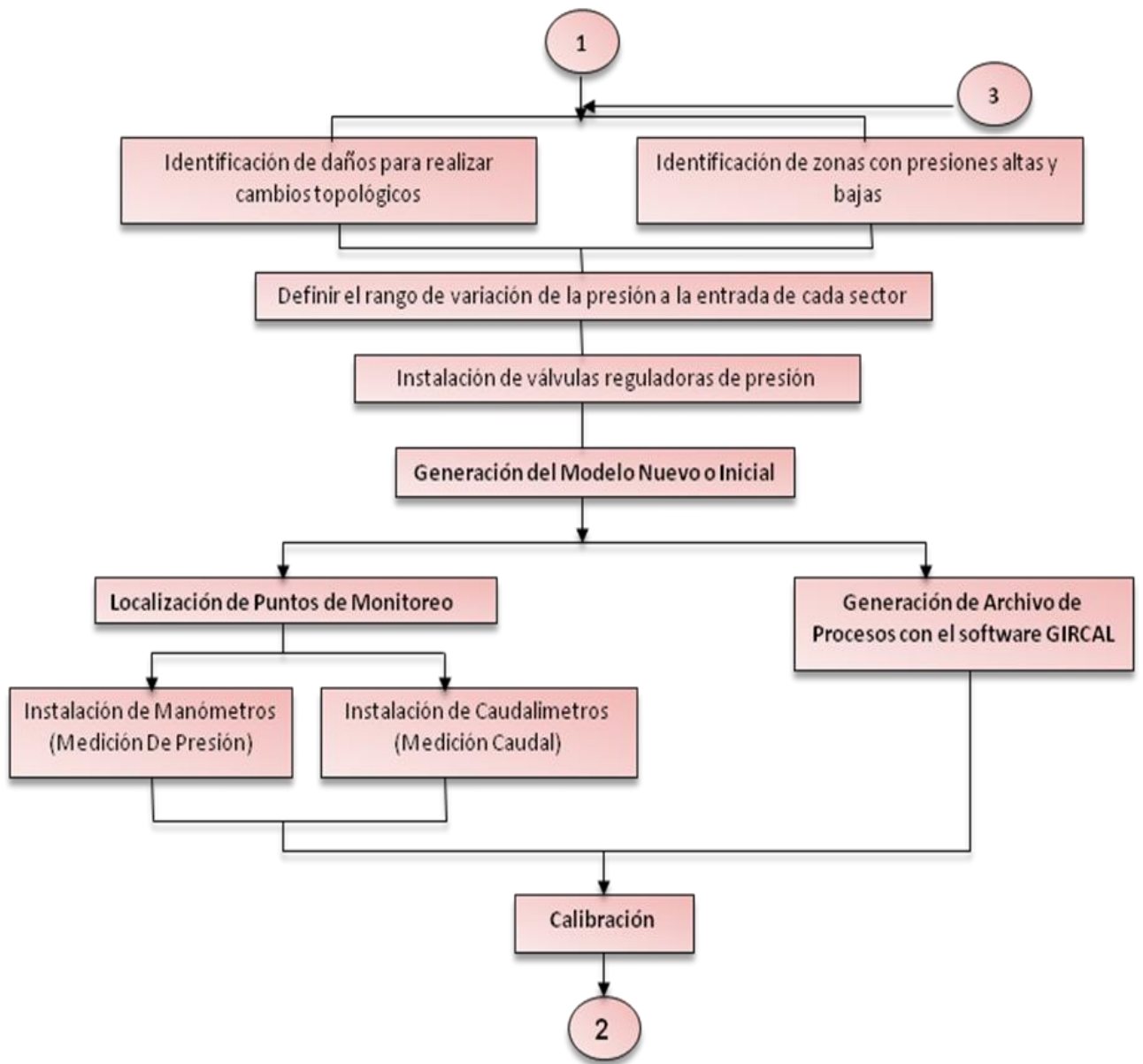
4.2.5 Índice de agua no contabilizada. Al obtener la información de la macro medición y la micro medición, podemos analizar la cantidad de agua que ingreso al distrito y la cantidad de agua consumida por los usuarios, con esto se puede conocer la cantidad de agua que no está siendo registrada.

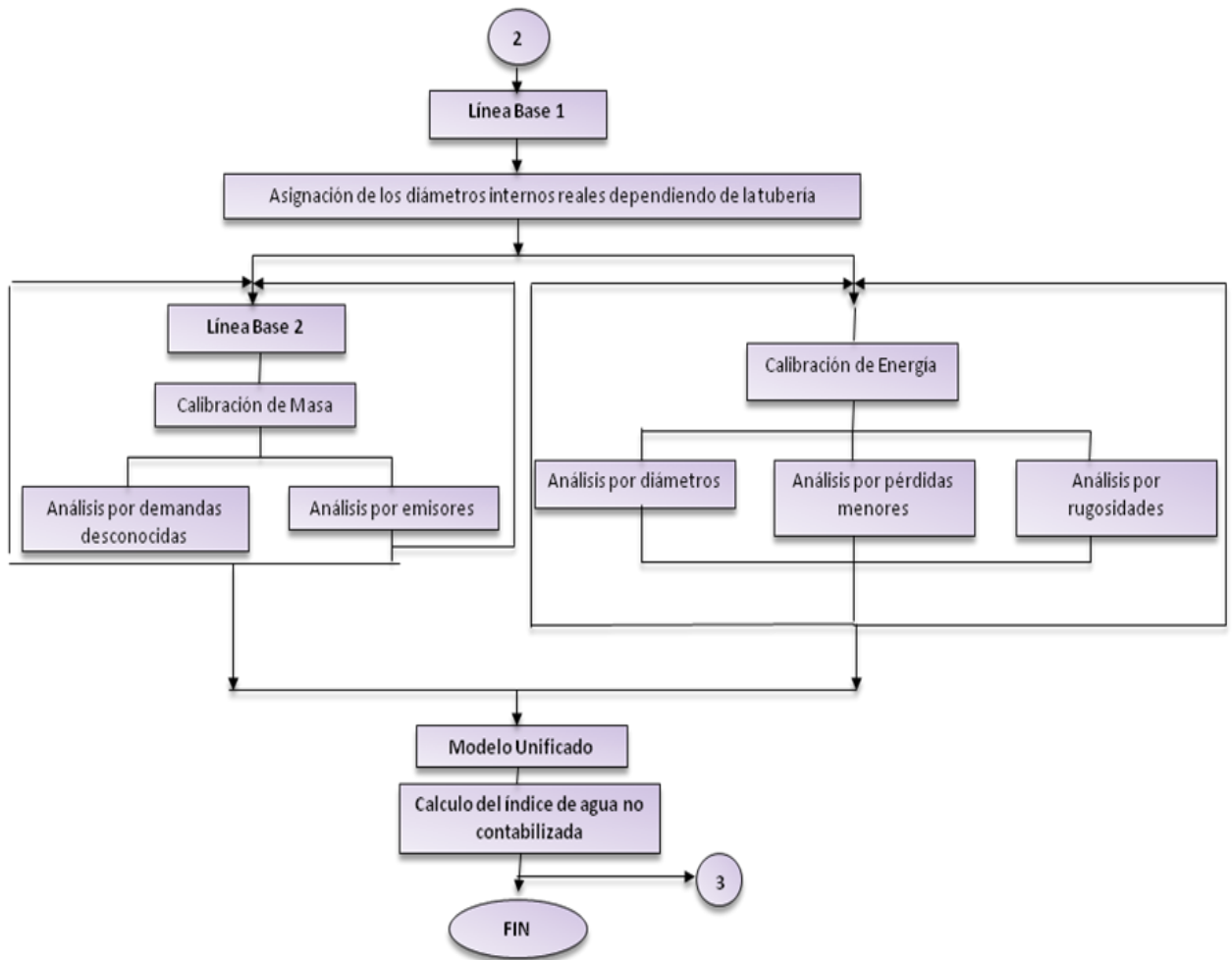
4.2.6 Calibración. El objetivo de tener un modelo calibrado de la red es el de tener una herramienta que permita probar confiablemente otros escenarios de presión diferentes a los probados durante las etapas de recolección de datos en campo, con el fin de escoger realmente cual es la presión optima a la entrada de la red.

Para realizar el proceso de calibración de la red del distrito es necesario seguir una metodología que incluya todos los pasos necesarios para la obtención de buenos resultados, la metodología utilizada se expresa en el siguiente diagrama de flujo.

Figura 14. Diagrama de flujo de metodología empleada.







4.2.6.1 Parámetros de calibración

- **Escenarios:** Corresponde al escenario del subconjunto de datos, que caracterizan las condiciones actuales de la red y bajo los cuales se está analizando. Entre la categoría de datos que la componen tenemos: Diámetros de la tubería, Coeficiente de rugosidad del material y el coeficiente de pérdidas menores.

- **Diámetros:** El diámetro interno de las tuberías puede llegar a variar con el paso del tiempo, debido a factores como incrustaciones y sedimentos que afectan su adecuado funcionamiento.

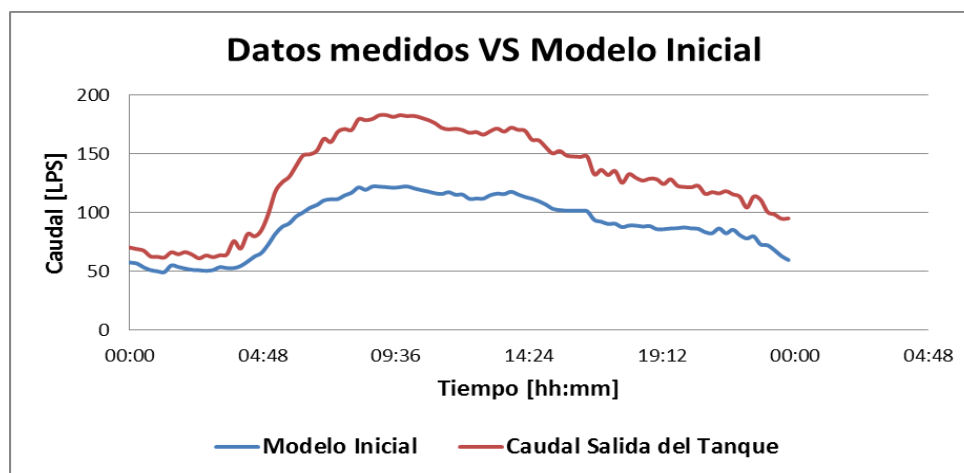
La determinación de los diámetros correctos es una tarea compleja debido al gran tamaño de la red, las tuberías se encuentran cubiertas y el cambio continuo del diámetro a lo largo del tiempo; de tal forma es necesario estimar su valor a través del proceso de calibración.

- **Rugosidad:** Representa las irregularidades presentes en las tuberías las cuales favorecen las pérdidas de energía. Estas irregularidades dependen del tipo de material por lo tanto se establece un valor promedio que simule el comportamiento del fluido en el interior de la red. El diámetro de las tuberías puede variar a lo largo del tiempo lo que hace modificar el coeficiente de calibración de las mismas, por lo tanto el proceso de calibración para estimar el valor de las misma en las redes de distribución de agua potable.

4.3 MODELO INICIAL

El modelo inicial de la red de distribución de agua potable del distrito Malpaso Cañaveral, fue suministrado por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga, empresa que posee en su base de datos la topología, catastro, topografía, curvas de demanda y demás variables hidráulicas necesarios para la creación del modelo del presente distrito.

Figura 15. Caudal de salida medido y sin calibrar distrito Porvenir

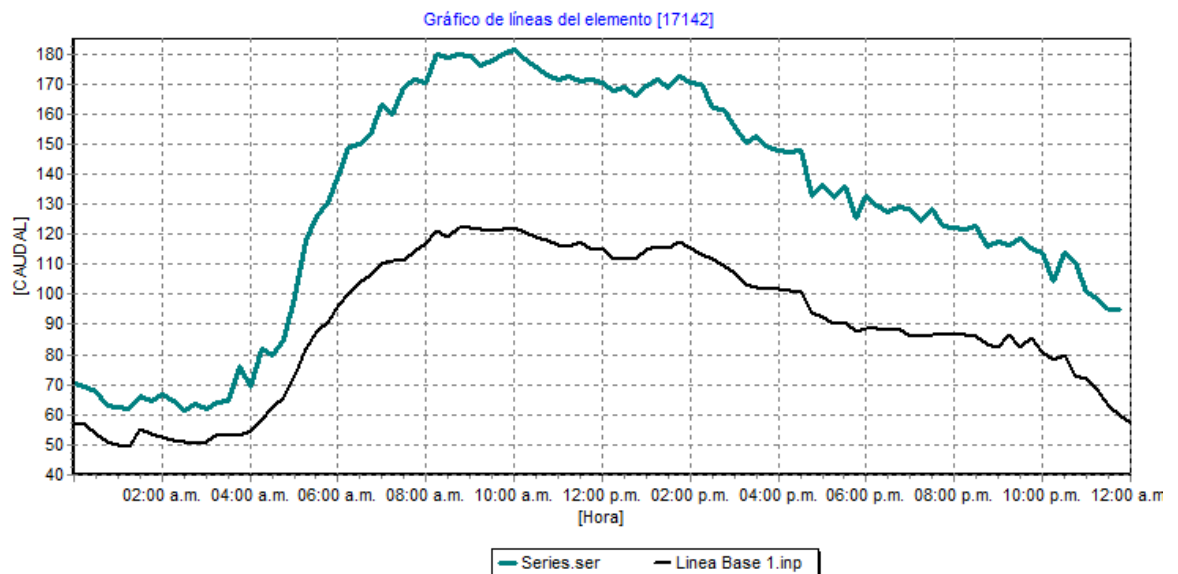


4.4 LÍNEA BASE 1

Parte del modelo base, sin hacer escenarios de calibración, se realiza la asignación de los diámetros internos reales de acuerdo al material.

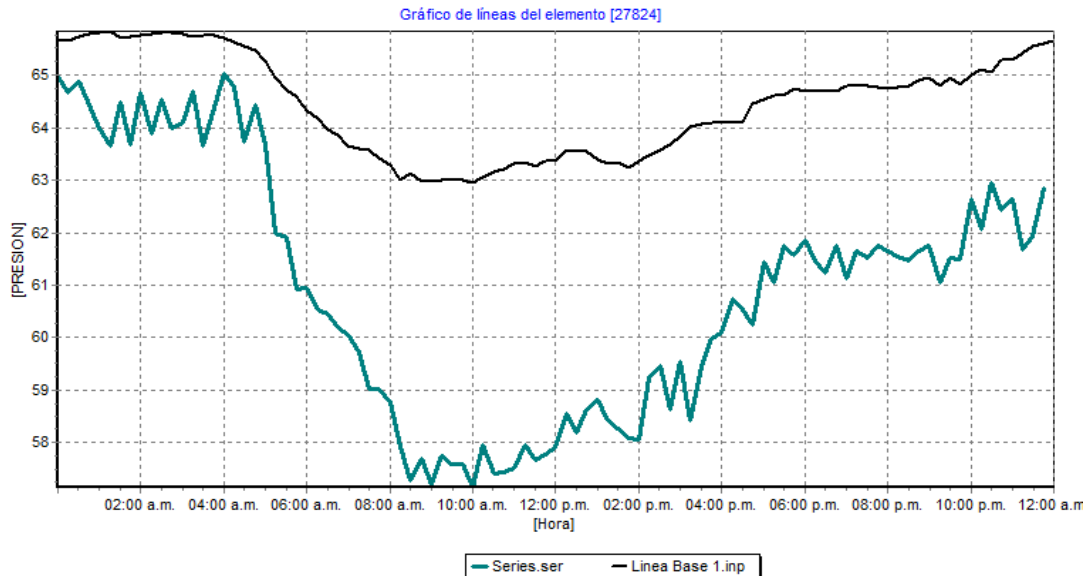
A continuación se presenta el ajuste del modelo asignando la Línea Base 1 a la red de distribución de agua potable al distrito Malpaso Cañaveral, el ajuste no modifico de manera significativa la serie simulada. Este primer ajuste se logra a través de la asignación de diámetros reales, se puede concluir que estas variables son pocas significativas para el ajuste del modelo del distrito Malpaso Cañaveral.

Figura 16. Comportamiento del punto de medición del caudal de salida del distrito de porvenir en la Línea Base 1



Se debe tener en cuenta que el modelo en esta instancia no tiene en cuenta la presencia de emisores los cuales si se relacionan directamente de la energía de la red.

Figura 17. Comportamiento del punto de presión 27824 en la Línea Base 1



Considerando a los nodos de medición de presión, en los cuales las modificaciones incluidas por La línea Base 1 se esperaba que tuviese un efecto directo. No existe ninguna diferencia entre las gráficas del modelo Línea Base 1 (Figura 15) y las del modelo sin calibrar (Figuras 16 y 17).

El proceso de calibración del modelo hidráulico de la red de distribución se realiza comparando las mediciones hechas de caudal y presión, estas son medidas en diferentes nodos y tuberías de la red de distribución de agua potable del distrito Malpaso Cañaveral.

4.4.1 Análisis por Demandas. La demanda está relacionada con los nodos del modelo y representa el consumo de los usuarios. La demanda es representada mediante una curva de modulación, así se puede conocer el consumo a lo largo del día, como curva de modulación se escogió el caudal de salida del barrio Provenza. El caudal asignado a los nodos proviene del facturado por la empresa a cada usuario. Se pretende determinar el agua pérdida por conexiones clandestinas y por contadores defectuosos.

Se establece un valor base y una curva de modulación de demanda que corresponde a la misma red del distrito, que permite conocer sus variaciones a lo largo del día. El caudal asignado a los nodos proviene del facturado por la empresa a cada usuario y de la micromedición realizadas dentro del proyecto. El análisis por demanda busca determinar el agua perdida por conexiones clandestinas y por contadores defectuosos, ya que presentan el mismo comportamiento de la curva de modulación del consumo de los usuarios.

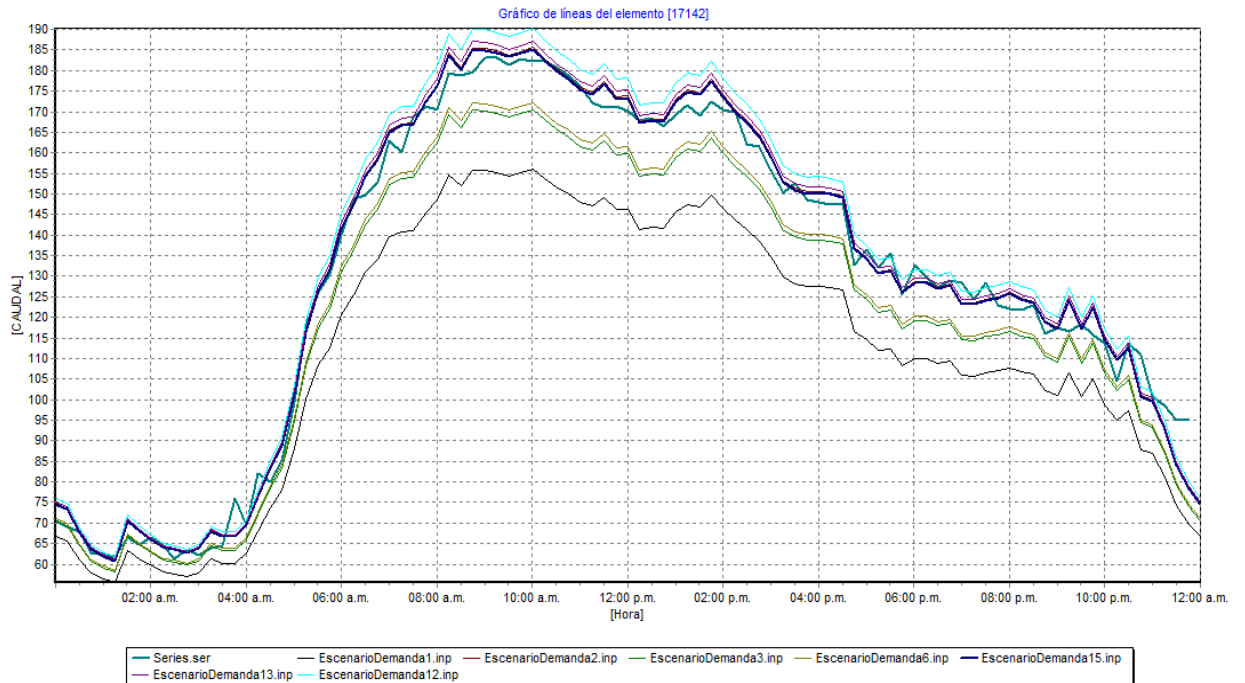
El análisis por demanda se basa en criterios hidráulicos, socioeconómicos y topológicos, y trata de manera independiente las demandas de los diferentes estratos socioeconómicos y al uso correspondiente, esto se hace con el objetivo de diferenciar el comportamiento de la demanda propia de cada tipo de suscriptor y generar una gran cantidad de escenarios a través de los cuales buscar una amplia variedad de posibles soluciones posibles. Los multiplicadores más representativos utilizados en la generación de escenarios para la red de distribución del distrito se pueden ver en la Tabla 12.

