

**MEJORAMIENTO DE LA RED DE DISTRIBUCION DEL SISTEMA DE
ACUEDUCTO AUACACT EN LA LOCALIDAD DE CIUDAD BOLIVAR MEDIANTE
MODELACION EN EPANET - BOGOTA D.C.**

ANDRES FELIPE GODOY ALVAREZ

GIRADU CIFUENTES CIFUENTES



UNIVERSIDAD CATÓLICA
de Colombia

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C – 2018

**MEJORAMIENTO DE LA RED DE DISTRIBUCION DEL SISTEMA DE
ACUEDUCTO AUACACT EN LA LOCALIDAD DE CIUDAD BOLIVAR MEDIANTE
MODELACION EN EPANET - BOGOTA D.C.**

ANDRES FELIPE GODOY ALVAREZ

GIRADU CIFUENTES CIFUENTES

Trabajo de grado para obtener el título de Especialista en Recursos Hídricos.

ASESOR: DIEGO ALEJANDRO PULGARIN

INGENIERO CIVIL

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C – 2018



Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:
Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

Para leer el texto completo de la licencia, visita:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra
hacer obras derivadas

Bajo las condiciones siguientes:



Atribución — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



No Comercial — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá D.C., diciembre de 2018.

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis principalmente a nuestros padres por todo su apoyo, ya que sin ellos no hubiéramos logrado llegar a este momento de nuestra carrera profesional ni culminar con éxito una etapa más de nuestra vida.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a las distintas personas que de una u otra manera han intervenido en nuestro camino durante la formación como especialistas en Recursos Hídricos, especialmente a nuestros compañeros de clase por todo el tiempo compartido, tutores y profesores por brindarnos sus enseñanzas y conocimiento, amigos y familiares por su incondicional apoyo, etc.

TABLA DE CONTENIDO

1	GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO	17
1.1	LÍNEA DE INVESTIGACIÓN.....	17
1.2	PLANTEAMIENTO Y ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	17
1.3	PREGUNTA DE INVESTIGACION	18
2	JUSTIFICACIÓN	19
3	TIPO DE INVESTIGACION O ALCANCE.....	20
4	OBJETIVOS.....	21
4.1	OBJETIVO GENERAL	21
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
5	PRODUCTOS A ENTREGAR	22
6	RESULTADOS ESPERADOS E IMPACTOS	24
7	ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN.....	25
8	MARCOS DE REFERENCIA	26
8.1	MARCO CONCEPTUAL	26
8.2	MARCO TEÓRICO	27
8.3	MARCO JURÍDICO	32
8.4	MARCO GEOGRÁFICO.....	33
8.5	MARCO DEMOGRÁFICO.....	35
9	METODOLOGÍA	36
9.1	FASES DE LA METODOLOGIA.....	36
9.1.1	<i>IDENTIFICACION Y PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA ACTUAL</i>	<i>36</i>
9.1.2	<i>RECOLECCION Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACION</i>	<i>36</i>
9.1.3	<i>IDENTIFICACION DE LA HERRAMIENTA DE MODELACION A USAR.....</i>	<i>37</i>
9.1.4	<i>IDENTIFICACION DE LA METODOLOGIA DE CALIBRACION A SEGUIR.....</i>	<i>37</i>
9.1.5	<i>MODELO INICIAL Y CURVAS DE CALIBRACION.....</i>	<i>39</i>
9.1.6	<i>CALIBRACION DEL MODELO INICIAL.....</i>	<i>39</i>