Tabla 12. Factores multiplicadores de la demanda utilizados en los distintos estratos durante los escenarios de calibración propuestos en el análisis inicial por demandas de la red de distribución

Escenarios	Factor Multiplicador de la Demanda					
	Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4	Estrato 5	Estrato 6
Demanda 1	2	1.8	1.7	1.5	1.3	1
Demanda 2	2.8	2.5	2.3	2	1.5	1
Demanda 3	2.6	2.6	2	1.5	1.5	1
Demanda 4	3	2.5	2.5	2	1.5	1
Demanda 5	2.4	2	2	1.8	1.4	1
Demanda 6	2.4	2.2	2	1.8	1.8	1
demanda 7	1.1	1.05	1.04	1.02	1.01	1
Demanda 8	1.05	1.05	2.1	1.02	1.03	1.04
Demanda 9	3.5	3.4	3.3	2	1.8	1.5
Demanda 10	3.1	3	2.8	2	1.5	1
Demanda 11	3	2.8	2.7	2	1.5	1
Demanda 12	2.8	2.6	2.5	2	1.5	1
Demanda 13	2.7	2.5	2.4	2	1.5	1
Demanda 14	2.7	2.6	2.3	2	1.5	1
Demanda 15	2.7	2.5	2.3	2	1.5	1

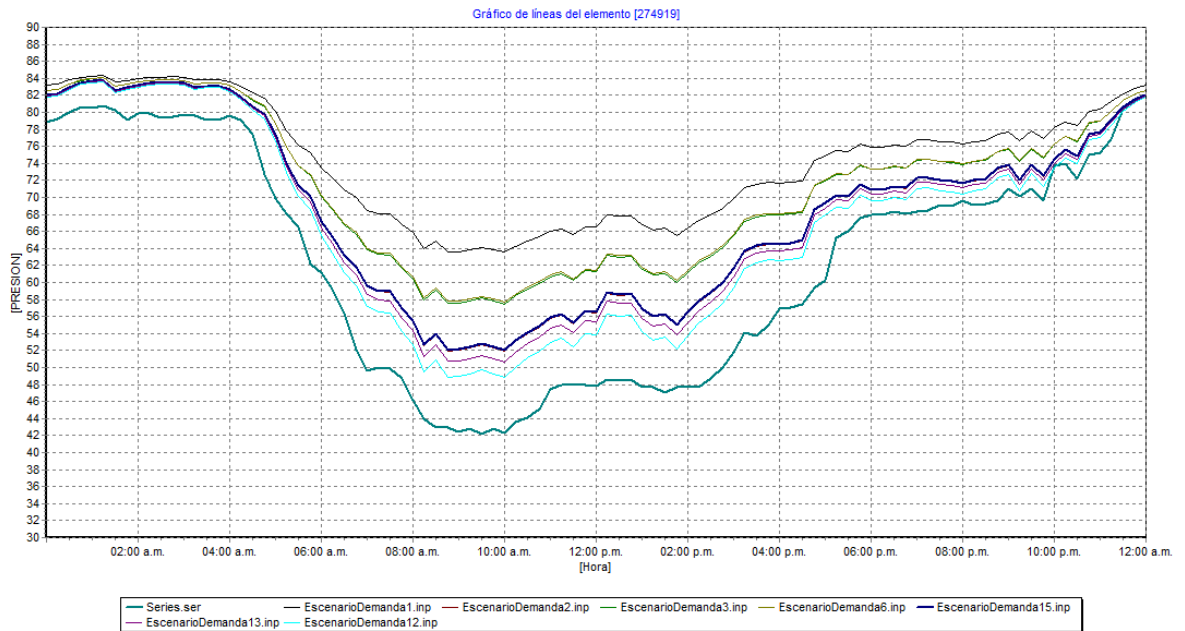
Resultados de los factores multiplicadores de la demanda:

Figura 18. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito porvenir en el análisis por demandas



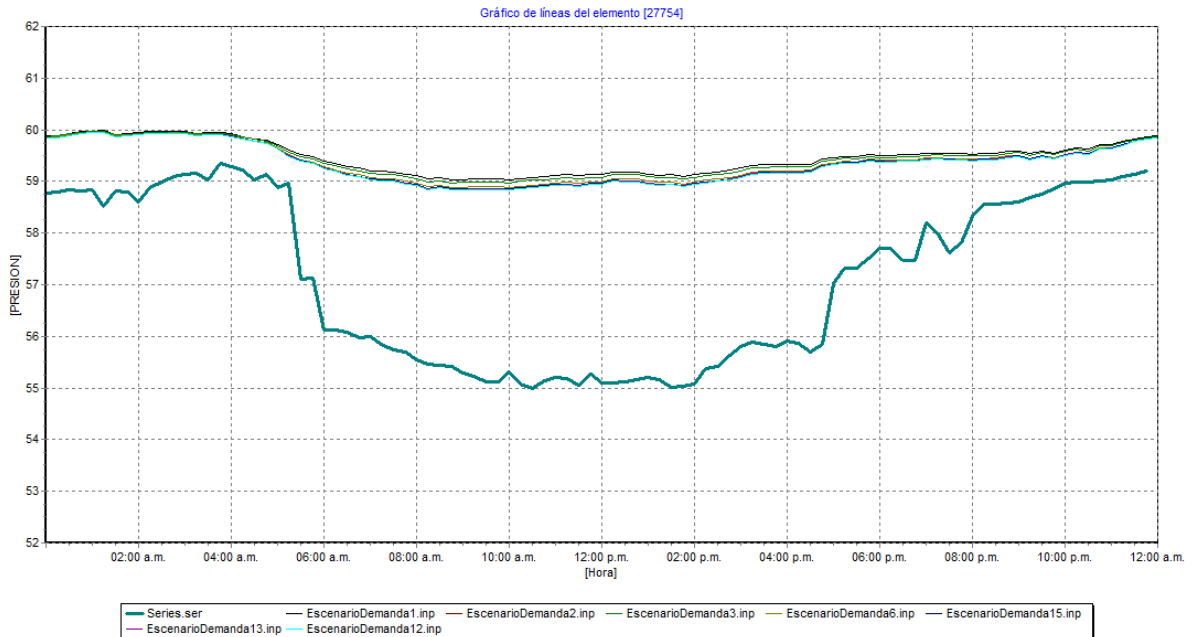
En la figura 18, se observa los aumentos propuestos a lo largo de los distintos escenarios, presentan significativamente el ascenso de la curva modelada con respecto a los valores medidos, siendo el escenario Demanda 15 a través del cual se alcanza un ajuste ideal de la masa.

Figura 19. Comportamiento del punto de medición de presión 274919 de la red del distrito en el análisis por demandas



El punto de medición de presión 274919 de la red de distribución del distrito Malpaso Cañaveral durante el análisis por demandas (Figura 19), presenta un comportamiento significativo en su desempeño a lo largo de todo el día para todos los escenarios generados, siendo el escenario Demanda 15 el que mejor se ajusta. Lo anterior obedece al hecho que dichos escenarios representan un estado de demanda alta (Los multiplicadores más representativos utilizados en la generación de escenarios de calibración para la red del distrito se pueden ver en la Tabla 12), por lo tanto se presenta un aumento en el flujo de todas las tuberías y por ende una disminución en la energía disponible en toda la red.

Figura 20. Comportamiento del punto de medición de presión 27754 de la red del distrito en el análisis por demandas



En el punto de medición de presión 27754 de Cañaverál, se observa que la diferencia de presión por demanda es pequeña, se hace mención que en el distrito Estadio, con el estudio hecho allí se presentó mayor probabilidad de que existieran fraudes en los estratos más bajos.²⁴

En el barrio Ciudad Venecia se observa una disminución significativa de presión en horas de alto consumo, con el escenario creado los coeficientes asignados de demanda para los estratos 2 y 3 viene siendo mayor, se presume que este bajonazo de presión pueden ser ocasionado por obstrucciones o cierres de válvulas.

²⁴ Metodología para la definición del plano óptimo de presiones y reducción del índice de agua no contabilizada. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Centro de investigación en acueductos y alcantarillados, CIAUA. Universidad de los Andes. Bogotá, Octubre 2006.

Figura 21. Comportamiento del punto de medición de presión 27624 de la red del distrito en el análisis por demandas

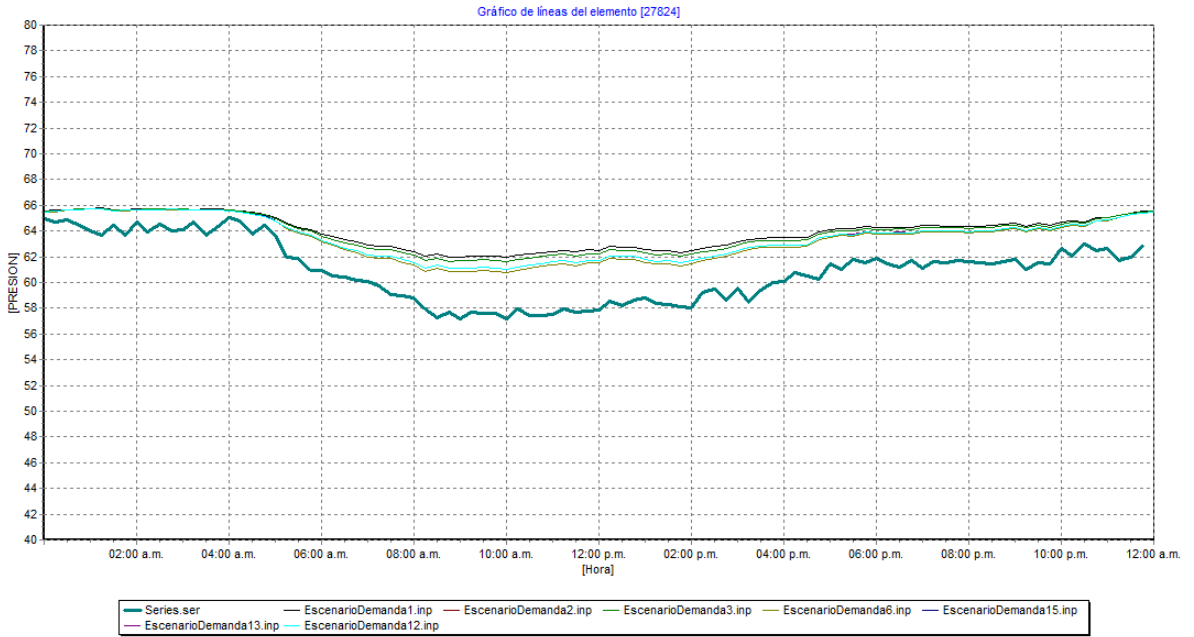


Figura 22. Comportamiento del punto de medición de presión 25678 de la red del distrito en el análisis por demandas

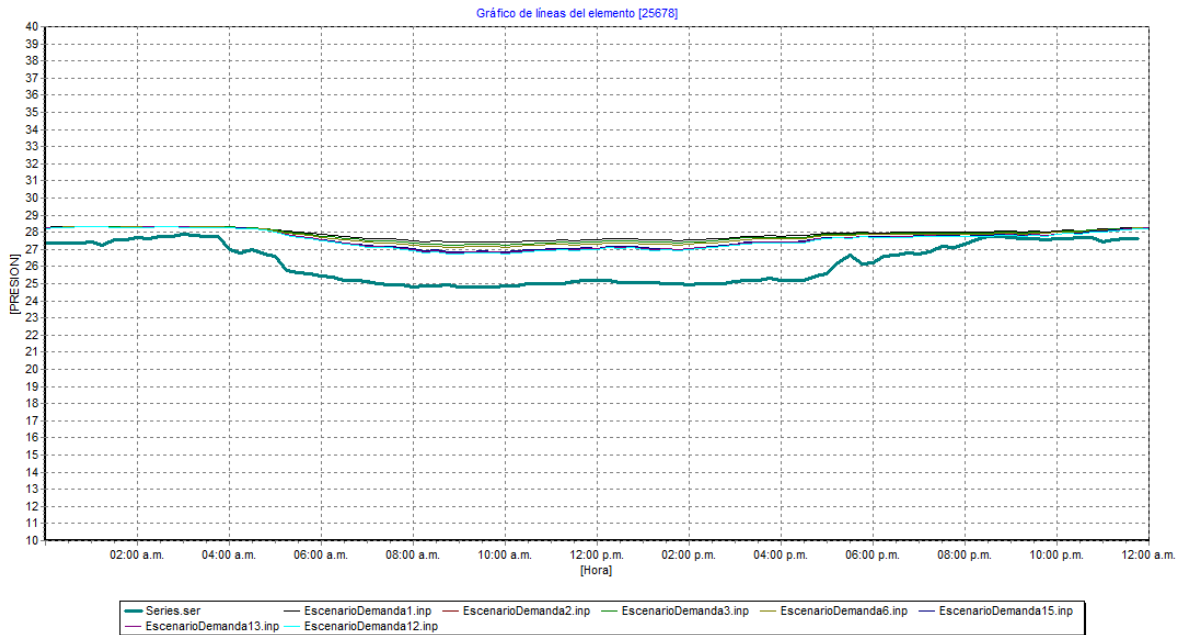
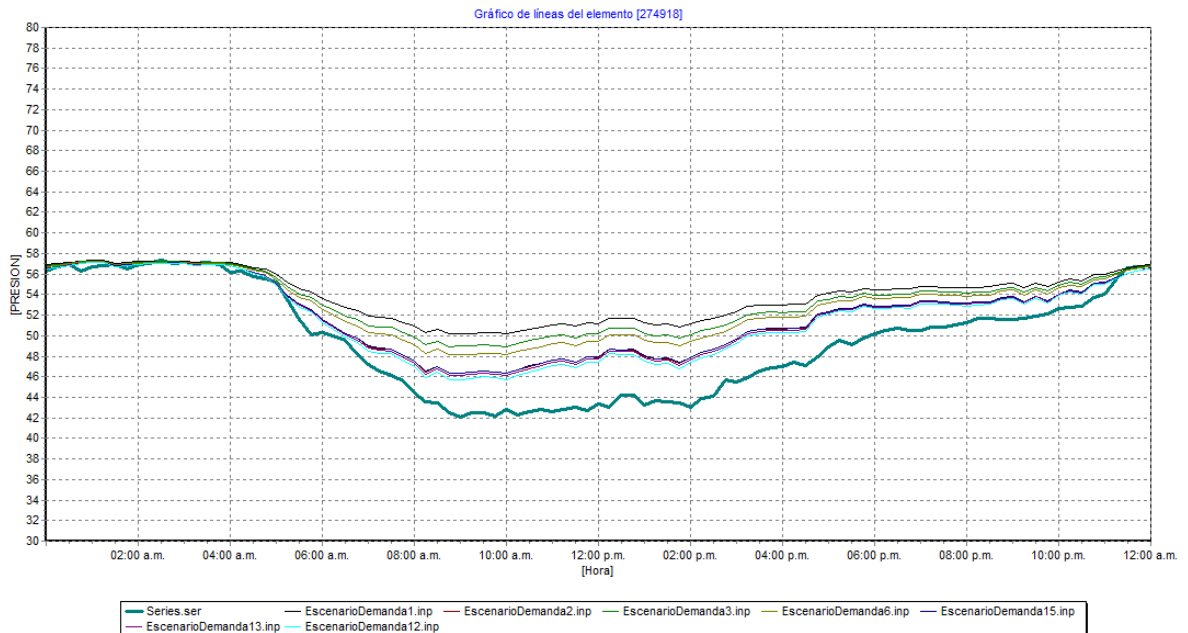


Figura 23. Comportamiento del punto de medición de presión 274918 de la red del distrito en el análisis por demandas



De esta forma el escenario que presenta buenos resultados arrojados es el escenario Demanda 15, del cual se logró balancear la cantidad de masa que entra al sistema y fue el escenario escogido en el análisis de masa por demandas.

4.4.2 Análisis por Emisores. En la modelación hidráulica las fugas son consideradas como emisores, estos se definen como dispositivos asociados a los nodos de la red que permiten modelar el flujo de la salida a través de una tubería. En el proceso de calibración se determinan los valores aproximados del coeficiente del emisor para simular las fugas en la red, de acuerdo con su hidráulica.

El análisis de los emisores en la red de distribución del distrito Malpaso Cañaverál se hizo con base teniendo en cuenta varios factores, entre estos el rango de presiones, el material y el estrato socioeconómico.

Tabla 13. Análisis por emisores

Escenario	PRESIÓN		MULTIPLICADOR ESTRATO						MULTIPLICADOR MATERIAL			MULTIPLICAR DIÁMETRO		
	Alta	Baja	1	2	3	4	5	6	AC	PVC	HG	<50	50-100	>100
Emisores 1	0.0001	0.00003	1.7	1.5	1	1	1	1	1.5	1.3	1	1.5	1.6	1.7
Emisores 2	0.03	0.003	3.6	2	2.1	1.1	1	1	2.6	1.1	1.01	1.3	2.1	2.1
Emisores 3	0.0002	0.00005	2	1.25	1	1	1	1	1.5	1.3	1.1	1.1	1.5	1.7
Emisores 4	0.02	0.0015	4	2.8	1.7	1.1	1	1	1.7	1.2	1	1.15	1.8	1.9
Emisores 5	0.015	0.0025	1.3	1.2	1.1	1	1	1	2	1.7	1	1.3	2	2.1
Emisores6	0.03	0.003	3.8	2.4	2.2	2.1	1.5	1	2.6	1.1	1.01	1.3	2.1	2.1

Para la creación de los siguientes escenarios de calibración por emisores, se inicializaron los nodos mencionados escogidos de acuerdo al rango de presiones en toda la red de distribución y así determinar los coeficientes aproximados para simular las posibles fugas originadas, los nodos seleccionados dentro de la red de distribución con sus respectivos coeficientes se presentan a continuación:

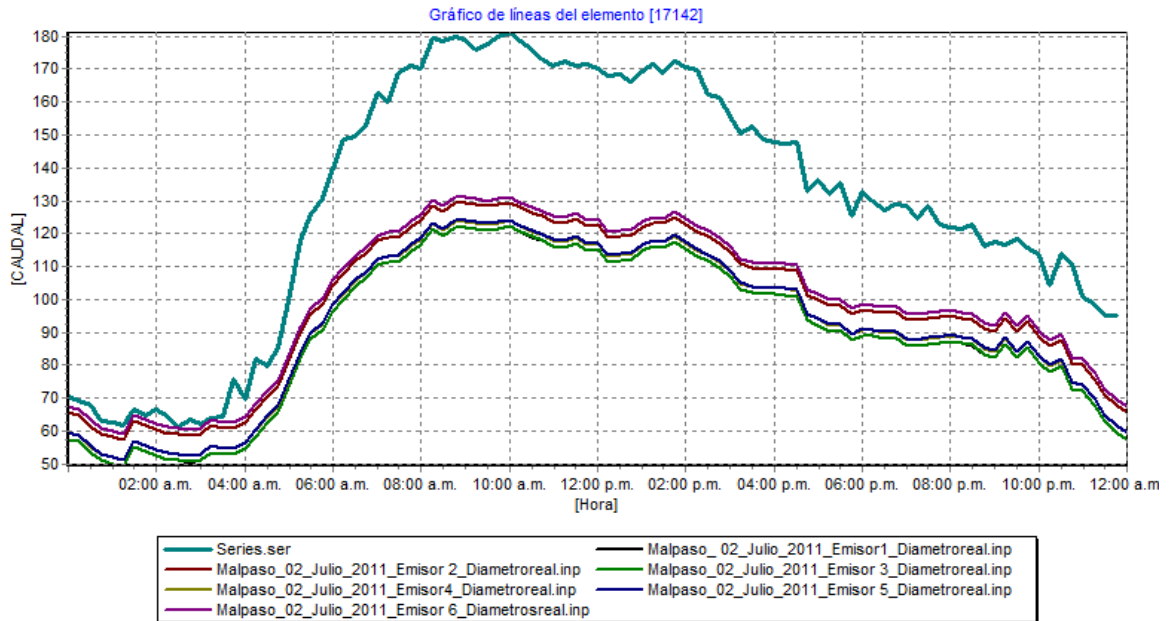
Tabla 14. Coeficientes de Escenarios por emisores.

Nodo	Escenarios					
	Emisor 1	Emisor 2	Emisor 3	Emisor 4	Emisor 5	Emisor 6
28597	0.000225	0.3276	0.0006375	0.18088	0.0756	0.39312
28242	0.000225	0.3276	0.0006375	0.18088	0.0756	0.39312
28598	0.000225	0.3276	0.0006375	0.18088	0.0756	0.39312
28577	0.00013	0.14553	0.00033	0.0612	0.033	0.15246
29327	0.000221	0.24948	0.00066	0.144	0.039	0.26334
26677	0.000221	0.24948	0.00066	0.144	0.039	0.26334
29281	0.000039	0.014553	0.0000825	0.00459	0.0055	0.015246
25776	0.00003	0.007623	0.0000935	0.003135	0.00525	0.014553
25764	0.0000585	0.0043329	0.0000715	0.002277	0.005525	0.0082719
25677	0.00003	0.007623	0.0000935	0.003135	0.00525	0.014553
63348	0.0000663	0.024948	0.000165	0.0108	0.0065	0.026334
63371	0.0000585	0.01386	0.00010313	0.00756	0.006	0.016632
19479	0.000221	0.24948	0.00066	0.144	0.039	0.26334
26948	0.000039	0.014553	0.0000825	0.00459	0.0055	0.015246
26725	0.0000585	0.034398	0.0001125	0.007803	0.011	0.036036
26993	0.0000585	0.034398	0.0001125	0.007803	0.011	0.036036
28466	0.000039	0.014553	0.0000825	0.00459	0.0055	0.015246
26325	0.00013	0.14553	0.00033	0.0612	0.033	0.15246
26746	0.00013	0.14553	0.00033	0.0612	0.033	0.15246
26680	0.00017	0.24948	0.000748	0.152	0.04095	0.26334
57855	0.00015	0.04719	0.000242	0.0253	0.0195	0.09009
28072	0.000045	0.018018	0.0001275	0.0053295	0.0105	0.034398
27619	0.000221	0.24948	0.00066	0.144	0.039	0.26334
27755	0.000045	0.034398	0.0001275	0.0082365	0.01155	0.036036
274164	0.00003	0.00693	0.0000935	0.00285	0.00525	0.010395
27836	0.0000585	0.01638	0.0001125	0.00459	0.01	0.02457
27739	0.000195	0.1638	0.00045	0.0612	0.06	0.1638
27595	0.000195	0.1638	0.00045	0.0612	0.06	0.1638
29436	0.00013	0.0693	0.00033	0.036	0.03	0.0693
58338	0.0001	0.0693	0.000374	0.038	0.0315	0.10395
27834	0.000195	0.1638	0.00045	0.0612	0.06	0.2457
19483	0.000255	0.15444	0.000484	0.092	0.02535	0.16302
63357	0.0000585	0.01386	0.00010313	0.00756	0.006	0.016632
67562	0.00003	0.007623	0.0000935	0.003135	0.00525	0.014553
26343	0.00013	0.07623	0.00033	0.0396	0.03	0.14553
26344	0.000195	0.043329	0.000286	0.03036	0.03315	0.082719
26346	0.000195	0.043329	0.000286	0.03036	0.03315	0.082719
25741	0.0000585	0.018018	0.0001125	0.005049	0.01	0.034398

27160	0.000039	0.014553	0.0000825	0.00459	0.0055	0.015246
-------	----------	----------	-----------	---------	--------	----------

A continuación se presenta el comportamiento de los escenarios por los emisores

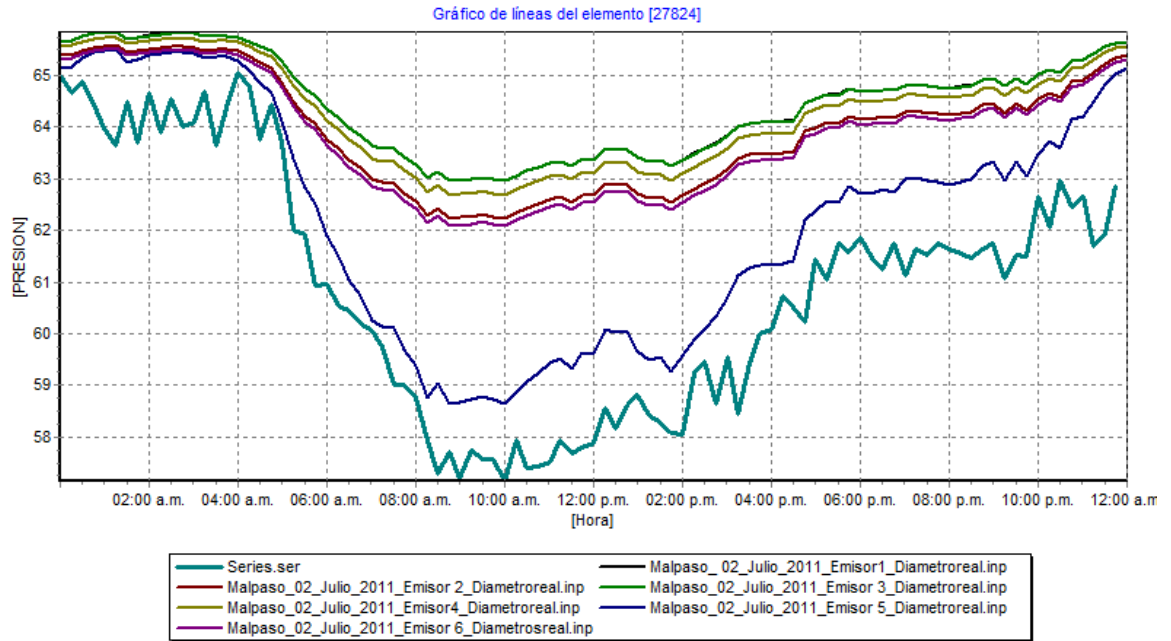
Figura 24. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito porvenir en el análisis por emisores



En la figura 24 se observa que el escenario Emisor 6 es el que mejor representa el comportamiento, ajustándose en las horas de bajo consumo para la curva de caudal de salida del distrito porvenir, pero no representa el caudal de descarga en las horas de alto consumo.

En el comportamiento del punto de medición de caudal se observa que la diferencia es más notable en horas de bajo consumo en comparación de la diferencia que se presenta en horas pico.

Figura 25. Comportamiento del punto de medición de presión del nodo 27824 en el análisis por emisores



En la Figura 25, se observa que el escenario Emisor 5 es el que mejor representa el comportamiento de las mediciones de presión.

En la construcción de la Línea Base 2 se tendrá en cuenta el escenario Emisor 5 ya que este escenario es el que mejor ajuste hace de las curvas de masa y al mismo tiempo mejora el comportamiento de las curvas de presión a la Línea Base1.

4.5 LÍNEA BASE 2

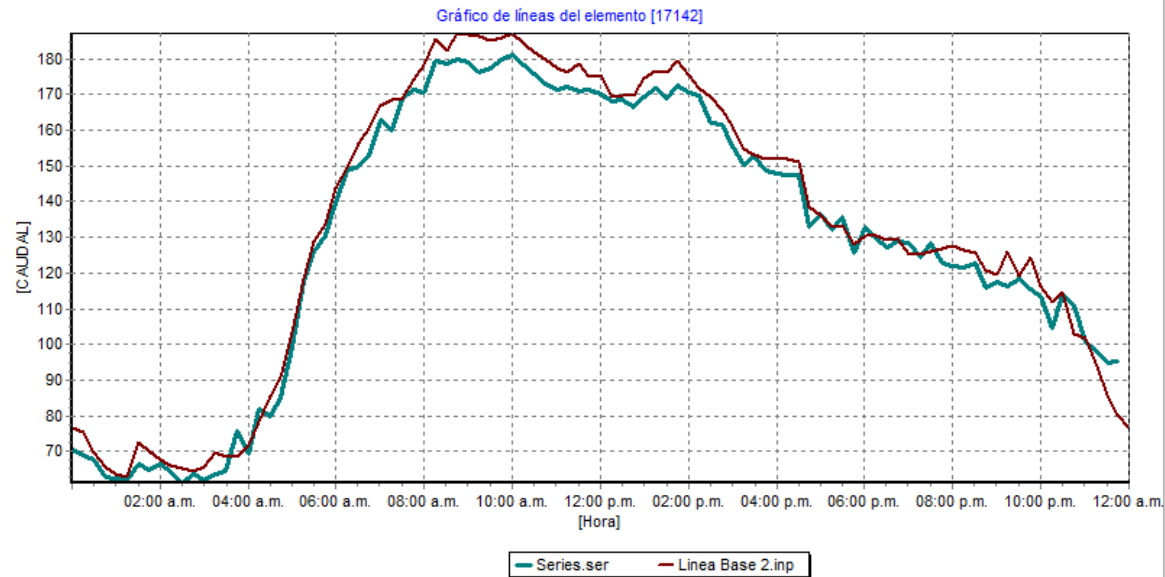
Es el escenario encargado de recopilar resultados obtenidos a través de los análisis independientes por demandas y emisores. Con la Línea Base 2 se busca ajustar de forma inmediata las curvas de masas y a la vez obtener una buena aproximación al comportamiento medido en relación a las curvas de energía.

Para la elaboración de la Línea Base 2 de la red de distribución del distrito Malpaso Cañaveral se toman los análisis propuestos por demandas, el cual fue el escenario Demanda 15, durante el cual se logró una mejora muy significativa en el comportamiento de los puntos de medición de presión en el escenario Demanda 15, al tiempo que ajustó de forma casi definitiva los puntos de medición de caudal. Con respecto al análisis por emisores, como ya se mencionó anteriormente el escenario que representa un buen comportamiento del sistema fue Emisores 5 el cual se muestra a continuación:

Tabla 15. Coeficientes de emisores en la conformación de la Línea base 2 de la red de distribución del distrito Malpaso Cañaveral.

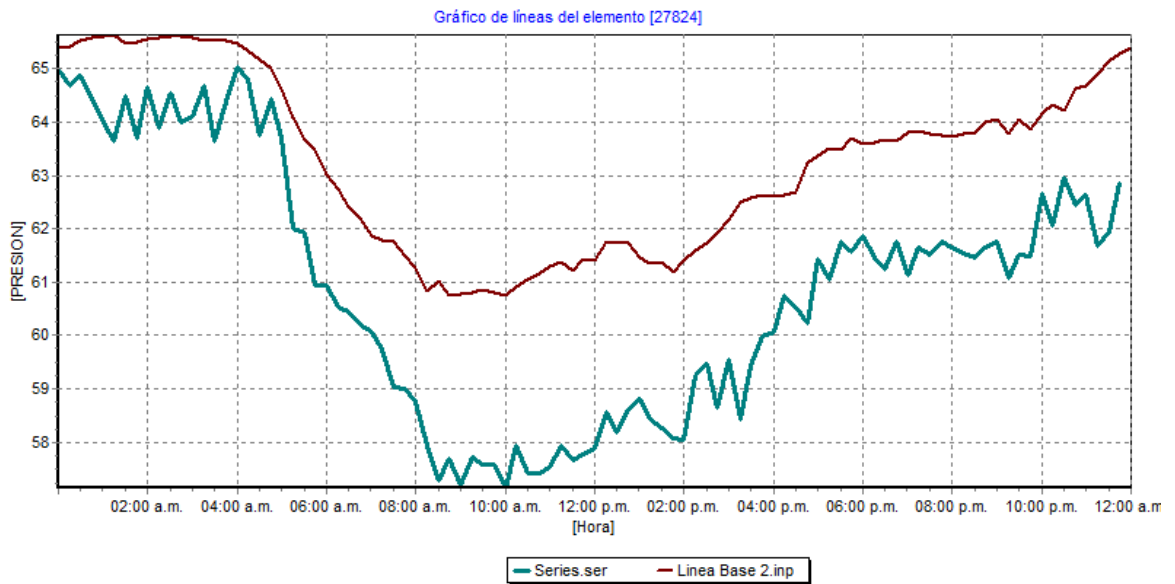
	Presión		multiplicar según estrato						multiplicador material			multiplicador diámetro		
	Alta	Baja	1	2	3	4	5	6	AC	PVC	HG	<50	50-100	>100
Emisores 5	0.015	0.0025	1.3	1.2	1.1	1	1	1	2	1.7	1	1.3	2	2.1

Figura 26. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito de porvenir en la Línea Base 2



En la Figura 26, se observa que al combinar los escenarios Demanda 15 y Emisor 5 simulados anteriormente, esto genera la curva de caudal de la Línea base 2 (Figura 26), el modelo tiene la capacidad de simular de manera correcta la cantidad de masa que ingresa al sistema de distribución de agua potable del distrito Malpaso Cañaverl.

Figura 27. Comportamiento del punto de medición de presión 27824 en Línea Base 2



Al comparar la curva obtenida para el punto de medición de presión durante la Línea Base 1 (Figura 17) con la de la Línea base 2 (Figura 27), se aprecia la mejoría que el análisis por demandas produjo, especialmente en las horas de bajo consumo en donde se redujo en 1 m.c.a y en las horas de mayor consumo se redujo alrededor de 3 m.c.a.

4.5.1 Análisis por Diámetros. Este análisis se realiza teniendo en cuenta las propiedades físicas de las tuberías como el material y la velocidad del flujo. Se quiere encontrar el escenario que represente mejor las condiciones de erosión que

sufren las tuberías con el paso del agua y al mismo tiempo la pérdida de capacidad Hidráulica de las mismas por parte del crecimiento de biopelículas.

Por medio de este se analiza el efecto que tiene sobre el sistema las leves variaciones que se pueden hacer a los diámetros que pueden ocurrir en las tuberías debido al flujo de agua. El análisis de este para la generación de escenarios se tiene en cuenta el material y las propiedades topológicas de las tuberías presentes en la red.

Con este análisis se busca encontrar el escenario que represente mejor las condiciones de desgastamiento, incrustaciones o sedimentos que sufren las tuberías con el paso del agua, es poca la variación porcentual que presentan los diámetros de las tuberías.

Tabla 16. Se presentan los escenarios utilizados durante el análisis por diámetros de la red de distribución del distrito Malpaso Cañaverál

Diámetros	Diámetros				
		AC	PVC	HD	HG
Escenarios 1	asignar diámetros				
Escenarios 2	multiplicar	0.95			
Escenarios 3	multiplicar	0.95	1.2		
Escenarios 4	multiplicar	0.95	1.2	0.8	
Escenarios 5	multiplicar	0.95	1.5	0.8	
Escenarios 6	multiplicar	0.95	1.3	0.6	
Escenarios 7	multiplicar	0.95	1.1	0.5	
Escenarios 8	multiplicar	0.85	1.1	0.5	
Escenarios 9	multiplicar	0.9	1.1	0.9	
Escenarios 10	multiplicar	0.5	1.1	0.5	
Escenarios 11	multiplicar	0.95	1.1	0.6	
Escenarios 12	multiplicar	0.95		0.95	
Escenarios 13	multiplicar	0.95		0.95	0.95
Escenarios 14	multiplicar	0.9		0.9	0.9
Escenarios 15	multiplicar	0.7		0.7	0.7
Escenarios 16	multiplicar	0.7	1.1	0.7	0.7
Escenarios 17	multiplicar	0.75	1.5	0.75	0.75
Escenarios 18	multiplicar	0.9	1.05	0.9	0.9

Figura 28. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito porvenir en el análisis por diámetros

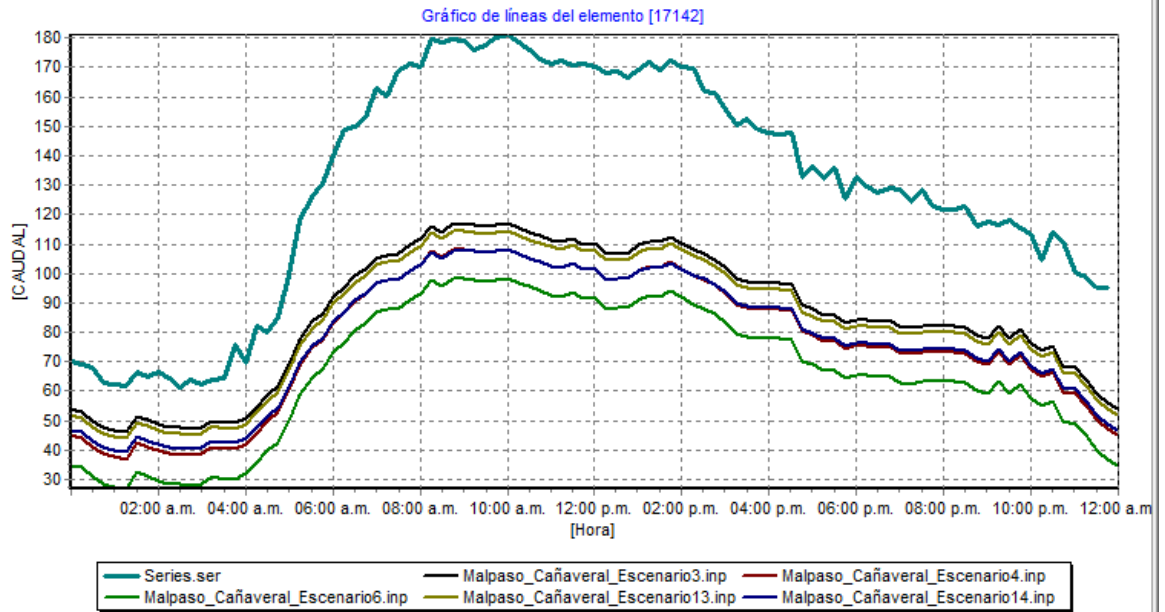
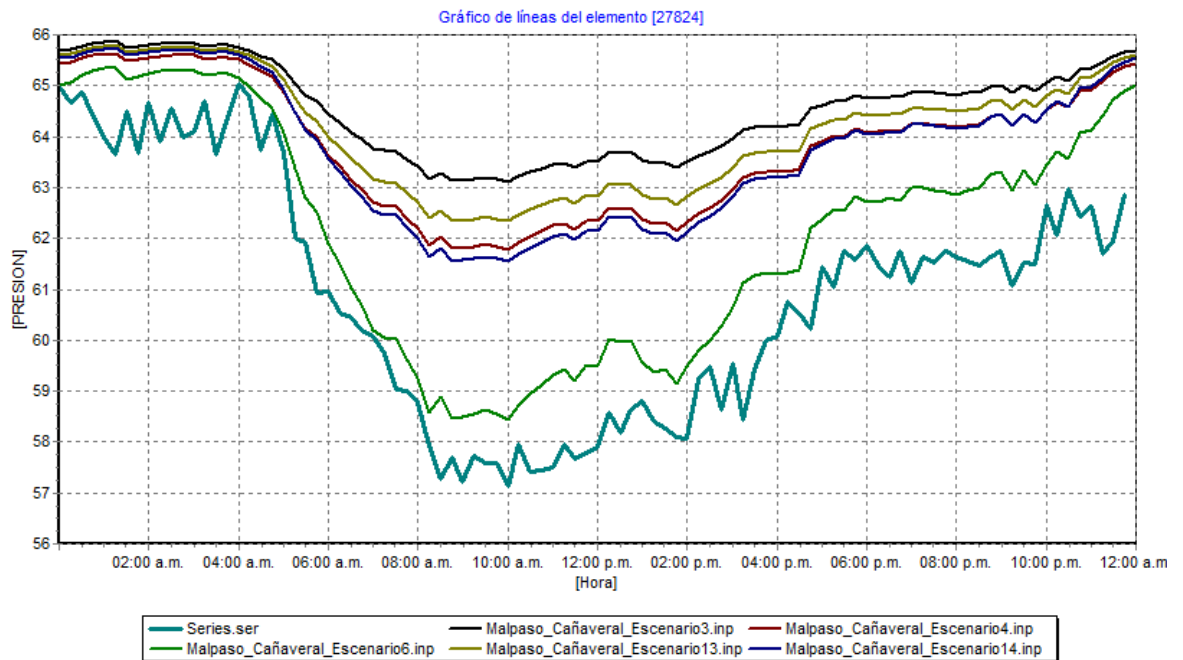


Figura 29. Comportamiento del punto de medición de presión del nodo 27824 en el análisis por diámetros



De las figuras 28 y 29, se observa que el escenario que mejor representa el comportamiento del punto de medición de presión es el escenario 13 o el escenario 14, en estos escenarios suponemos un desgaste mínimo en las tuberías de AC, HD y HG.

4.5.2 Análisis por pérdidas menores. Las pérdidas menores presentes en una red de distribución de agua potable son causadas por la presencia de accesorios o demás elementos usados para la operación o prestación del servicio, que provocan turbulencias y perturbaciones en el flujo, las cuales causan la pérdida de energía.

En este análisis se considera el efecto que tienen sobre la red la existencia de accesorios u otros elementos en contacto con el flujo, que generan pérdidas de energía.

Durante el análisis de pérdidas menores se probaron varios escenarios con diferentes pérdidas menores por unidad de longitud teniendo en cuenta el material de la tubería.

Tabla 17. Escenarios de calibración por pérdidas menores.

Perdidas Menores	MULTIPLICADORES			
	PVC	AC	HG	HD
P. Menores 1	1.1	1.12	1.2	1.15
P. Menores 2	1.5	1.55	1.6	1.58
P. Menores 3	1.6	1.69	1.75	1.7
P. Menores 4	1.8	1.85	1.92	1.9
P. Menores 5	2	2.5	3	2.8

Figura 30. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito porvenir en el análisis por perdidas menores

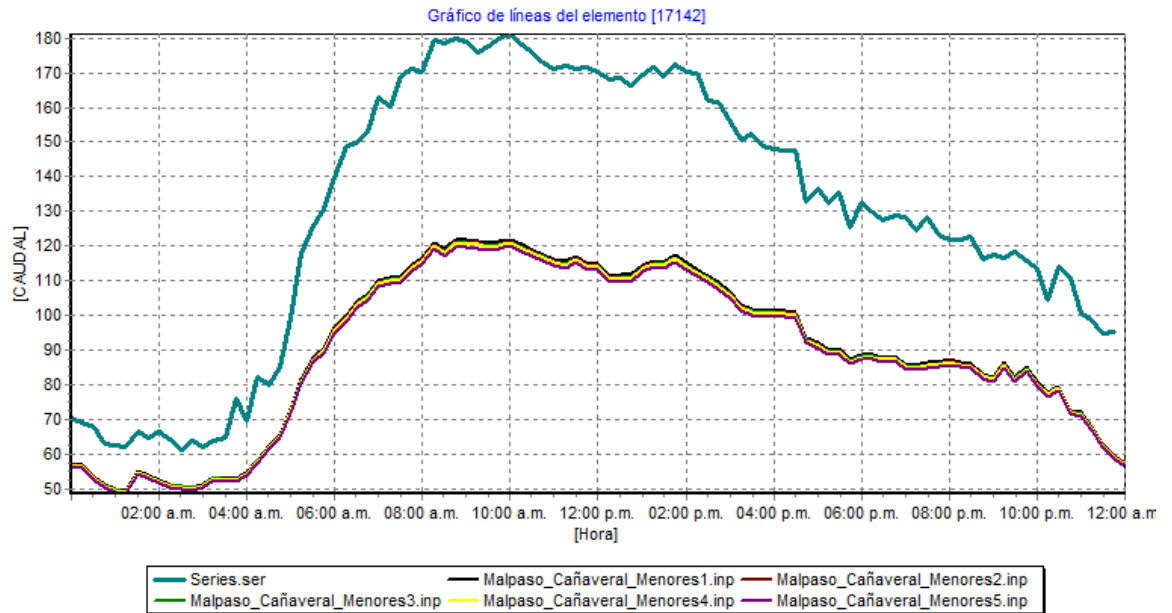
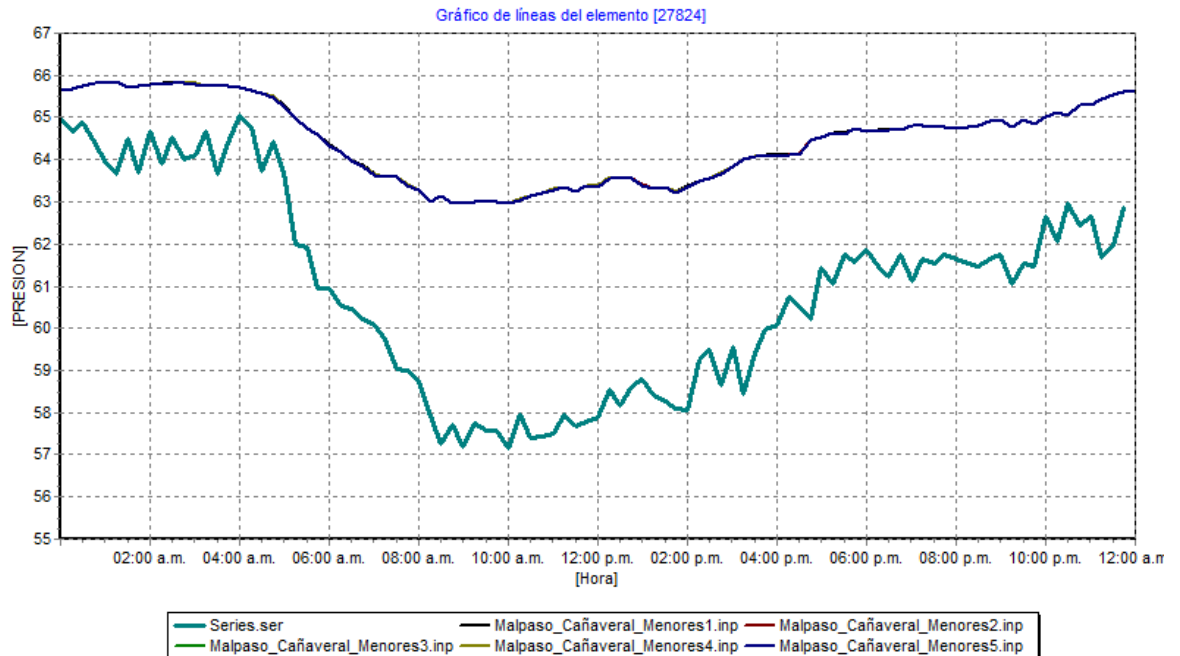


Figura 31. Comportamiento del punto de medición de presión del nodo 27824 en el análisis por perdidas menores



Se considera que el modelo no es muy sensible a las pérdidas menores por unidad de longitud, debido a los accesorios y a los cambios de dirección en las tuberías.

4.5.3 Análisis por rugosidades. Las rugosidades de las tuberías son función del tipo de material y del tiempo de uso; la superficie interna no es lisa en su totalidad, en ellas se encuentran pequeñas irregularidades que producen un esfuerzo cortante en sentido contrario a la dirección del flujo, que es el responsable de las pérdidas por fricción.

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

Tabla 18. Escenarios de calibración por rugosidades

	MULTIPLICADORES			
Rugosidades	PVC	AC	HG	HD
Rugosidad 1	1.5	2	2	2
Rugosidad 2	2	2	2	2
Rugosidad 3	1.5	1.5	1.5	1.5
Rugosidad 4	1.5	1.6	1.7	1.8
Rugosidad 5	1.7	1.8	1.9	2
Rugosidad 6	1.5	1.5	1.8	1.8

Figura 32. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito porvenir en el análisis por rugosidades

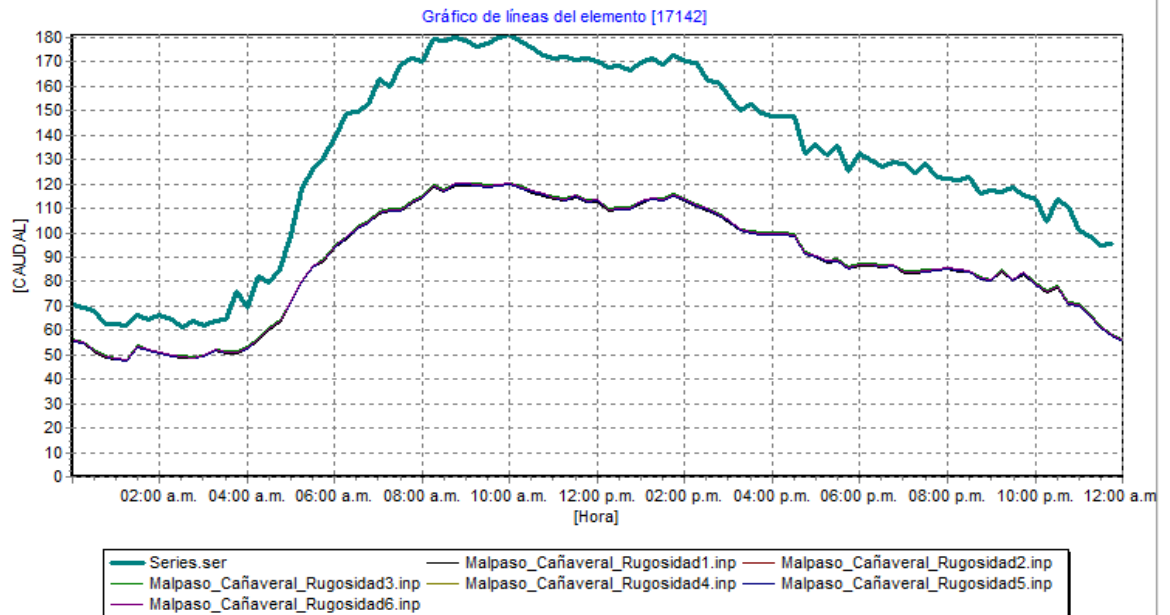
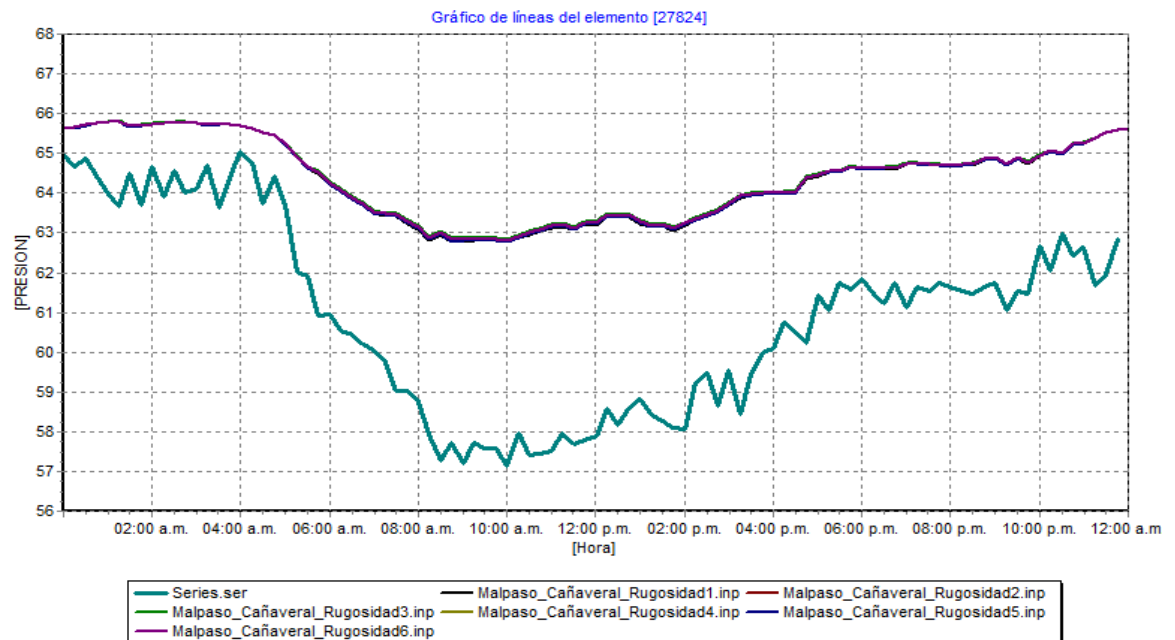