9.1.7	<i>ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LA CALIBRACION</i>	40
9.1.8	<i>MEJORAMIENTO DEL SISTEMA</i>	41
9.1.9	<i>ANALISIS DE RESULTADOS – MODELO CALIBRADO VS MODELO MEJORADO</i>	41
9.1.10	<i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</i>	41
10	INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS UTILIZADAS	42
11	GENERALIDADES A TENER EN CUENTA	46
12	CRITERIOS DE EVALUACION DE LA CALIBRACION	49
12.1	NIVELES ACEPTABLES DE CALIBRACIÓN	49
12.2	CRITERIOS DE CAUDAL	49
12.3	CRITERIOS DE PRESIÓN	49
13	ESTADO DEL ARTE	50
14	METODOS DE CALIBRACION - COMPARATIVO	55
15	CALIBRACION DEL MODELO Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA	61
15.1	MODELO INICIAL DE LA RED.....	61
15.1.1	<i>TOPOLOGIA Y TOPOGRAFIA DE LA RED</i>	61
15.1.2	<i>TOPOGRAFIA DE LA RED</i>	64
15.1.3	<i>ASIGNACION DE DEMANDAS INICIALES A LOS NODOS</i>	66
15.1.4	<i>MODELO INICIAL EN EPANET</i>	71
15.1.5	<i>PATRONES DE CONSUMO Y URVAS DE CALIBRACION</i>	72
15.2	CALIBRACION DEL MODELO INICIAL.....	87
15.2.1	<i>LINEA BASE 1 – CALIBRACION DE MASAS</i>	87
15.2.2	<i>LINEA BASE 2 – CALIBRACION DE ENERGIA</i>	99
15.3	ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL PROCESO DE CALIBRACION.....	104
15.3.1	<i>CALIBRACION DE MASAS:</i>	105
15.3.2	<i>CALIBRACION DE ENERGIA:</i>	106
15.4	ANALISIS DE RESULTADOS DE LA CALIBRACION.....	110
15.5	MEJORAMIENTO DEL MODELO CALIBRADO – ESCENARIOS CREADOS	113
16	CONCLUSIONES	116
17	RECOMENDACIONES	118
18	BIBLIOGRAFÍA	119

LISTA DE FIGURAS

ILUSTRACIÓN 1 - LOCALIDAD DE CIUDAD BOLÍVAR	33
ILUSTRACIÓN 2 - UPZ MOCHUELO BAJO	34
ILUSTRACIÓN 3 – POBLACIÓN Y DENSIDAD POBLACIONAL POR UPZ	35
ILUSTRACIÓN 4 – METODOLOGÍA CIACUA	38
ILUSTRACIÓN 5 – ENTORNO INTEGRADO DE WINDOWS CON EPANET	42
ILUSTRACIÓN 6 – ELEMENTOS FÍSICOS EN REDES DE EPANET	44
ILUSTRACIÓN 7 – DIAGRAMA GENERAL DEL ACUEDUCTO AUACACT	61
ILUSTRACIÓN 8 – PLANTA DE TRATAMIENTO Y TANQUE DE ALMACENAMIENTO	62
ILUSTRACIÓN 9 – CÁMARA DE QUIEBRE Y ESTACIÓN REDUCTORA DE PRESIÓN	63
ILUSTRACIÓN 10 - LOCALIZACIÓN DE LOS PUNTOS GPS ACUEDUCTO AUACACT	65
ILUSTRACIÓN 11 - TOPOGRAFÍA DEL ACUEDUCTO ACUACACT	66
ILUSTRACIÓN 12 – CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL MODELO INICIAL Y RED EN EPANET	71
ILUSTRACIÓN 13 - TOMA DE CAUDALES A LA SALIDA DEL TANQUE DE ABASTECIMIENTO	72
ILUSTRACIÓN 14 - CURVA PATRÓN DE CONSUMO HORARIO A LA SALIDA DEL TANQUE	78
ILUSTRACIÓN 15 – PATRÓN DE DEMANDA HORARIO EN EPANET	80
ILUSTRACIÓN 16 – PUNTOS DE MEDICIONES EN CAMPO EN LA RED DE ACUEDUCTO AUACACT	81
ILUSTRACIÓN 17 – MEDICIONES DE CAUDAL EN EL SECTOR PATICOS	82
ILUSTRACIÓN 18 – MEDICIONES DE CAUDAL EN EL SECTOR ESMERALDA	83
ILUSTRACIÓN 19 – CURVA DE CALIBRACIÓN POR CAUDAL EN EL PUNTO PATICOS	84
ILUSTRACIÓN 20 – CURVA DE CALIBRACIÓN POR CAUDAL EN EL PUNTO ESMERALDA	85
ILUSTRACIÓN 21 – TOMA DE PRESIONES REALES EN LAS CÁMARAS DE PRESIÓN	86
ILUSTRACIÓN 22 – CURVA DE CALIBRACIÓN DE PRESIONES	86
ILUSTRACIÓN 23 – NODOS EN ZONA VEREDAL Y NODOS EN ZONA URBANA	91
ILUSTRACIÓN 24 – GRUPOS DE NODOS POR RANGO DE PRESIONES EN LA RED	95
ILUSTRACIÓN 25 – RANGOS DE CAUDALES EN EPANET	100
ILUSTRACIÓN 26 – COMPARATIVO DE ESCENARIOS REAL VS MODELO INICIAL VS CALIBRADO POR DEMANDAS DESCONOCIDAS EN PUNTO PATICOS	107
ILUSTRACIÓN 27 - COMPARATIVO DE ESCENARIOS REAL VS MODELO INICIAL VS CALIBRADO POR DEMANDAS DESCONOCIDAS EN PUNTO ESMERALDA	108