Figura 33. Comportamiento del punto de medición de presión del nodo 27824 en el análisis por rugosidades

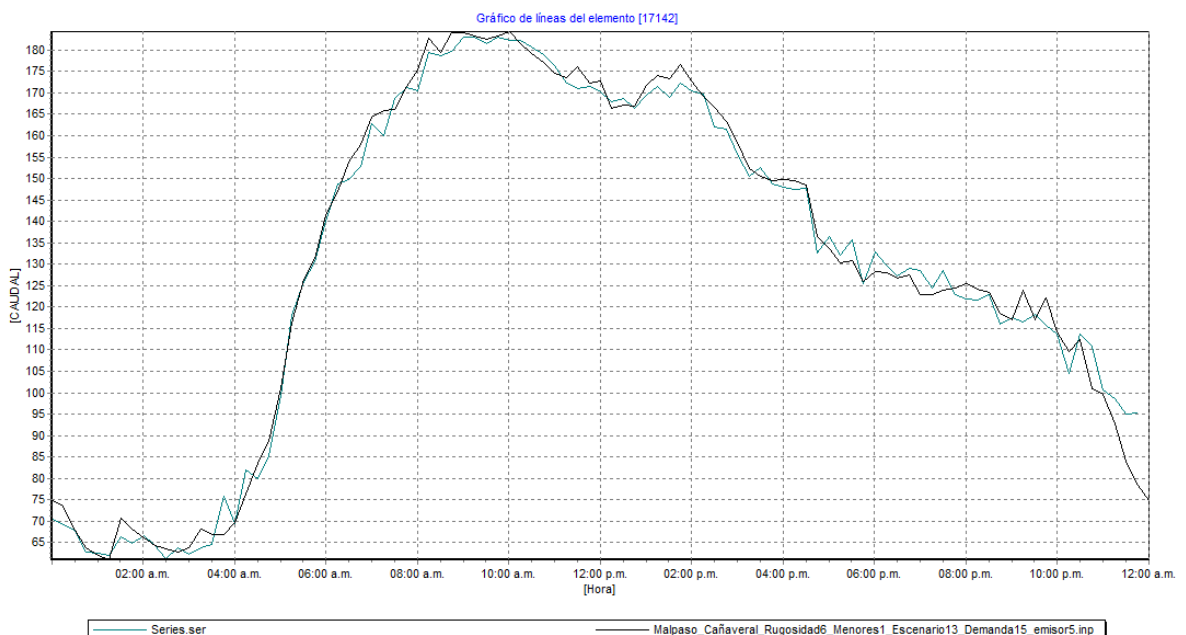


En las Figuras 32 y 33 permiten observar que la influencia de las rugosidades no es significativa en el proceso de calibración, probablemente porque el aumento de la rugosidad debido a las biopelículas en las tuberías no es significativo para que el régimen de flujo cambie en las tuberías tanto de asbesto cemento como de PVC, ocasionando que el régimen de Flujo siga siendo flujo hidráulicamente liso, en donde el factor de fricción en las tuberías no depende de la Rugosidad.

4.6 MODELO UNIFICADO

Durante esta etapa, al haber realizado los análisis de sensibilidad de todas las variables por separado, se procede a recoger los mejores escenarios probados para unificarlos en un modelo que contemple los escenarios de calibración que se ajusten al comportamiento real de la red de distribución de agua potable del distrito Malpaso Cañaveral. Al asignar el escenario Demanda 15, mostrada en la Tabla 12 y el escenario de emisores 5 se obtiene la Línea Base 2, mostrada en la Tabla 15. A continuación se presentan los resultados de este modelo:

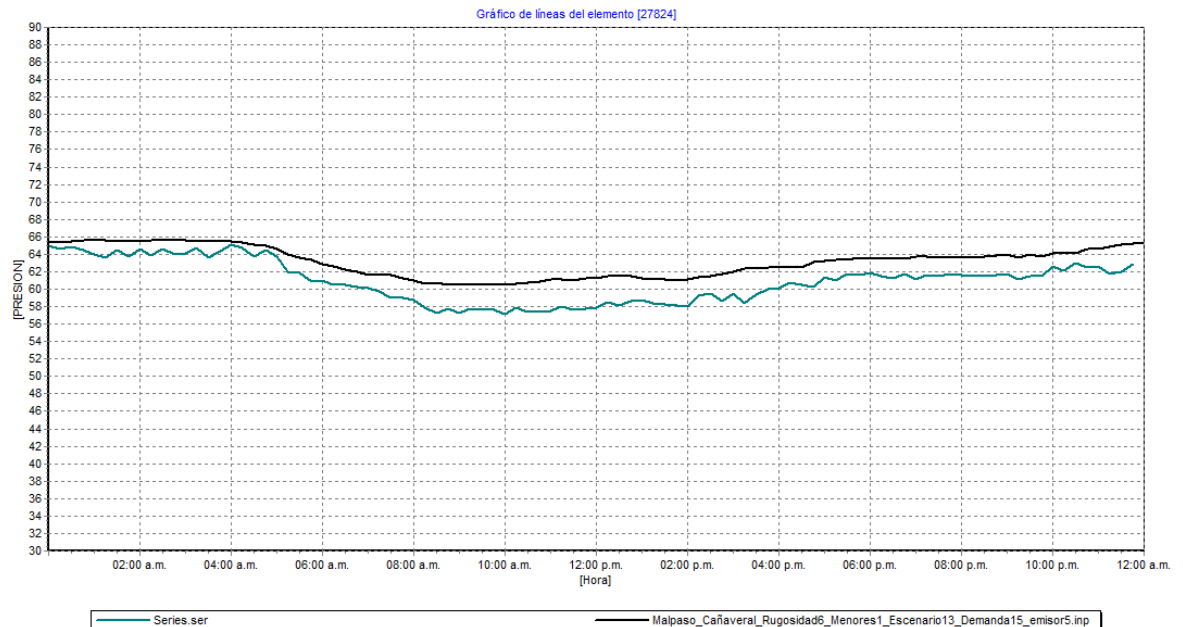
Figura 34. Modelo Unificado para el punto de medición de caudal.



En la Figura 34, se observa el modelo unificado de la red de distribución del distrito Malpaso Cañaveral, representa de manera exacta el comportamiento del punto de medición del caudal.

El modelo unificado de la red de distribución se presenta de manera correcta la masa que ingresa al sistema para las condiciones de operación donde se hicieron mediciones.

Figura 35. Modelo Unificado para el punto de medición de presión.



En la figura 35 se puede decir que el modelo representa de manera precisa el comportamiento de las presiones de la red de distribución del distrito Malpaso Cañaveral. Las diferencias máximas de presión ocurren a las horas de alto consumo y son del orden de 2 metros lo que equivale a un error del 6%.

Como el modelo unificado de la red de distribución representa adecuadamente tanto las curvas de masa como las de energía del sistema, puede ser utilizado para labores de mantenimiento, operación y diseño de la red.

4.7 ANÁLISIS DEL ÍNDICE DE AGUA NO CONTABILIZADA

Luego de la recolección de los datos de mediciones que permitieron calcular el caudal de salida de los tanques de almacenamiento respectivos ubicados en el distrito, nos permitió calcular el índice de agua no contabilizada, esto equivale a la diferencia entre el volumen de líquido producido por la planta y el volumen de facturación, este volumen de facturación es el caudal modelado.

Los valores a continuación muestra los datos obtenidos del caudal de salida de la planta, los medidos y los del modelo.

Tabla 19. Caudales de salida y volumen de planta y modelo.

Hora	Volumen Medido [L]	Volumen Facturado [L]	Hora	Volumen Medido [L]	Volumen Facturado [L]
00:00	63351	51876	12:00	153262.08	103923
00:15	62235	51210	12:15	151137.63	100593
00:30	61034.067	48249	12:30	151718.22	100935
00:45	56587.5	46098	12:45	149773.14	100854
01:00	56311.875	45171	13:00	152409.33	103428
01:15	55760.625	44604	13:15	154459.62	104625
01:30	59778	49734	13:30	152078.94	104283
01:45	58260.942	48456	13:45	155136.24	106065
02:00	59886.567	47277	14:00	153434.43	104031
02:15	57909.375	46305	14:15	152805.06	102087
02:30	55133.442	45999	14:30	145909.98	100692
02:45	57318.75	45594	14:45	145443.87	98856
03:00	56010.942	46152	15:00	140162.13	96318
03:15	57492	48348	15:15	135392.13	93024
03:30	58106.25	47682	15:30	137277.54	92034
03:45	68301.567	47682	15:45	133815.42	91593
04:00	62555.625	49221	16:00	133069.68	91683
04:15	73757.817	52686	16:15	132733.98	91485
04:30	71910	56502	16:30	132871.95	91044

Continuación Tabla 19

Hora	Volumen Medido [L]	Volumen Facturado [L]	Hora	Volumen Medido [L]	Volumen Facturado [L]
04:45	76739.067	59292	16:45	119466	84546
05:00	89433	65961	17:00	122818.59	83151
05:15	106164	73854	17:15	118897.65	81405
05:30	113364	79254	17:30	122014.98	81648
05:45	117492.192	81855	17:45	112942.62	79002
06:00	125929.692	87138	18:00	119520.18	80199
06:15	133875	90234	18:15	116738.46	80163
06:30	134760.942	93825	18:30	114613.74	79470
06:45	137587.5	96012	18:45	116112.51	79794
07:00	146615.625	99450	19:00	115648.29	77454
07:15	144098.442	100332	19:15	111975.66	77409
07:30	151889.067	100494	19:30	115591.95	77949
07:45	154082.817	103329	19:45	110645.55	78201
08:00	153365.625	105372	20:00	109780.02	78750
08:15	161564.067	109395	20:15	109491.57	78066
08:30	160846.875	107559	20:30	110611.17	77661
08:45	161718.75	110088	20:45	104456.61	75159
09:00	164685.942	109998	21:00	105768.54	74349
09:15	164728.125	109647	21:15	104819.22	77958
09:30	163350	109152	21:30	106496.19	74250
09:45	164643.75	109629	21:45	104068.08	77004
10:00	163954.692	110178	22:00	102264.93	72846
10:15	164095.317	108693	22:15	94014	70335
10:30	162745.317	107352	22:30	102413.79	71892
10:45	161043.75	106263	22:45	99808.83	65709
11:00	158610.942	104967	23:00	90574.83	65052
11:15	154968.75	104382	23:15	88715.34	61371
11:30	153829.692	105714	23:30	85440.69	56853
11:45	154265.625	103779	23:45	85660.56	53856

Volumen Total Producido 11236411.8

Volumen total facturado 7821099
--

$$IANC(\%) = \frac{\text{Volumen de agua producido} - \text{Volumen de agua facturado}}{\text{Volumen de agua producido}} * 100$$

$$IANC(\%) = \frac{11236411.8 - 7821099}{11236411.8} * 100$$

$$IANC(\%) = 30.39\%$$

4.8 ANÁLISIS DEL DISTRITO EN RÉGIMEN DE PRESIÓN ALTA

Para realizar el análisis del distrito en régimen de presión alta en el modelo se simuló la apertura total de válvula V_18437 se encuentra ubicada en la entrada del Barrio San Luis, esta fue una de las primeras válvulas instaladas debido a las altas presiones que se generaban en el barrio, La válvula V_19117 se encuentra ubicada a la entrada del Barrio Diamante II, La válvula V_18438 se encuentra ubicada a la salida del barrio Porvenir y La válvula V_19118 se encuentra ubicada a la entrada del barrio Ciudad Venecia, los nodos emisores asumidos presentan mayor descarga de caudal a la atmosfera en horas de no consumo, mostrando un incremento en la curva de caudal, en este proceso se asumieron los mismos escenarios que en la calibración del modelo con el régimen de presión baja.

El volumen y el IANC se calculan de la misma forma utilizada anteriormente, debido al régimen de presión se espera que el IANC también aumente, como se expresa a continuación.

Volumen Total	
Facturado	7821099

Volumen Total	
Producido	11334447

$$IANC(\%) = \frac{\text{Volumen de agua producido} - \text{Volumen de agua facturado}}{\text{Volumen de agua producido}} * 100$$

$$IANC(\%) = \frac{11334447 - 7821099}{11334447} * 100$$

$$IANC(\%) = 31\%$$

El IANC aumento en 0.61% respecto al modelo de régimen de presión baja, aunque este valor sea pequeño indica que se pierde gran cantidad de agua.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Contar con un modelo hidráulico calibrado, requiere tener una buena información actualizada del catastro de redes y de usuarios; este modelo puede ser utilizado como base para el diseño y así, tomar decisiones de mantenimiento y prevención.
- El realizar el proceso de Calibración se convierte en un método de gran importancia, ya que a partir de este proceso se pueden encontrar las diferentes variables que afectan el buen comportamiento del modelo. Por lo tanto se pudo observar que al realizar el análisis por demandas se presentó un cambio significativo en la curva de masa a comparación de los otros factores modificados, por ser este un método para determinar la pérdida de agua por conexiones clandestinas o contadores defectuosos y al tenerse en cuenta el estrato socioeconómico de los usuarios, siéndole asignado a los estratos bajos 1, 2 factores multiplicadores de 2.7 y 2.5, respectivamente, y a los sectores medios 3 y 4 factores multiplicadores de 2.3 y 2, respectivamente, se puede decir que en el sector de Malpaso se están presentando conexiones clandestinas en los sectores de estratos bajo, debido a que en el análisis realizado las curvas varían considerablemente al variar los factores en estos estratos, sin embargo los estratos 3 y 4 tienen un mayor número de usuarios, pero el cambio en los factores no afecta considerablemente las curvas, por lo tanto se presume que en estos sectores se presentan contadores defectuosos o fugas.
- Con el análisis por demanda realizado, se ajusta considerablemente la curva de masa, el modelo sin calibrar presenta un caudal de 125 lps, el modelo calibrado presenta un caudal de 185 lps en horas pico, al realizar el proceso de calibración se observa que el caudal del modelo aumenta 60 lps, debido a que este método determina las pérdidas por conexiones clandestinas, se dice que el

índice de agua no contabilizada de 30.39% en régimen de presión baja se debe a la presencia de conexiones clandestinas, fugas y estallidos en el sistema de distribución, siendo las conexiones clandestinas el principal factor que afecta considerablemente este índice, debido a la gran diferencia presentada en horas de mayor consumo.

- Con el modelo calibrado se abrieron las válvulas para observar el comportamiento de la red de distribución en régimen de presión alta, al realizar el IANC para este régimen, se asignaron emisores con valores cercanos a 0.015 para los nodos que presentan una mayor presión en toda la red de distribución y con valores cercanos a 0.0025 para otros nodos aleatorios; debido a la presión alta que se presenta en el distrito por la ausencia de las válvulas, los emisores asumidos tendrían mayor descarga de caudal a la superficie, siendo los emisores ubicados en las zonas de presión alta los que afectan directamente el índice de agua no contabilizada. Los resultados del IANC fueron de 30.39% y 31% para el régimen de presión actual (baja) y régimen de presión alta respectivamente, se observó un aumento de 0.61% el cual no es muy significativo.

- Los datos obtenidos por el modelo muestran que las zonas que presentan conexiones clandestinas son las ubicadas en estratos bajos, por lo tanto los fraudes se presentan en los barrios San Martín y Quebrada Iglesia, debido a que en un principio fueron barrios de invasión y por lo tanto esta situación aún se presenta.

Debido a que en análisis hecho por emisores hubo un ajuste significativo en la curva de masa y que el caudal de fuga está en función de la presión, se dice que en los barrios Provenza (cra 21ª con calle 110), barrio Delicias Baja (cra 15B con calle 106), barrio Fontana (cra 19 con calle 99) y Urbanización Hoyo en Uno ubicada en Cañaveral, se presentan fugas debido a la presencia de presiones altas.

- Al ser el proceso de calibración algo muy complejo, ya que tiene una gran cantidad de variables que se deben ajustar por ensayo y error, y siendo bastante el tiempo requerido, el utilizar el Software Calibra para realizar dicho proceso, se convierte en un instrumento de gran ayuda ya que facilita el trabajo y se convierte en algo menos tedioso.
- En algunas curvas de energía la diferencia de presión era muy alta por lo tanto era necesario realizar la calibración ya que el modelo sin calibrar no tiene la capacidad de simular el comportamiento de la red de distribución.
- No fue posible realizar la calibración de régimen de presión alta, ya que anteriormente se encontraban instalados los caudalímetros pero era necesario comprar equipos de radio los cuales enviaban la información al scada en donde era descargada. Los equipos de radio se instalaron durante el proceso de calibración, por lo tanto para obtener la información necesaria el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga debía cerrar las válvulas ya instaladas, esto implicaría el aumento de las presiones en los sectores siendo innecesario este procedimiento.

BIBLIOGRAFÍA

BENAVIDES, Oscar Andrés. Aspectos Técnicos del índice de agua no contabilizada en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Diciembre de 2003.

CALIBRA. Manual del usuario. Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS, CIACUA. Bogotá, Octubre 2006.

EPANET 2.0 ESPAÑOL. Manual del usuario. Análisis hidráulico y de calidad en redes de distribución de agua.

<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/es/flujoentuberias/fricci%C3%B3n/darcy.htm>. [Consultado el 24 Noviembre del 2010, 3:52 p.m.]

Investigación sobre el cumplimiento del Derecho Humano al Agua. Abril del 2009. http://www.defensoria.org.co/red/?_item=0301&_secc=03&ts=2&n=594. [Consultado el 1 de Noviembre del 2010, 3:33 p.m.].

LARA MESA, Susana. Efecto del índice de agua no contabilizada en las tarifas para acueductos medianos y pequeños en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Mayo de 2004.

LEAL VILLARREAL, Felipe. Metodología para la calibración de redes de distribución bajo amiente de fugas. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Enero de 2003.

Metodología para la definición del plano óptimo de presiones y reducción del índice de agua no contabilizada. Departamento de ingeniería civil y ambiental. Centro de investigación en acueductos y alcantarillados, CIAUA. Universidad de los Andes. Bogotá, Octubre 2006.

SALAS USECHE, Daniel Eduardo. Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería de sistemas y computación. Junio de 2003.

XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica “Metodología para la determinación del plano óptimo de presiones en una red de distribución de agua potable” Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Juan G. Saldarriaga Profesor Titular, Director Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados - CIACUA, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Felipe S. Contreras Jiménez Profesor Investigador.

ANEXOS

Anexo A. Fotografías Caudalímetro Digital



Fuente: Foto tomada por Camilo Rodríguez



Fuente: Foto tomada por Camilo Rodríguez



Fuente: Foto tomada por Camilo Rodríguez



Fuente: Foto tomada por Camilo Rodríguez

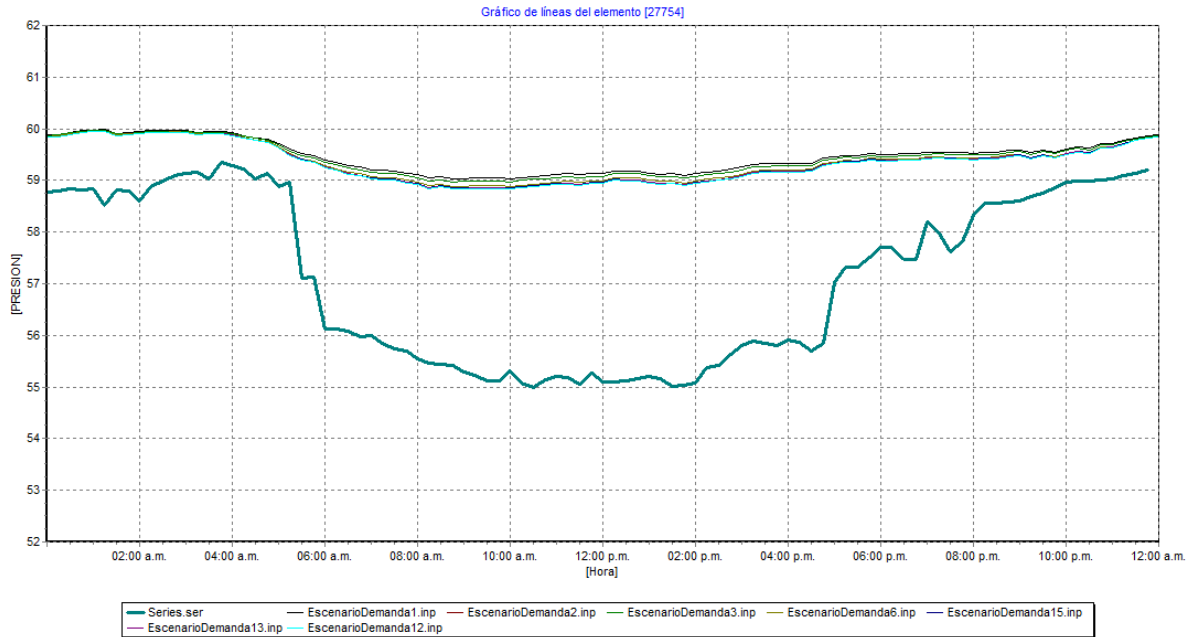
Anexo B. Fotografías Manómetro Digital



Fuente: Foto tomada por Camilo Rodríguez

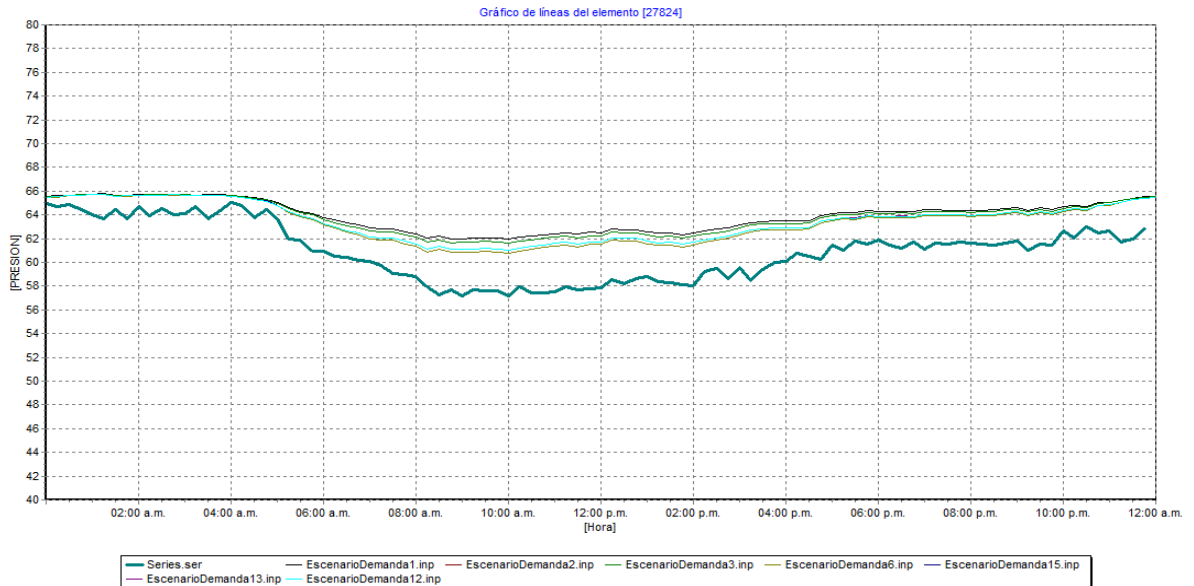
Anexo C. Gráficas de Presión por Análisis de Demandas

Figura 1. Comportamiento del punto de medición de presión 27754 de la red del distrito en el análisis por demandas.



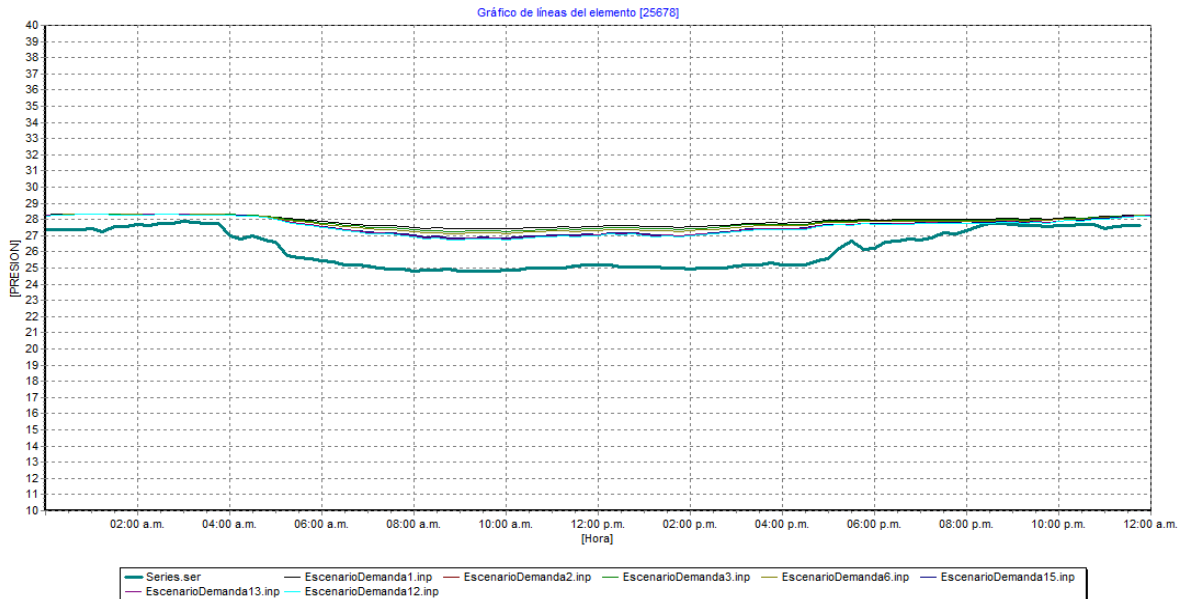
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 2. Comportamiento del punto de medición de presión 27824 de la red del distrito en el análisis por demandas.



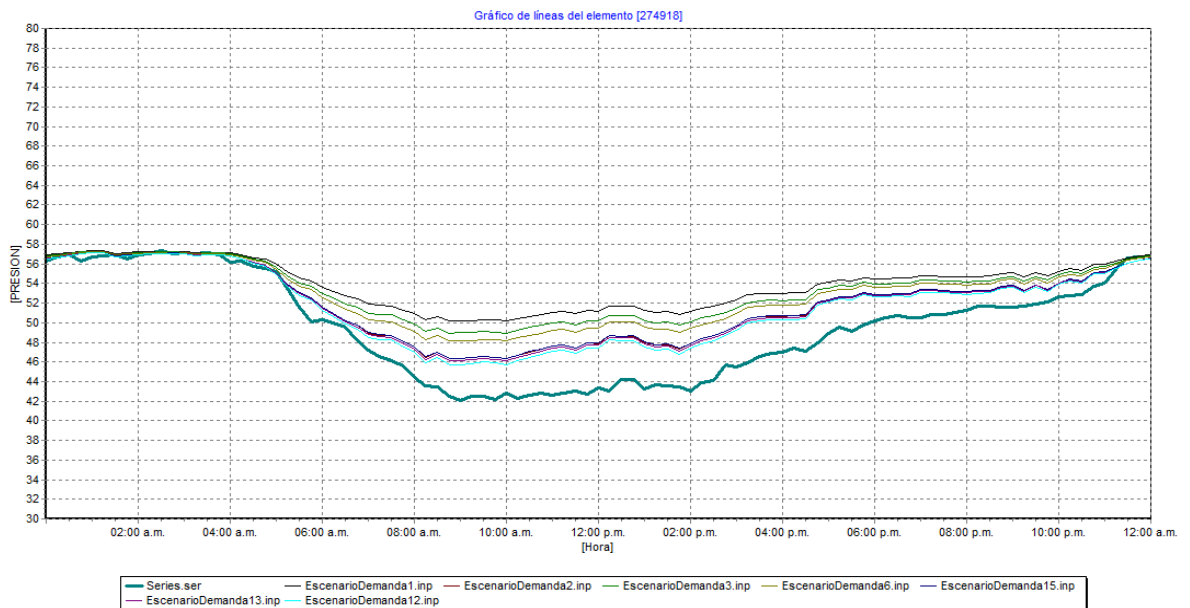
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 3. Comportamiento del punto de medición de presión 25678 de la red del distrito en el análisis por demandas.



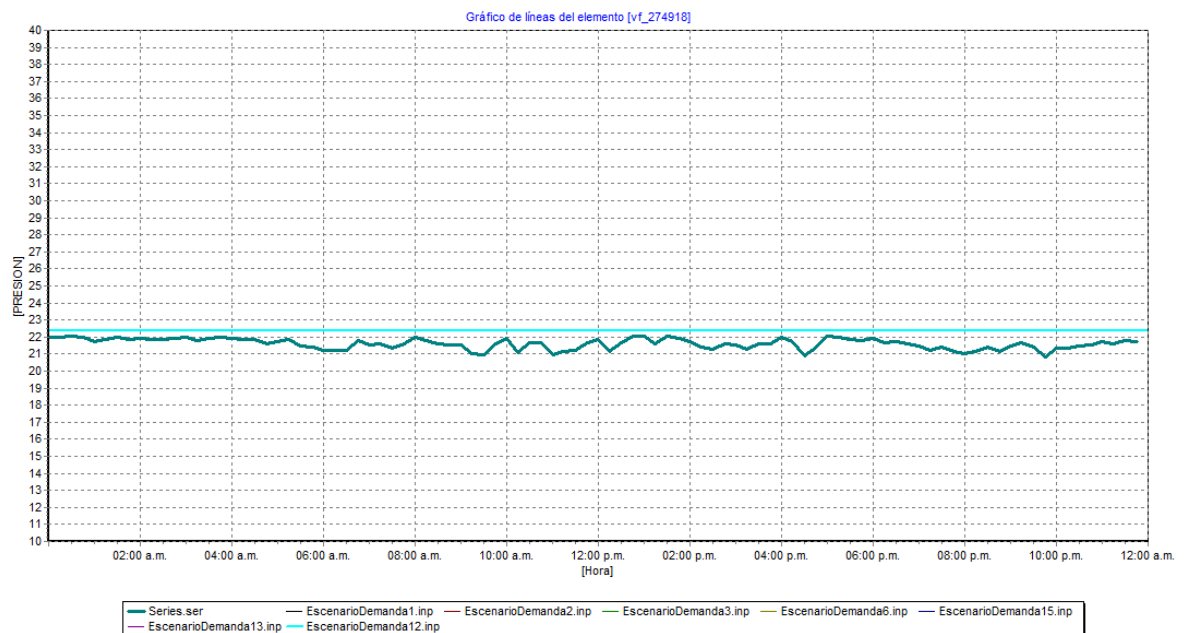
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 4. Comportamiento del punto de medición de presión 274918 de la red del distrito en el análisis por demandas.



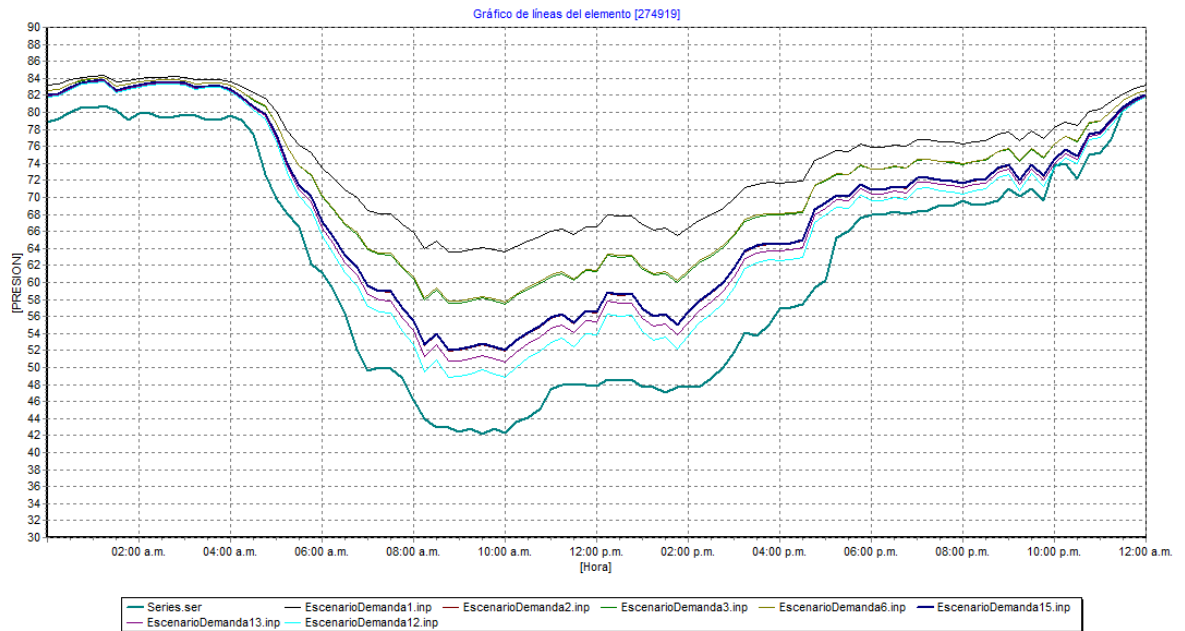
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 5. Comportamiento del punto de medición de presión vf_274918 de la red del distrito en el análisis por demandas.



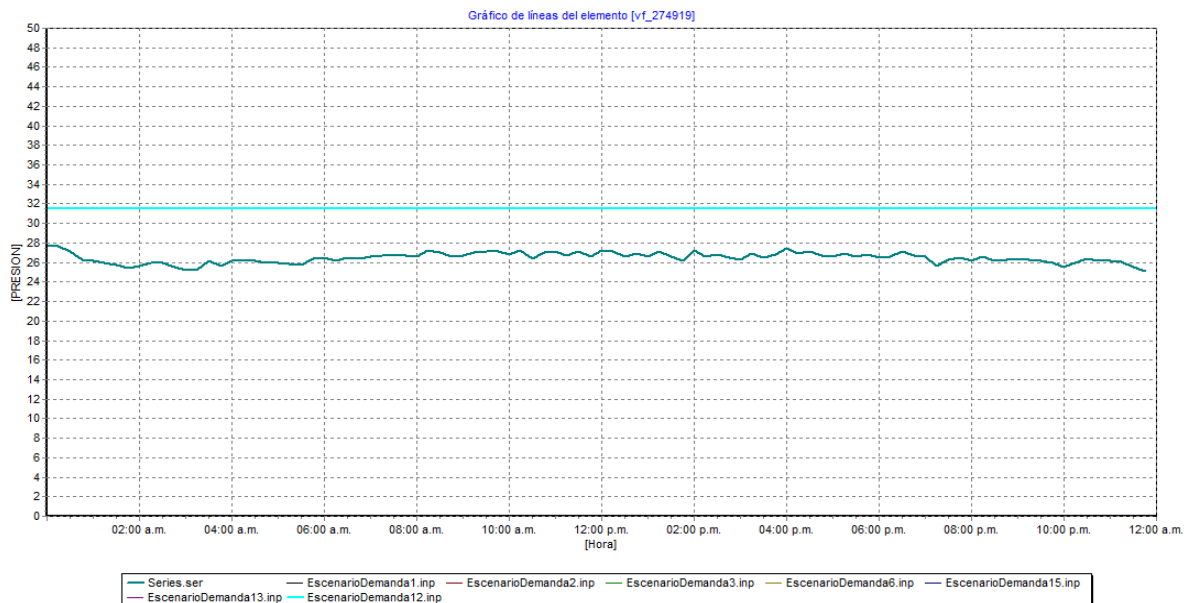
Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

Figura 6. Comportamiento del punto de medición de presión 274919 de la red del distrito en el análisis por demandas.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

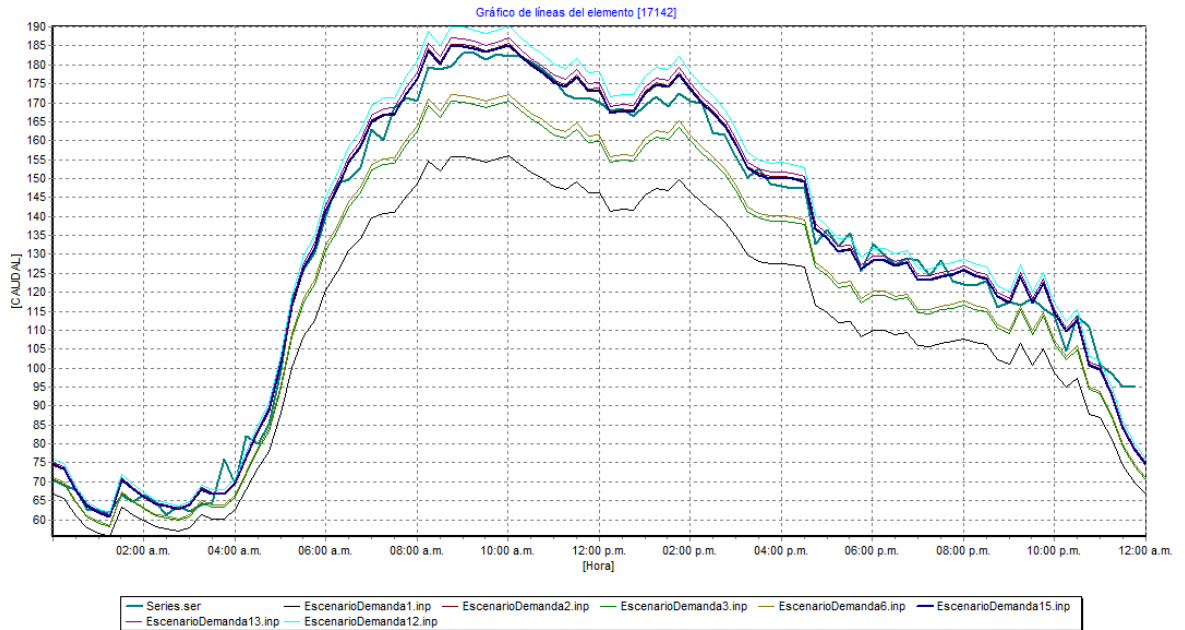
Figura 7. Comportamiento del punto de medición de presión vf_274919 de la red del distrito en el análisis por demandas.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

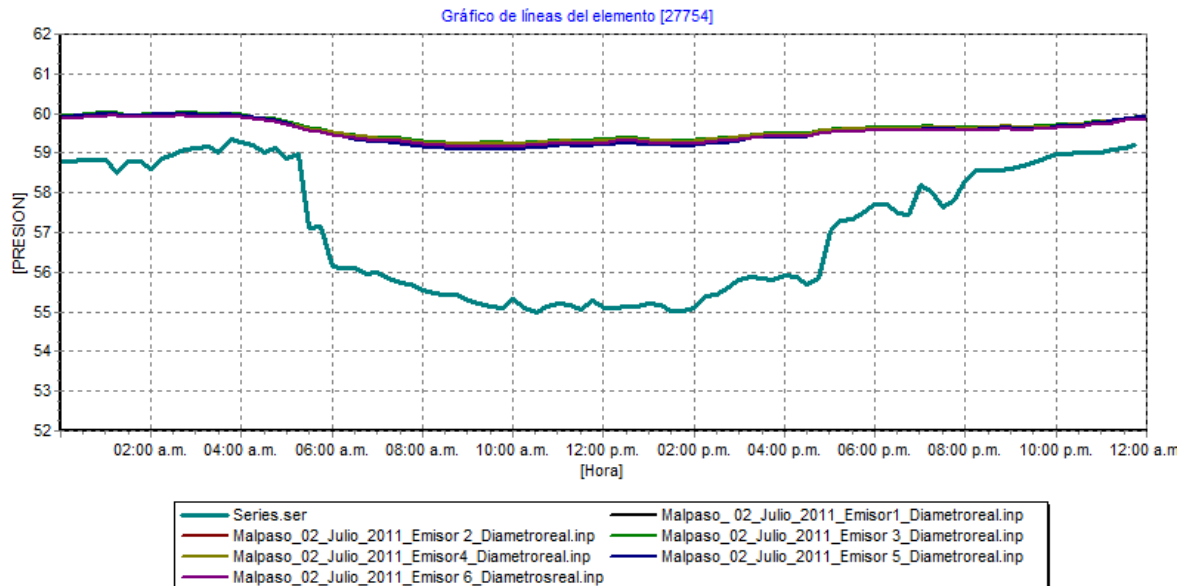
CAUDAL DEMANDA

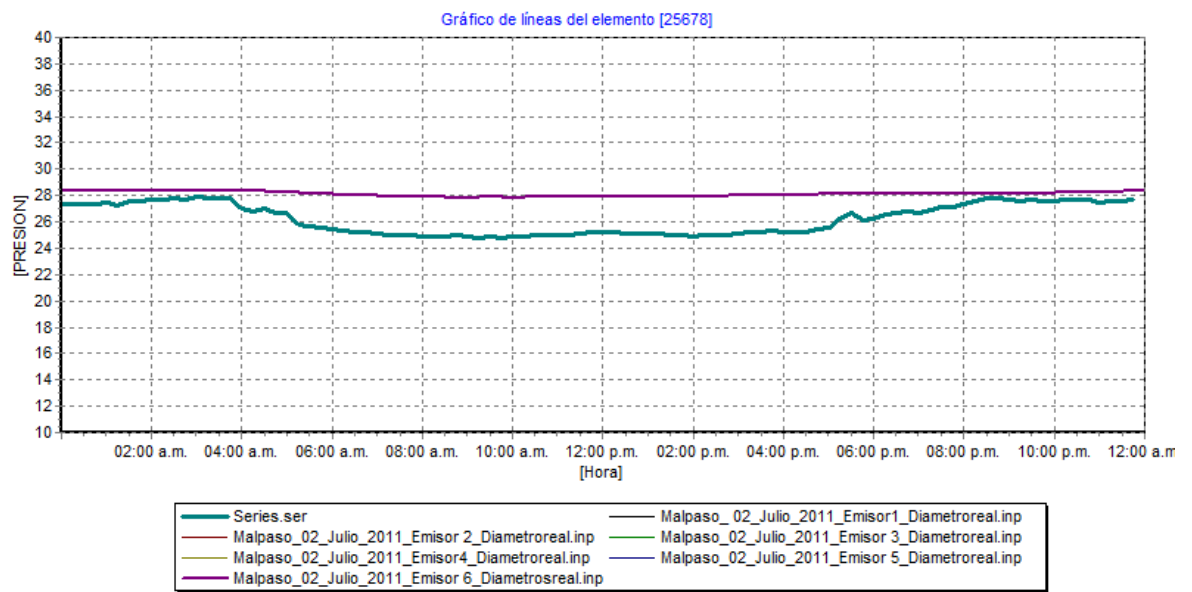
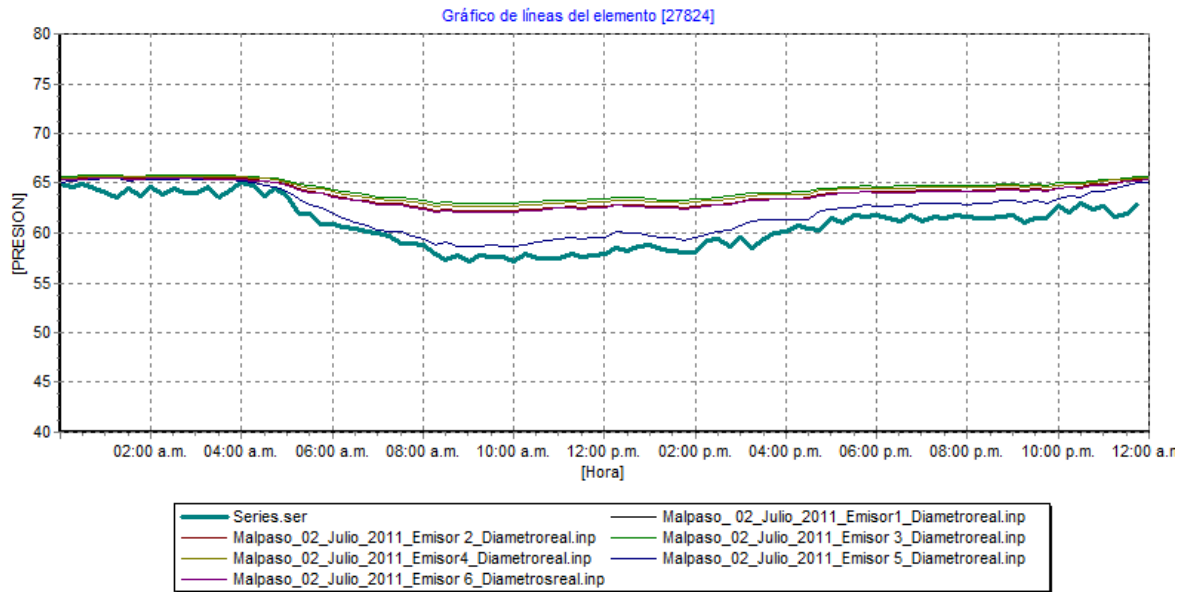
Figura 8. Comportamiento del punto de medición de caudal de salida del distrito porvenir en el análisis por demandas.