ILUSTRACIÓN 28 - COMPARATIVO DE ESCENARIOS REAL VS MODELO INICIAL VS CALIBRADO POR DEMANDAS DESCONOCIDAS Y EMISORES EN PUNTO PATICOS	109
ILUSTRACIÓN 29 - COMPARATIVO DE ESCENARIOS REAL VS MODELO INICIAL VS CALIBRADO POR DEMANDAS DESCONOCIDAS Y EMISORES EN PUNTO ESMERALDA	109
ILUSTRACIÓN 30 – ALTAS PRESIONES EN DISTINTOS PUNTOS DE LA RED ACTUAL	110
ILUSTRACIÓN 31 – BAJAS VELOCIDADES DE FLUJO EN LAS TUBERÍAS.....	111
ILUSTRACIÓN 32 – VALORES DE PRESIÓN MEJORADAS EN EL ACUEDUCTO AUACACT	115

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 - PRODUCTOS A ENTREGAR EN EL TRABAJO DE GRADO	22
TABLA 2 - PRODUCTOS A ENTREGAR EN EL TRABAJO DE GRADO	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
TABLA 3 - RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES.....	30
TABLA 4 - COEFICIENTES DE PERDIDAS MENORES POR ACCESORIOS.....	31
TABLA 5 - COMPARATIVO DE MÉTODOS DE CALIBRACIÓN MAS IMPORTANTES.....	56
TABLA 6 – USUARIOS DEL ACUEDUCTO CON CONSUMOS, DIRECCIÓN Y NODO ASIGNADO	67
TABLA 7 – DEMANDAS INICIALES EN CADA NODO DEL SISTEMA	68
TABLA 8 – CAUDALES HORARIOS A LA SALIDA DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO	73
TABLA 9 – CAUDAL PROMEDIO A LA SALIDA DEL TANQUE.....	78
TABLA 10 – CALCULO DE VARIACIÓN HORARIA DE LA DEMANDA	79
TABLA 11 - CAUDALES EN EL MODELO INICIAL SIN CALIBRAR	80
TABLA 12 – CALIBRACIÓN DEL CAUDALIMETRO INSTALADO A LA SALIDA DEL TANQUE	81
TABLA 13 – VALORES DE CAUDALES REALES EN EL SECTOR PATICOS	83
TABLA 14 – VALORES DE CAUDALES REALES EN EL SECTOR ÉSMERALDA	84
TABLA 15 – VALORES DE PRESIONES REALES EN LAS CÁMARAS DE PRESIÓN	85
TABLA 16 – DEMANDAS CON IANC FRENTE AL NODO ASIGNADO	88
TABLA 17 – ESCENARIOS PARA CALIBRACIÓN DE MASAS POR DEMANDAS.....	92
TABLA 18 – CALIBRACIÓN DE MASAS POR DEMANDAS	93
TABLA 19 – MEJOR ESCENARIO DE CALIBRACIÓN DE MASAS POR DEMANDAS DESCONOCIDAS.....	94
TABLA 20 – GRUPOS DE PRESIONES PARA CALIBRACIÓN DE MASAS POR EMISORES.....	94
TABLA 21 – ESCENARIOS PARA CALIBRACIÓN DE MASAS POR EMISORES	96
TABLA 22 - CALIBRACIÓN DE MASAS POR EMISORES	97
TABLA 23 – MEJOR ESCENARIO PARA CALIBRACIÓN DE MASAS POR EMISORES	99
TABLA 24 – RANGOS POR CAUDAL DE TUBERIA PARA ESCENARIOS DE CALIBRACIÓN POR RUGOSIDADES	100
TABLA 25 – ESCENARIOS PARA CALIBRACIÓN POR RUGOSIDADES.....	101
TABLA 26 – CALIBRACIÓN DE ENERGÍA POR RUGOSIDADES	102
TABLA 27 – RESULTADOS DE CALIBRACIÓN DE MASAS POR DEMANDAS DESCONOCIDAS Y EMISORES.....	104