Fuente: Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A ESP

PRESIÓN EMISORES





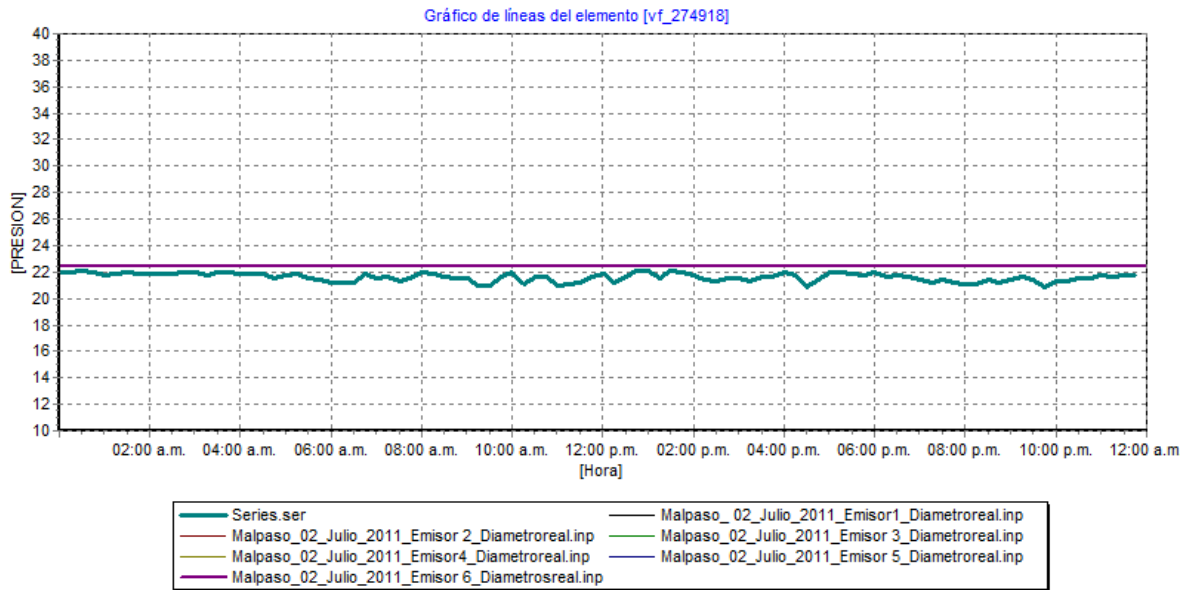
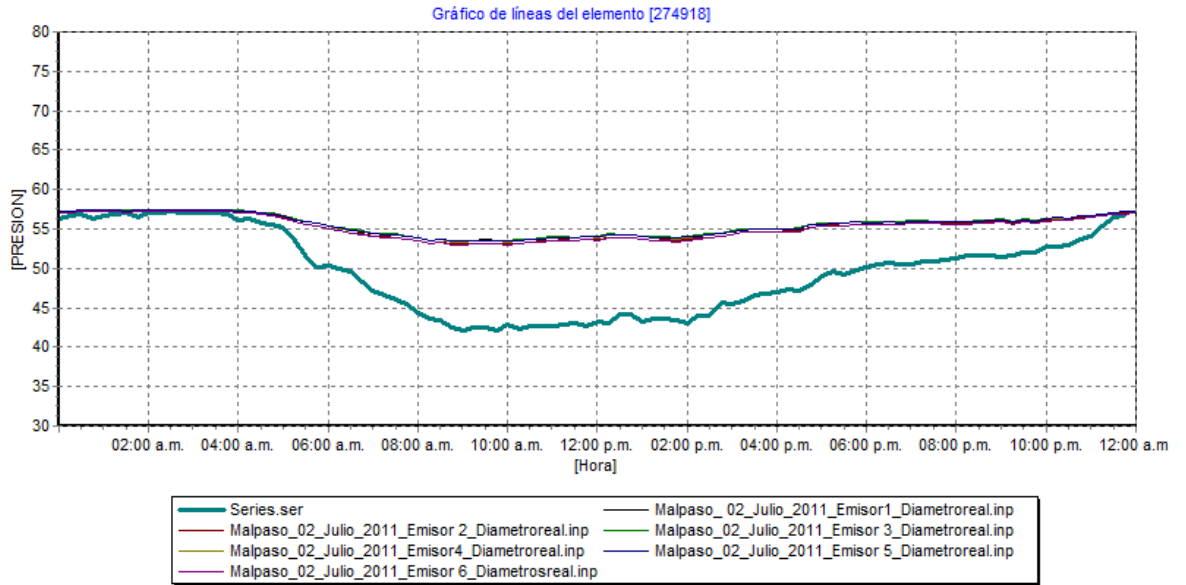


Gráfico de líneas del elemento [274919]

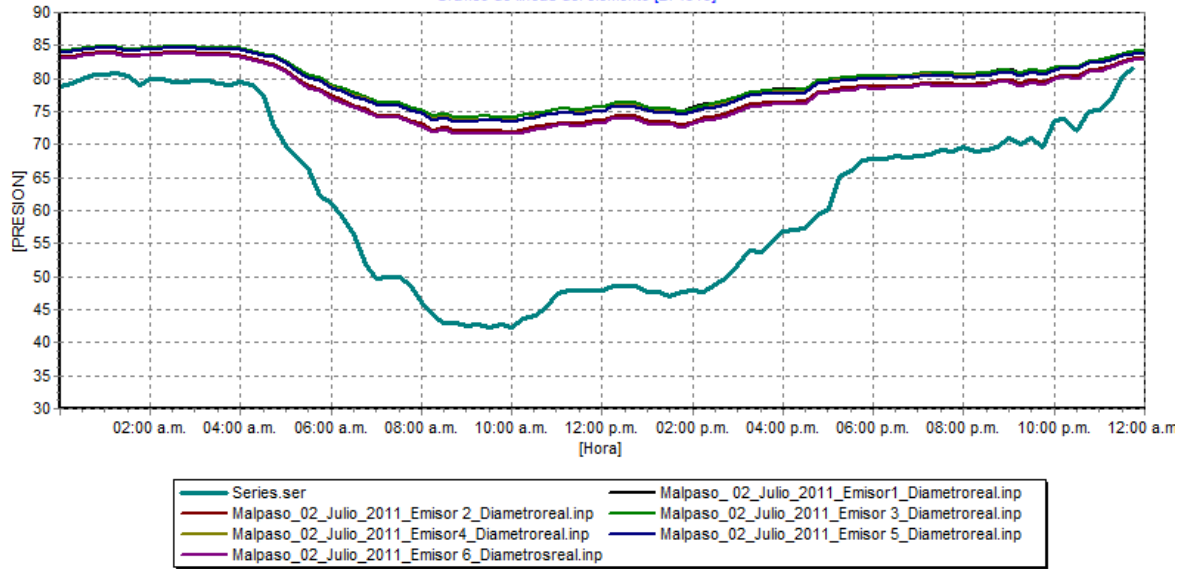


Gráfico de líneas del elemento [vf_274919]

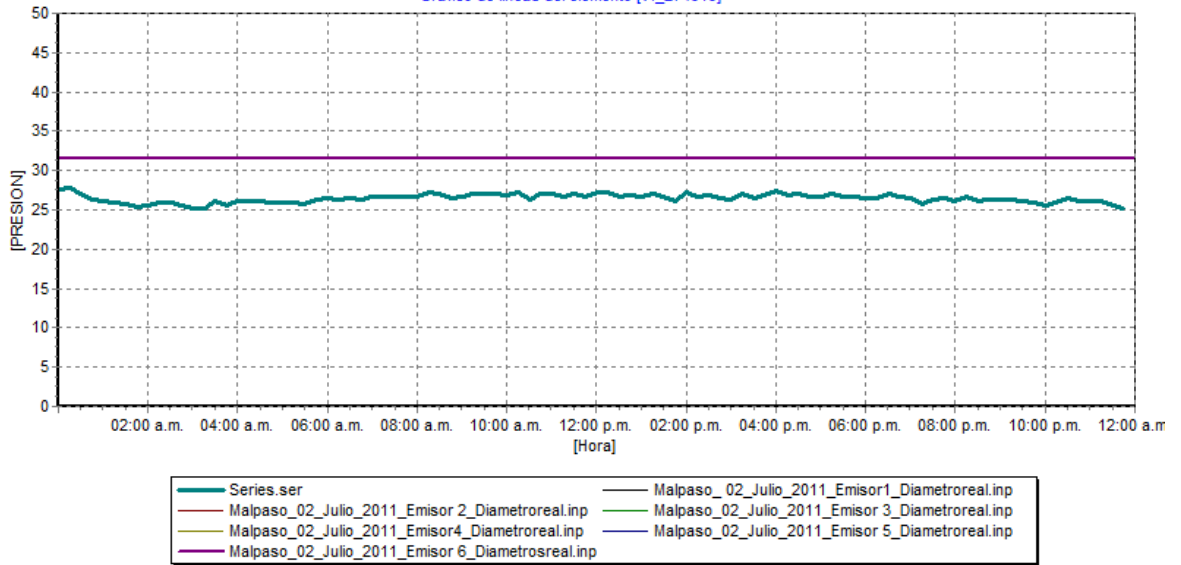
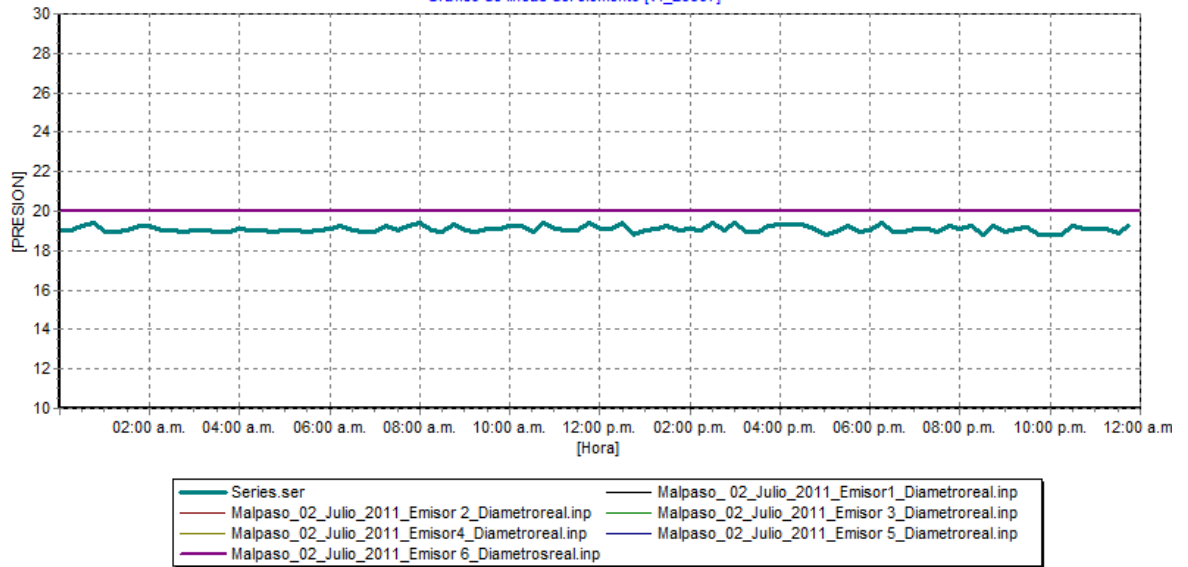
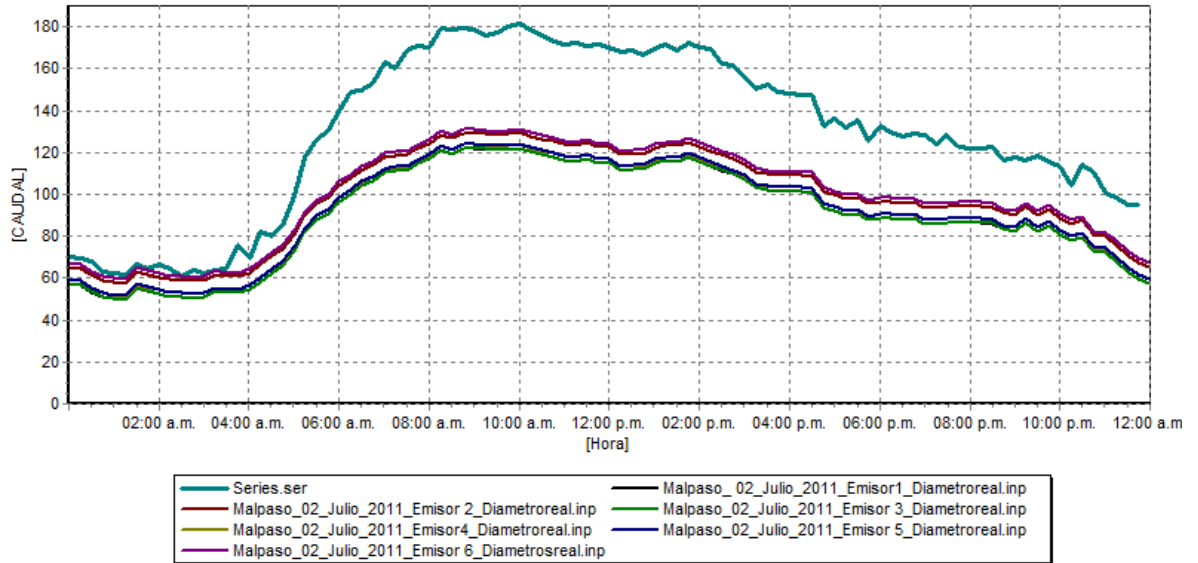


Gráfico de líneas del elemento [vf_26367]



CAUDAL EMISORES

Gráfico de líneas del elemento [17142]



Presión Escenarios Diámetros

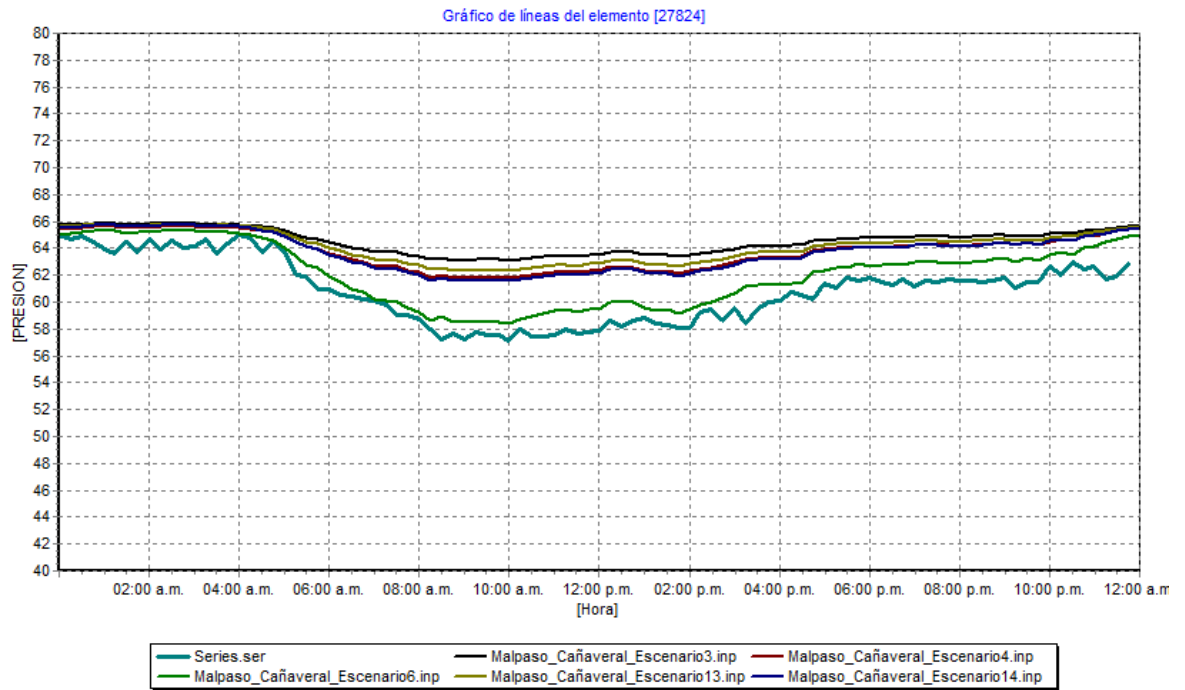
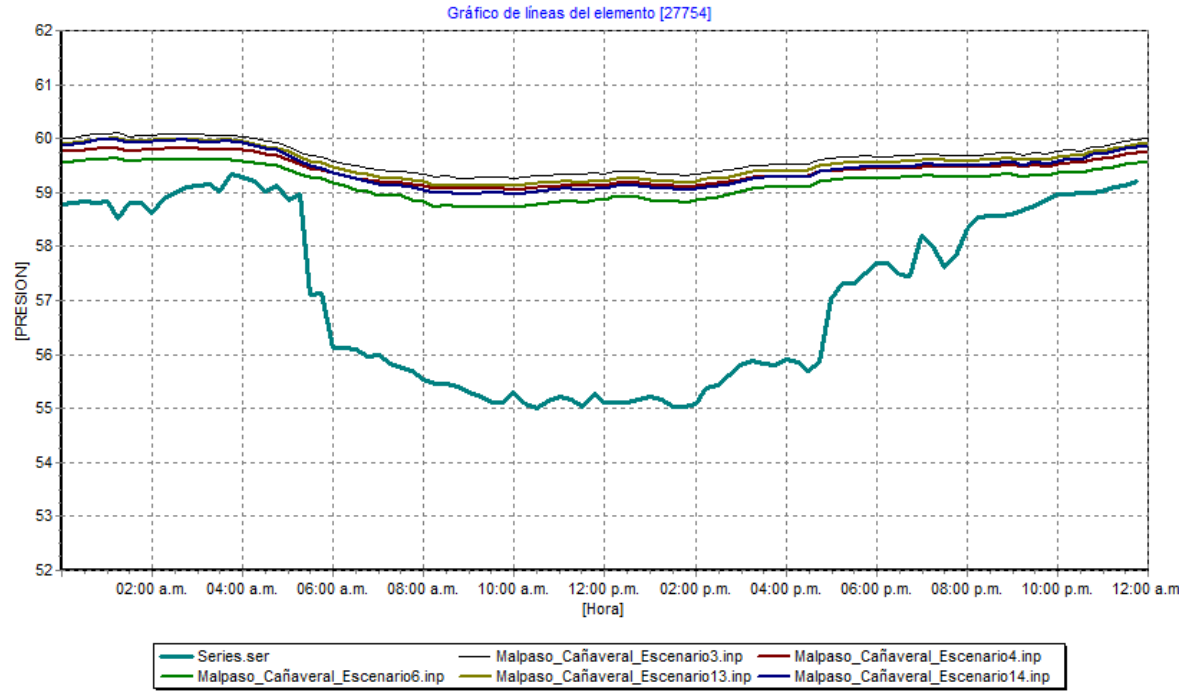


Gráfico de líneas del elemento [25678]

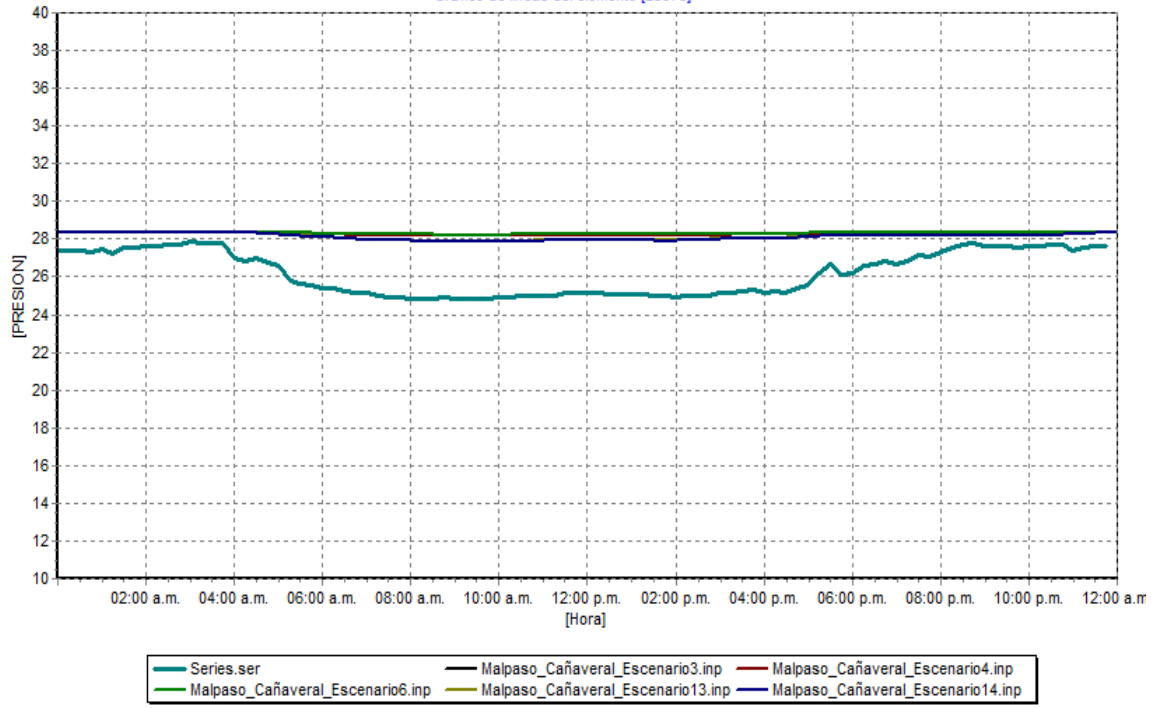


Gráfico de líneas del elemento [274918]

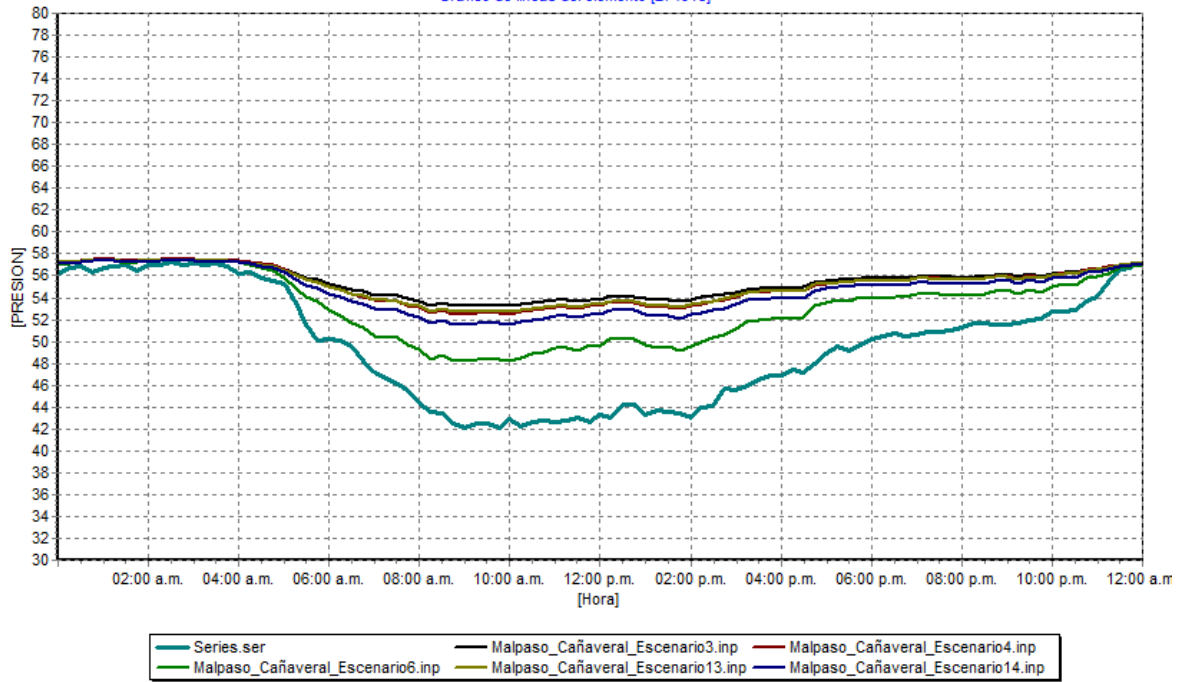


Gráfico de líneas del elemento [vf_274918]

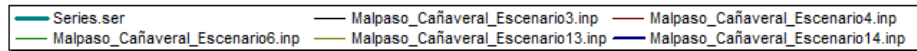
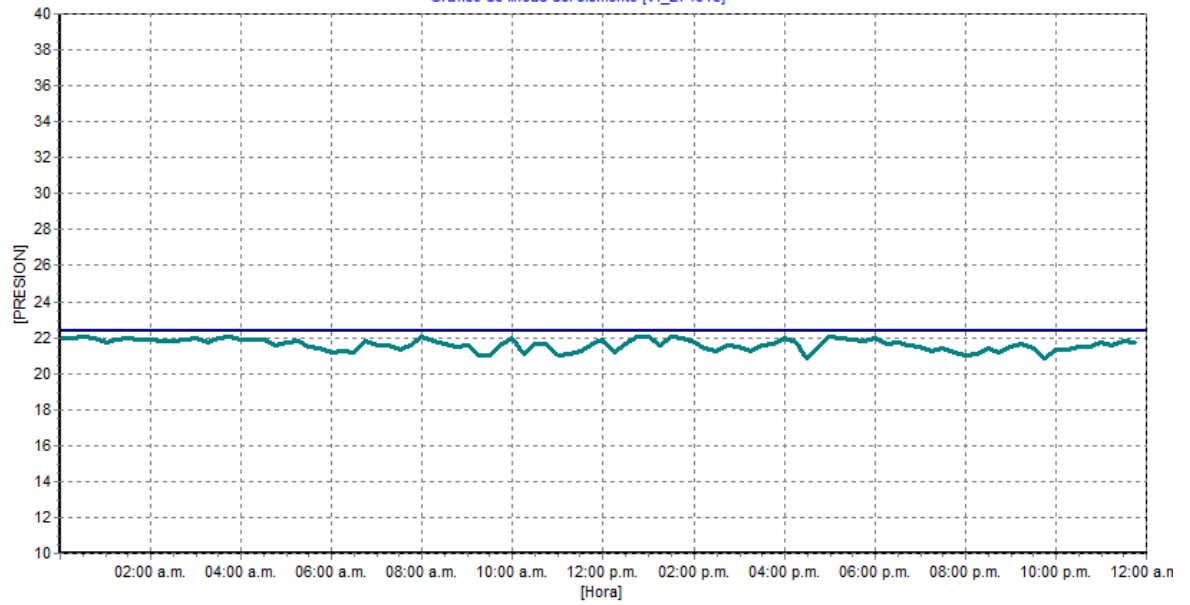
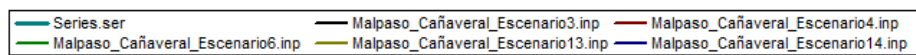
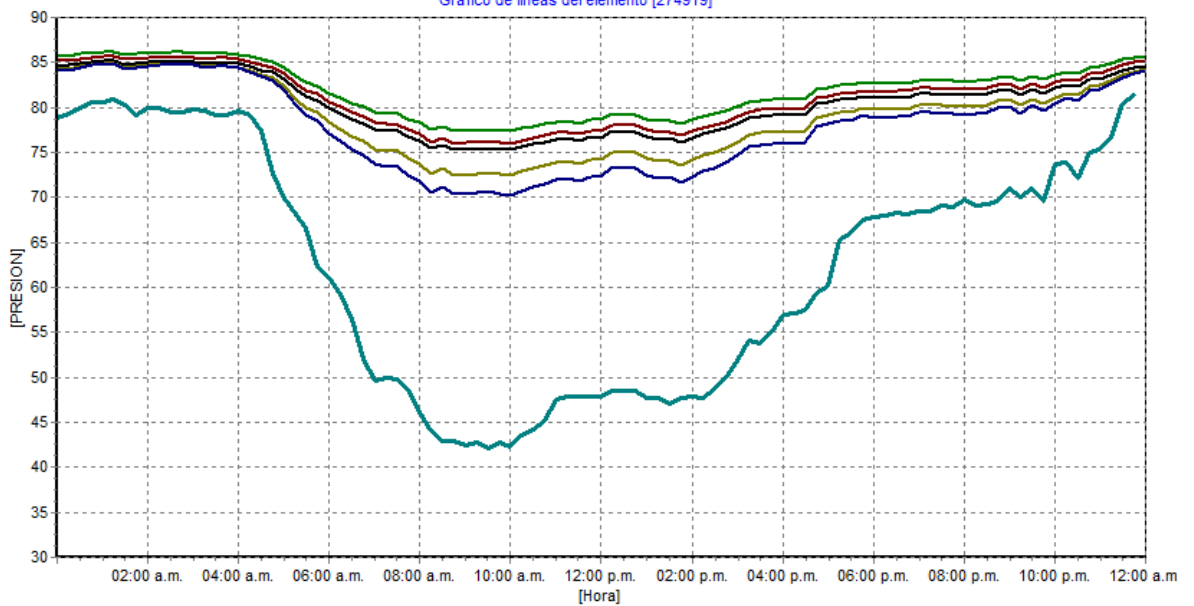
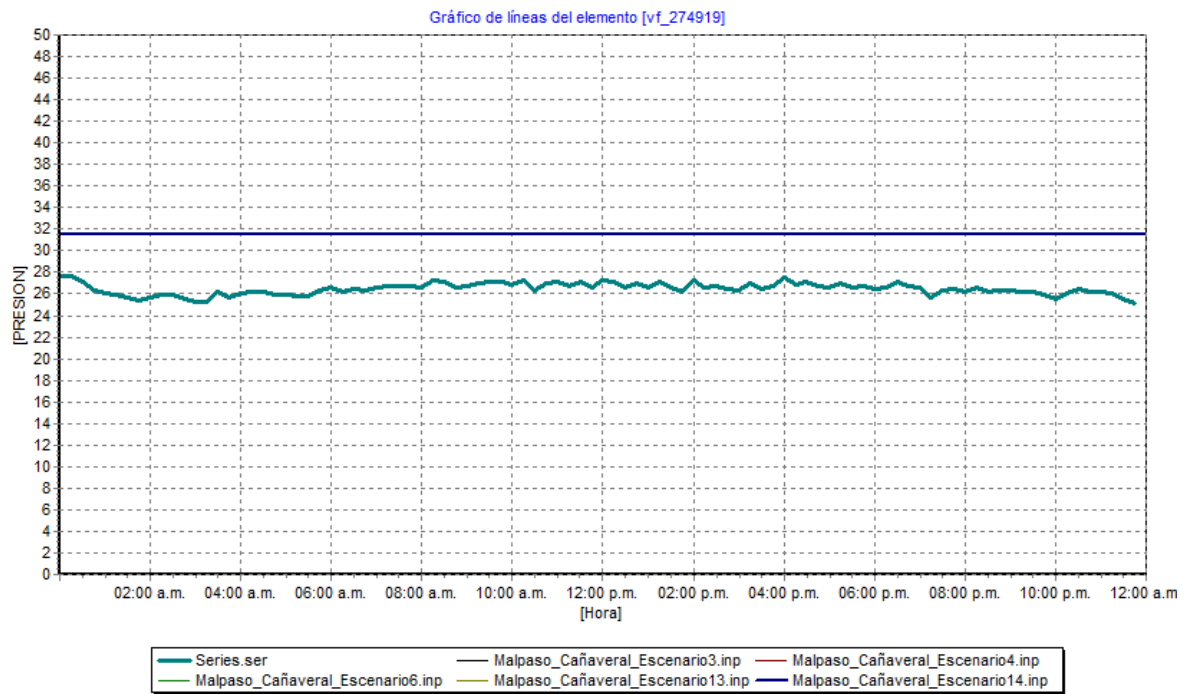
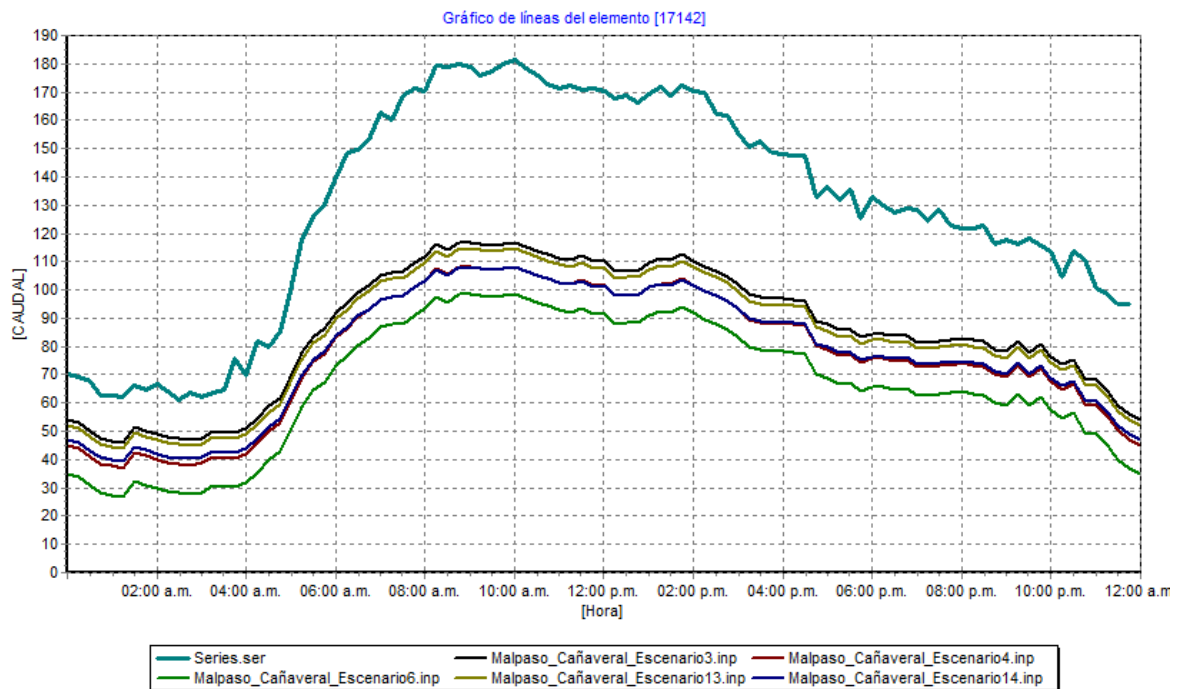


Gráfico de líneas del elemento [274919]





Caudal Escenarios Diámetros



Presión Pérdidas Menores

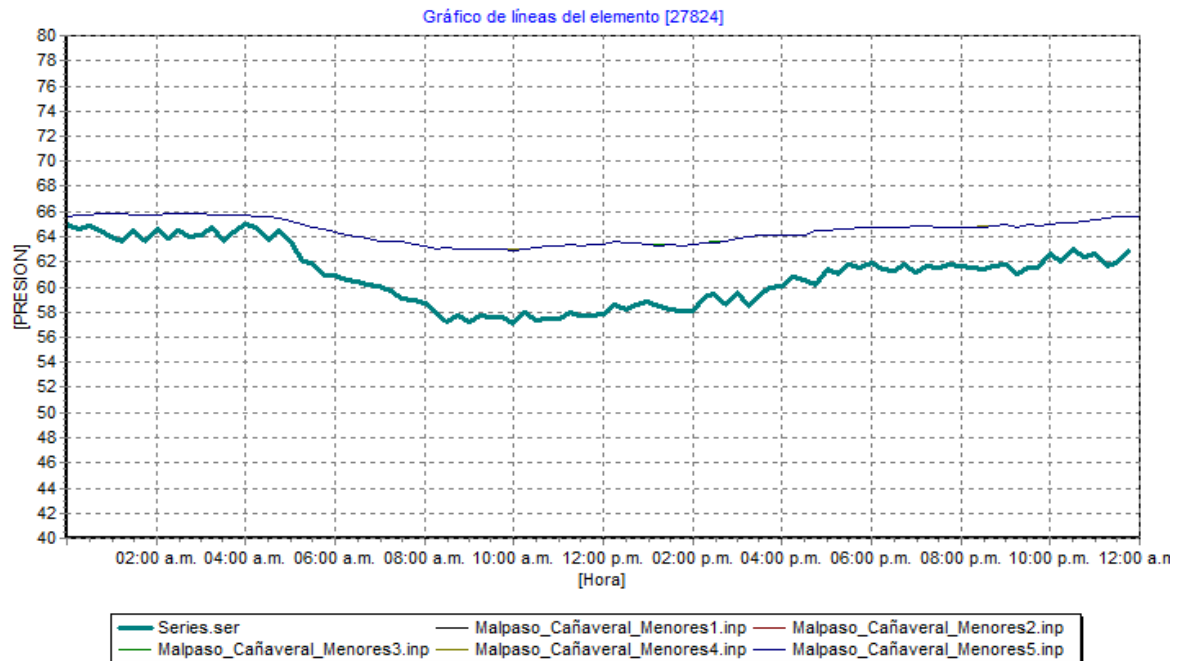
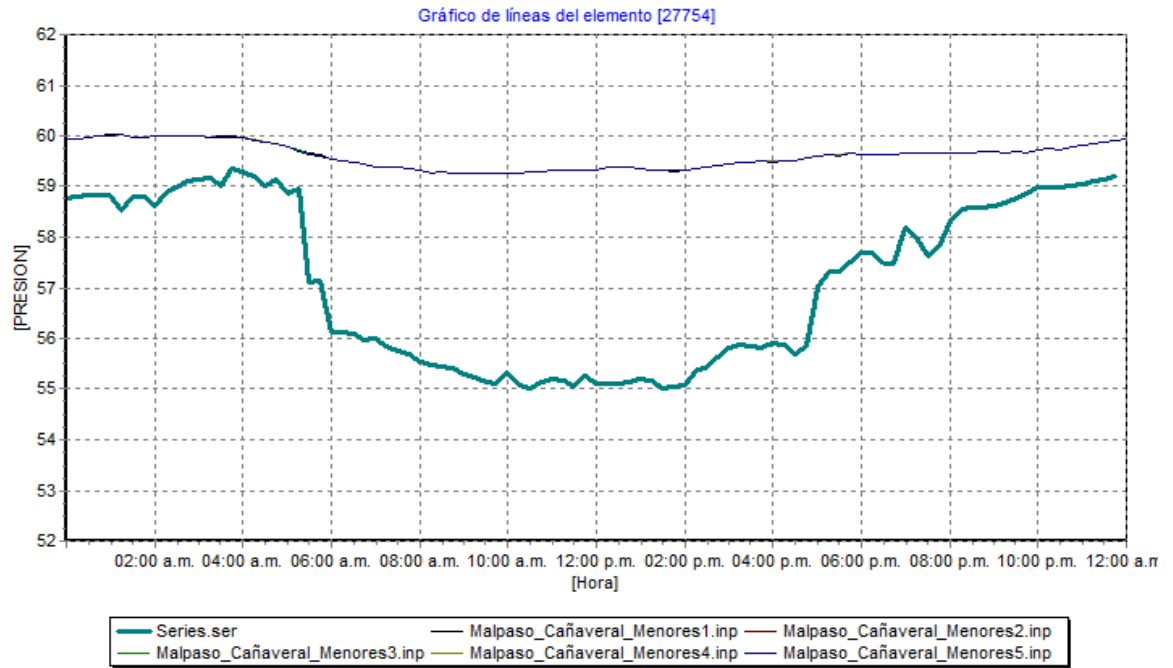


Gráfico de líneas del elemento [25678]

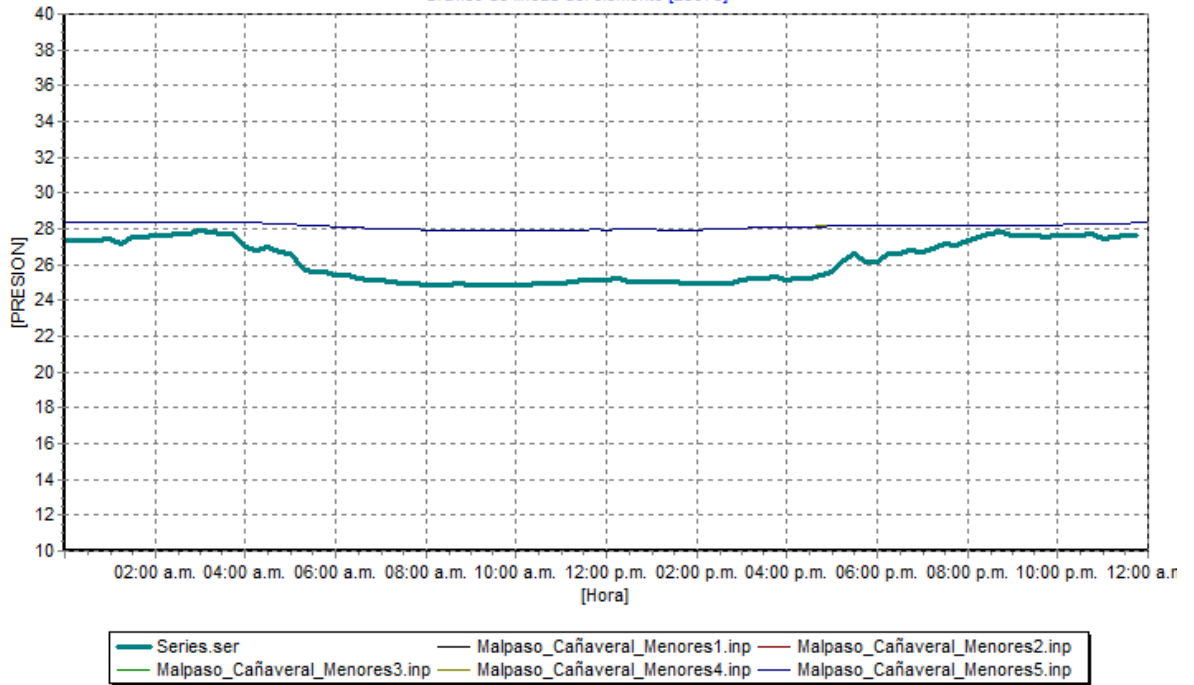


Gráfico de líneas del elemento [274918]

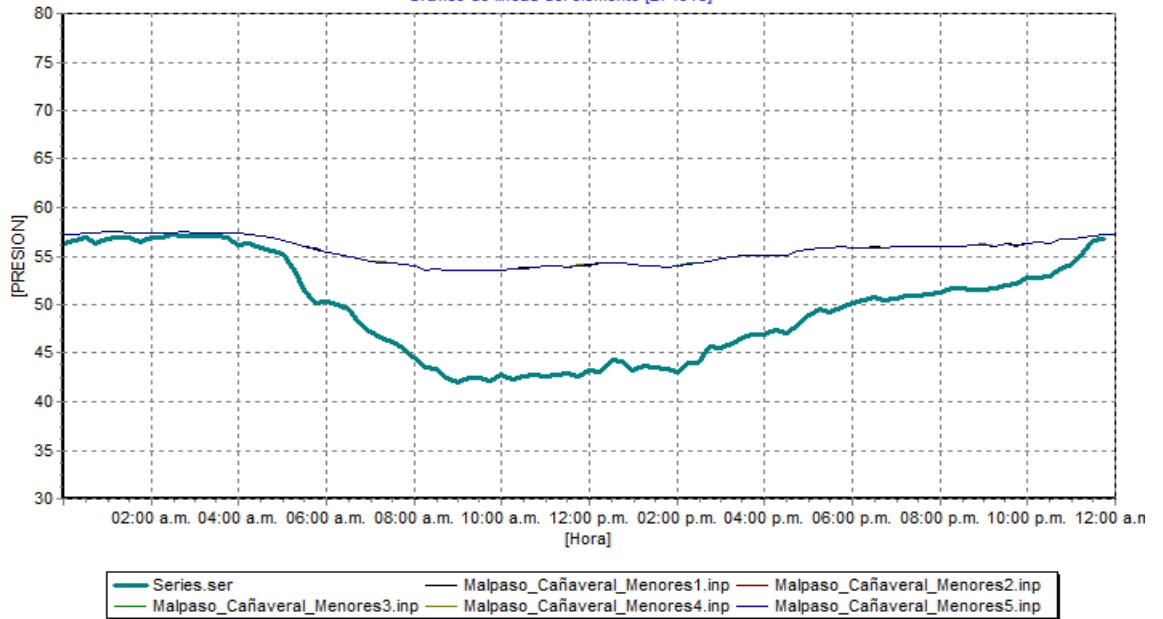


Gráfico de líneas del elemento [vf_274918]

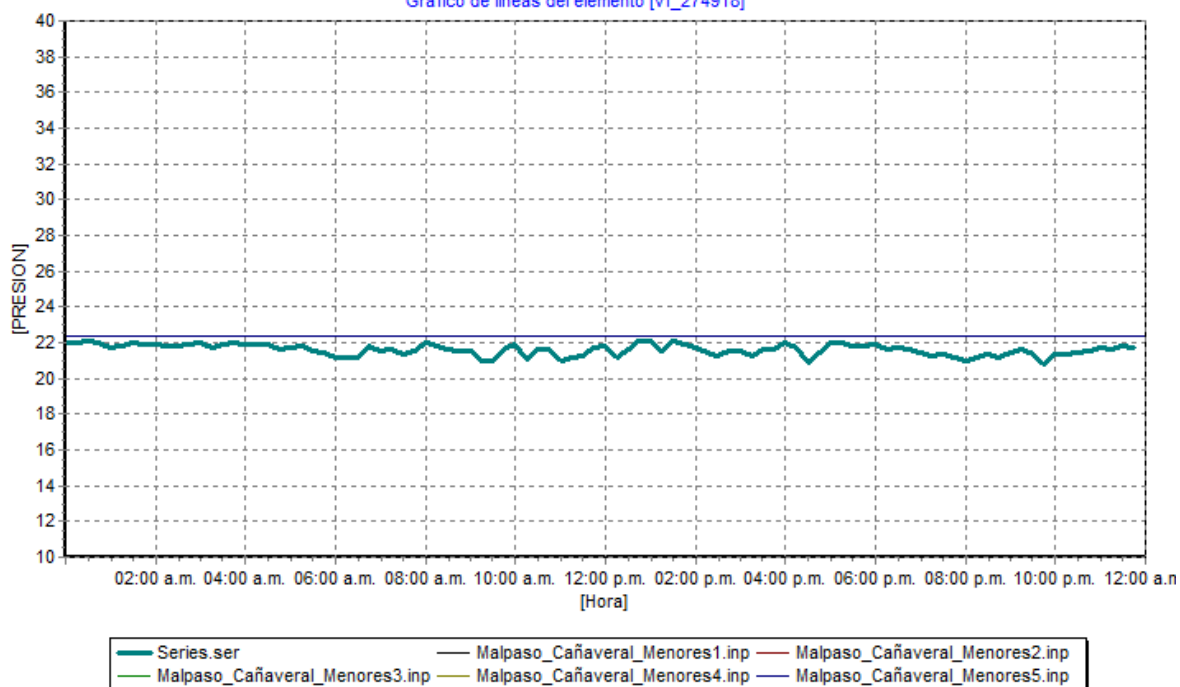
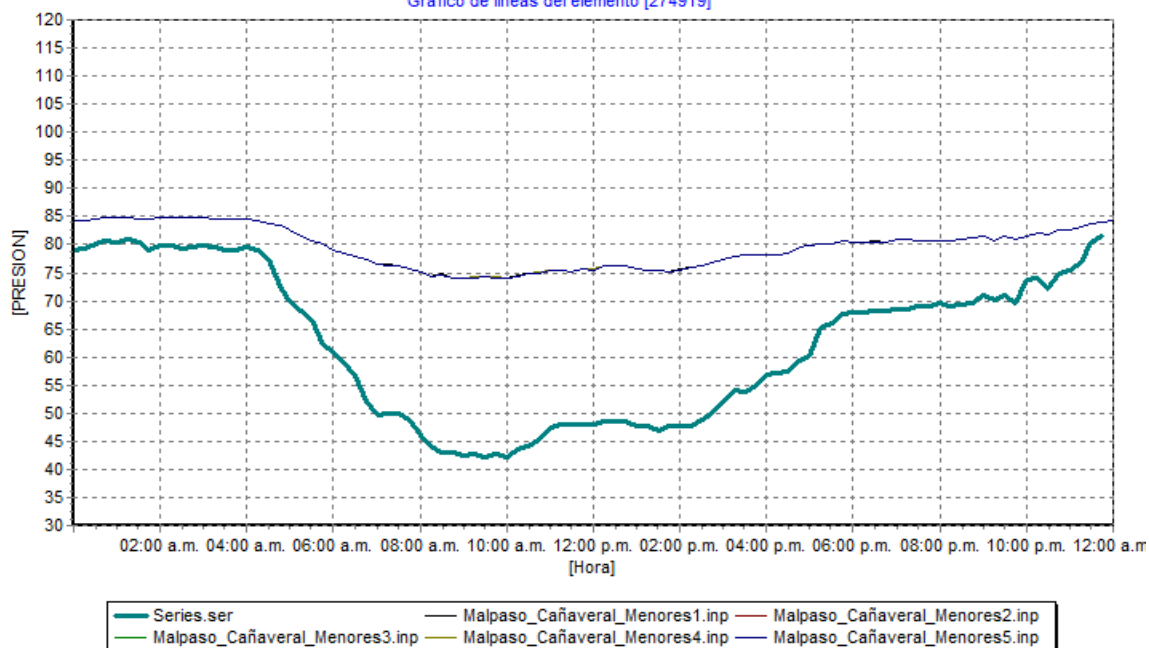
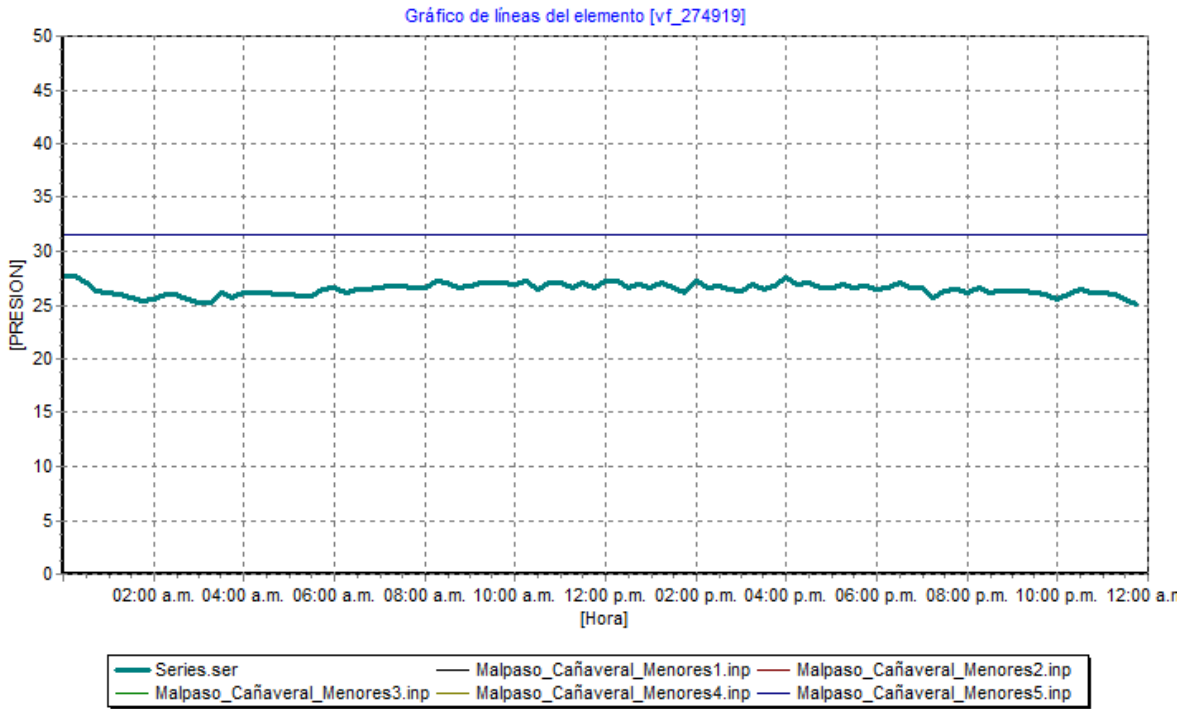
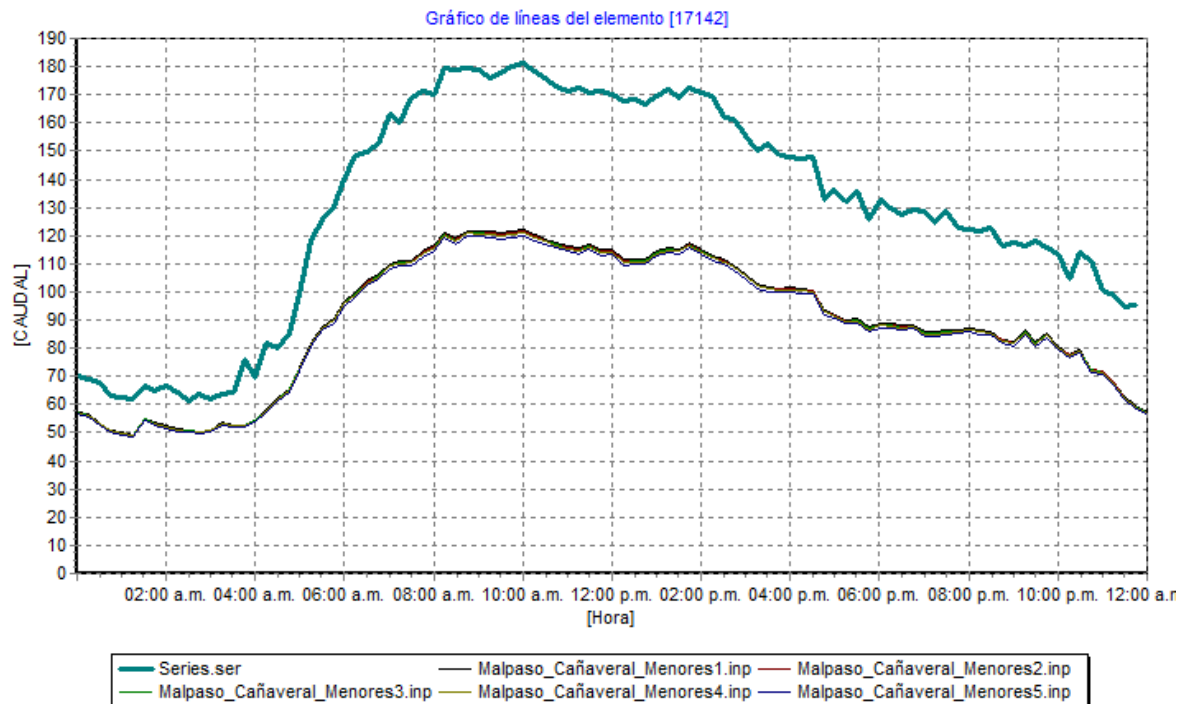


Gráfico de líneas del elemento [274919]





CAUDAL Pérdidas Menores



PRESIONES RUGOSIDADES

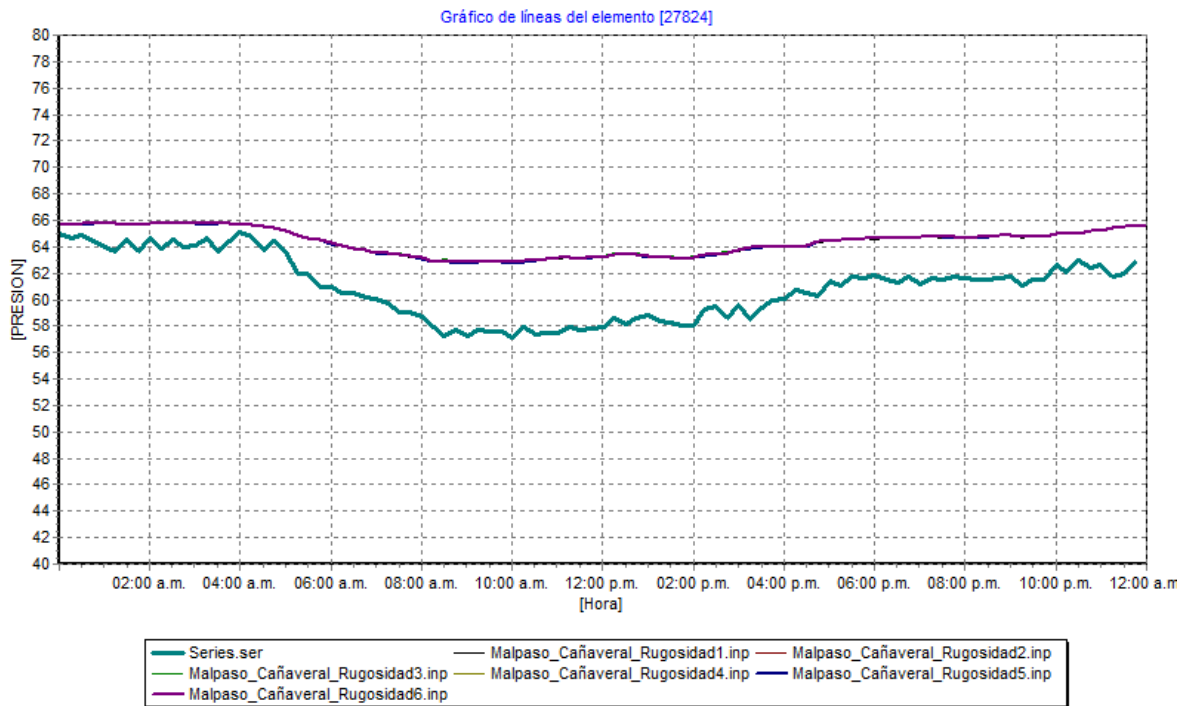
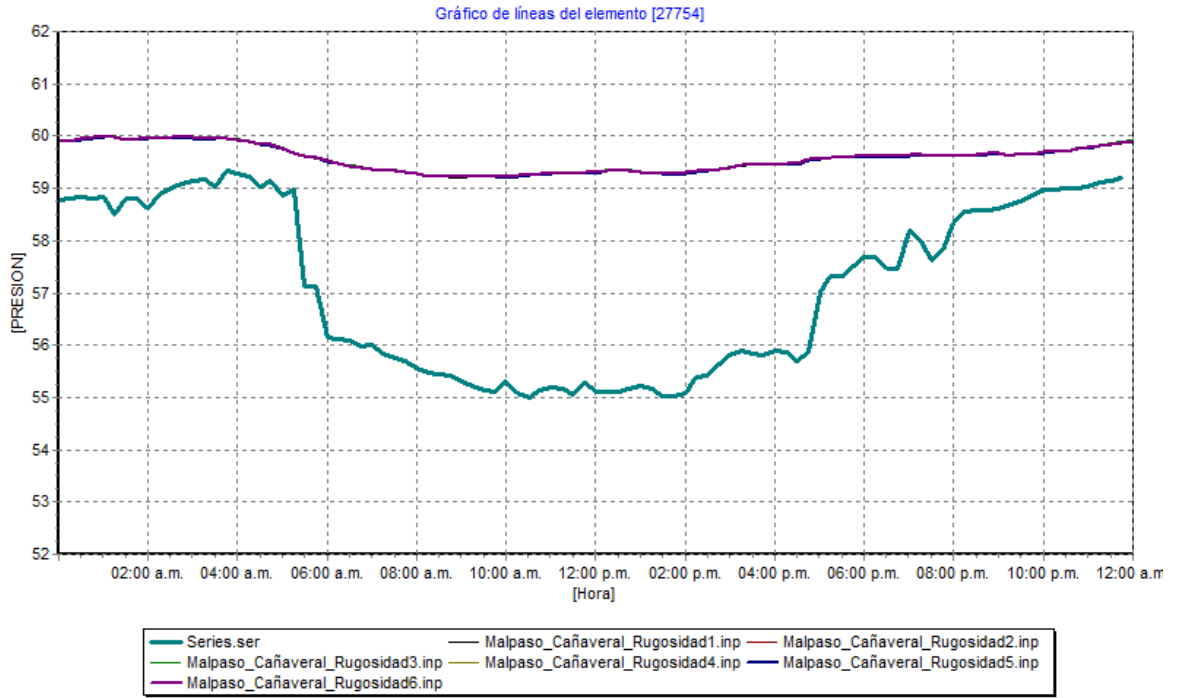


Gráfico de líneas del elemento [25678]

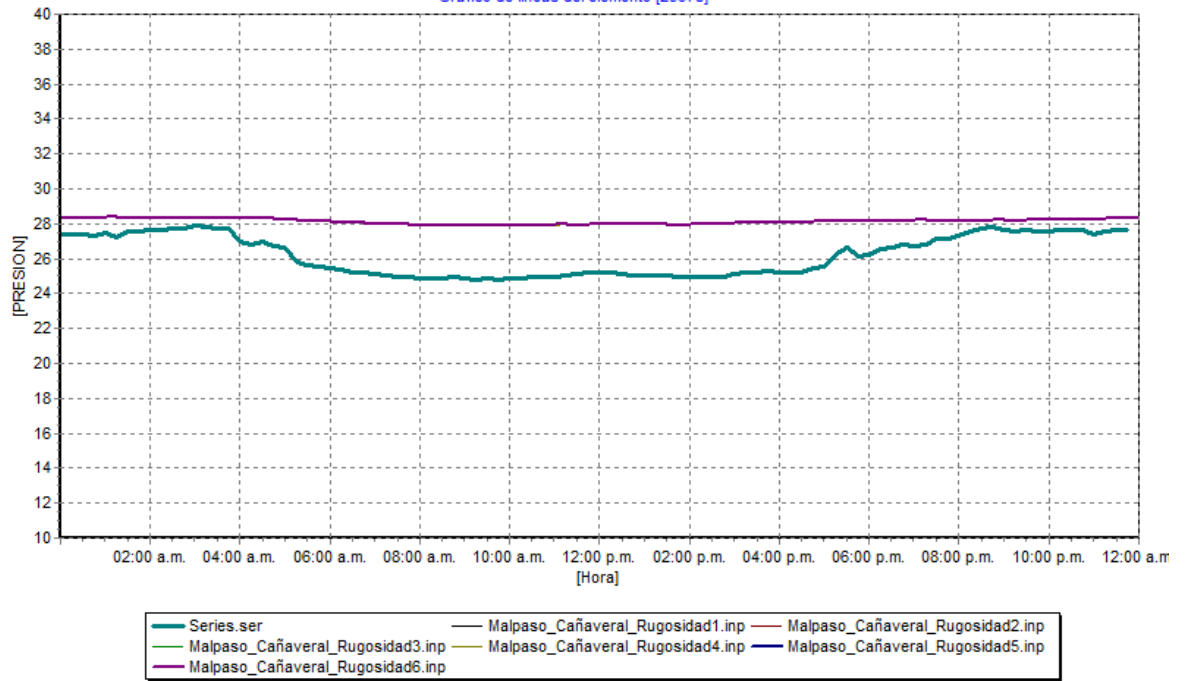


Gráfico de líneas del elemento [274918]

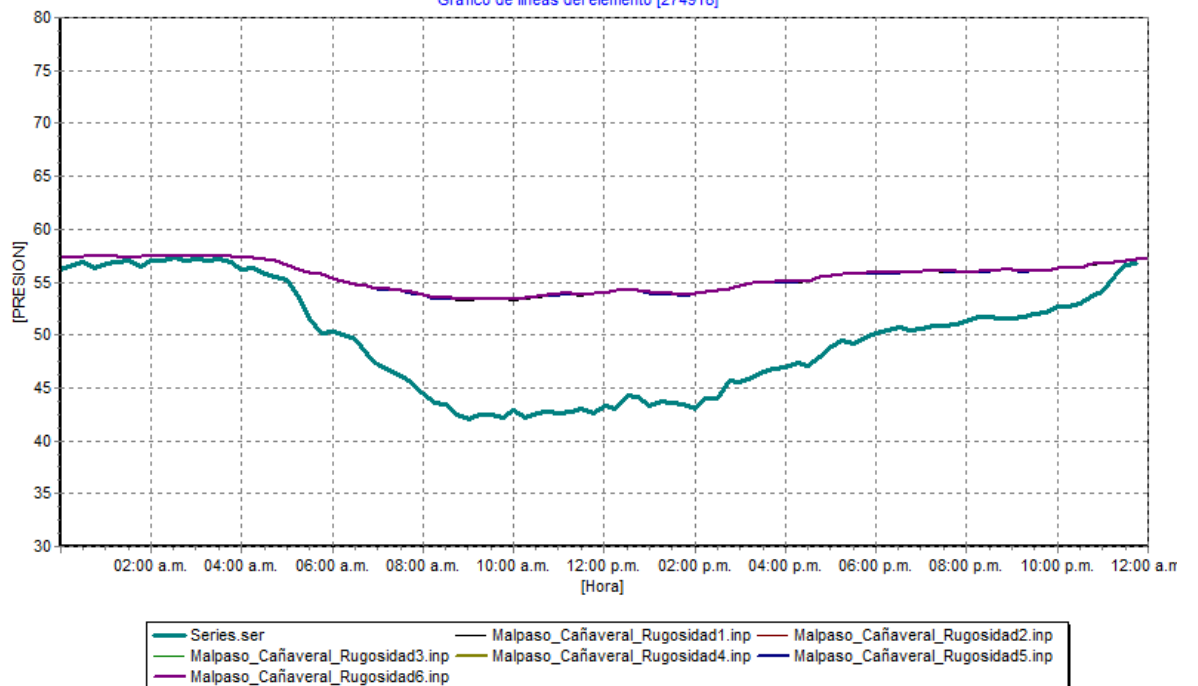


Gráfico de líneas del elemento [vf_274918]

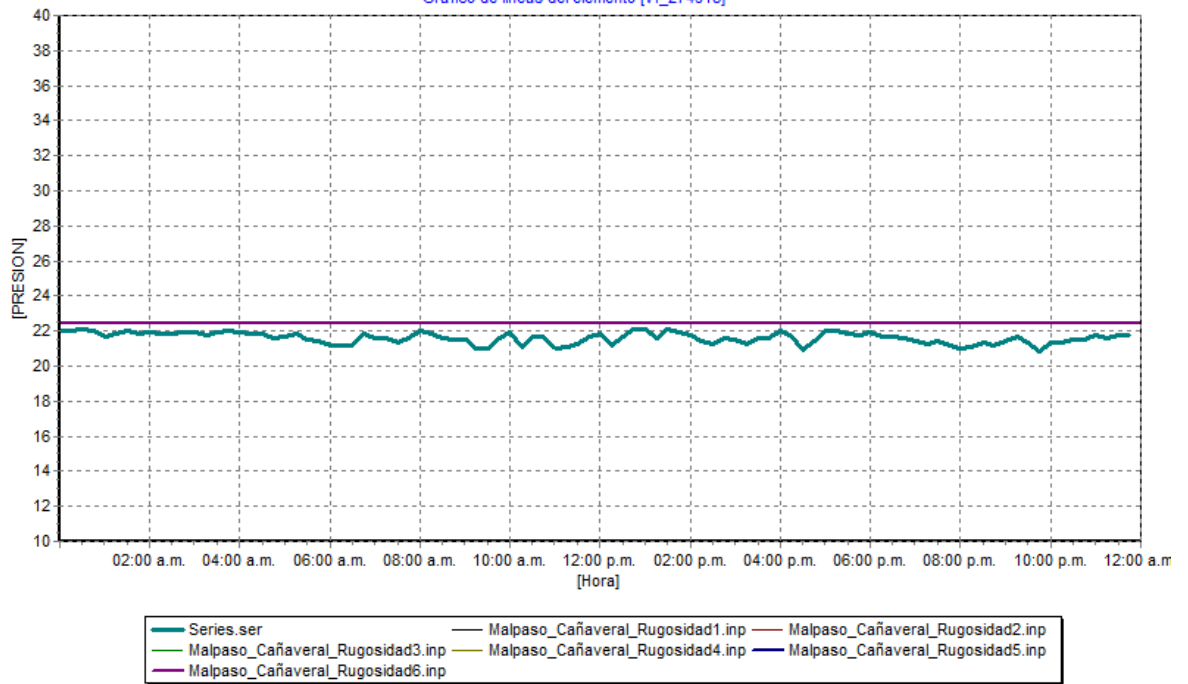
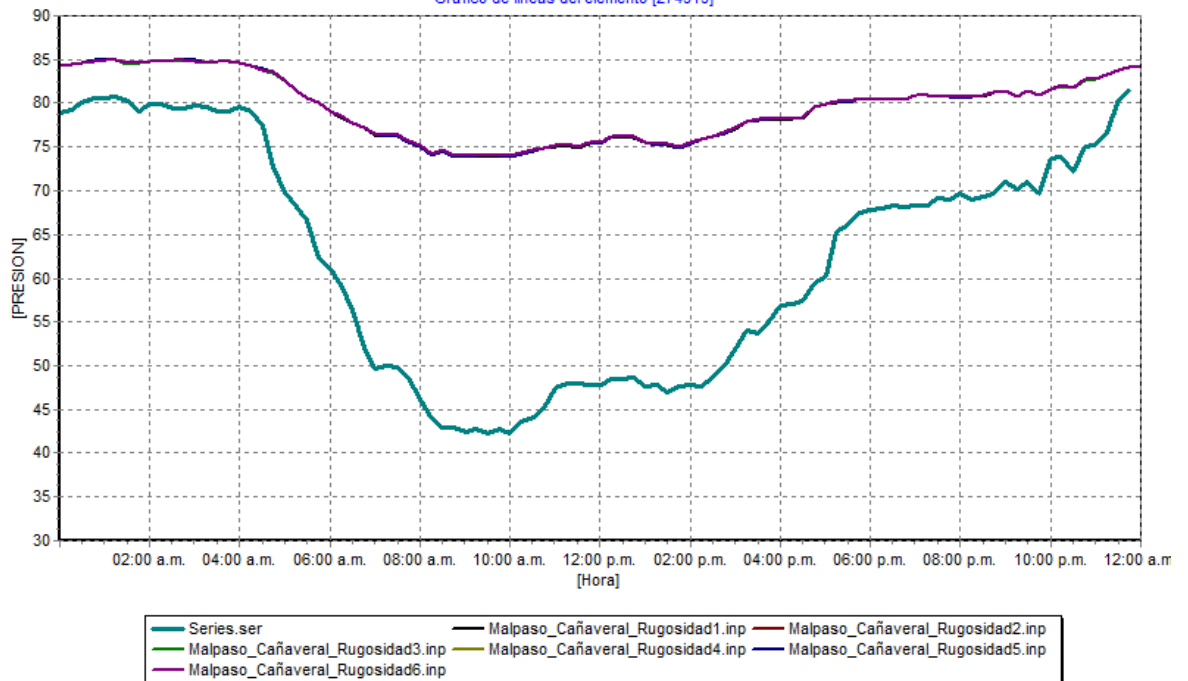
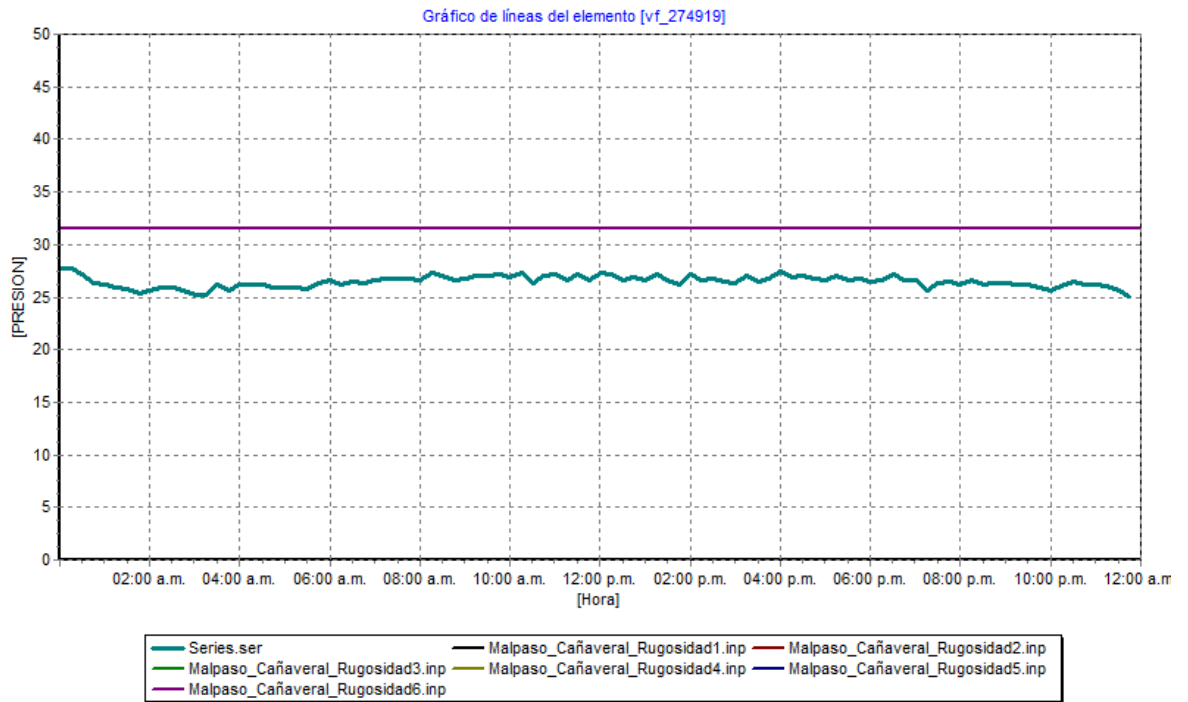


Gráfico de líneas del elemento [274919]





CAUDAL RUGOSIDADES