LISTA DE ECUACIONES

ECUACIÓN 1 DE BERNULLI	28
ECUACIÓN 2 DE DARCY - WEISBACH	28
ECUACIÓN 3 PARA CALCULAR LA F DE DARCY EN RÉGIMEN LAMINAR	29
ECUACIÓN 4 PARA CALCULAR LA F DE DARCY EN RÉGIMEN TURBULENTO	29
ECUACIÓN 5 DE COLEBROOK - WHITE	30
ECUACIÓN 6 PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS POR ACCESORIOS.....	31
ECUACIÓN 7 PARA CALCULO DEL IANC.....	87
ECUACIÓN 8 - VALOR DEL IANC DEL ACUEDUCTO AUACACT	87
ECUACIÓN 9 – FACTOR DE DEMANDA PARA AJUSTE DE CAUDAL DE LOS NODOS	87

RESUMEN

El presente proyecto surge de acuerdo a la problemática que presenta el Acueducto AUACACT en la localidad de Ciudad Bolívar (Bogotá), donde el suministro de agua potable es deficiente, lo que conlleva a pensar si se pueden mejorar las condiciones actuales del sistema abastecedor y consecuentemente enriquecer la calidad de vida de las personas afectadas.

Así bien, se realiza la modelación de las condiciones actuales del sistema recogiendo datos demográficos, topográficos, topológicos, consumos, caudales, presiones, entre otros, y a través del programa de simulación hidráulica EPANET se calibra la red de distribución del acueducto con el fin de identificar puntos críticos y zonas con problemas hidráulicos, como lo son presiones, altas o bajas, velocidades fuera de rangos normales, demandas irregulares, diámetros insuficientes o excesivos, entre otros. Todo este proceso de modelado se desarrolla bajo la norma técnica del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS) y de acuerdo a los lineamientos recogidos en la metodología CIACUA para calibraciones de redes de abastecimiento de agua potable.

Finalmente, con los resultados obtenidos en dos escenarios, actual y mejorado, se puede realizar un análisis cualitativo, comparando las condiciones reales que presentan inconsistencias frente a las condiciones que permitan mejorar el sistema y así concluir y establecer las acciones necesarias para dar solución a los problemas detectados.

Palabras clave: acueducto, distribución, caudal, presión, demanda, rugosidad, velocidad, modelación, calibración, EPANET, emisores, IANC, diámetro, nodos, tubería.

ABSTRACT

The present project arises in accordance with the problems presented by the aqueduct AUACACT in the city of Ciudad Bolívar, Bogotá, where the supply of drinking water is deficient, which leads to think if it is possible to improve the conditions of the supply system and in the same way quality of life of the people affected.

Thus, the modeling of the current conditions of the system is carried out, collecting demographic, topographic, topological, consumption, flow, pressures, among others, and through the EPANET hydraulic simulation program the distribution network of the aqueduct is calibrated in order To identify critical points and areas with hydraulic problems, such as high or low pressures, abnormal speeds, irregular demands, insufficient or excessive diameters, among others. All this modeling process is developed under the technical standard of the potable water and basic sanitation (RAS) sector and according to the guidelines included in the CIACUA methodology for calibrations of drinking water supply networks.

Finally, with the results obtained in two scenarios, current and improved, a qualitative analysis can be performed, comparing the real conditions that present inconsistencies with the conditions that allow improving the system, consequently being able to establish the necessary actions to solve the problems detected.

Key words: aqueduct, distribution, flow, pressure, demand, roughness, speed, modeling, calibration, EPANET, emitters, IANC, diameter, nodes, pipe.

INTRODUCCIÓN

El especialista en recursos hídricos de la actualidad debe orientar cada uno de sus trabajos hacia el uso adecuado del agua, buscando para ello soluciones técnicas y científicas a las diferentes problemáticas que se le presentan. En este sentido debe planear, diseñar y construir proyectos que cumplan con exigencias y normativas de calidad, sin descuidar la protección y preservación del medio ambiente, de tal forma que se logre la sostenibilidad del proyecto y del ambiente.

El fin primordial de un sistema de abastecimiento de agua es garantizar la continuidad en el servicio, con una presión adecuada y garantizando la calidad del agua suministrada durante el periodo de diseño proyectado. Los sistemas se diseñan en condiciones ideales, es decir, funcionando de acuerdo con las premisas del diseñador y se proyecta de modo que supla las necesidades de una población durante un periodo determinado. Cuando dichos sistemas no satisfacen los objetivos específicos que se estipularon y empiezan a presentarse falencias que afectan de algún modo el funcionamiento normal, ya sea por deterioro de los materiales, por falta de actividades que se debieron hacer inicialmente o por crecimiento de la población, se hace necesario evaluar y diseñar nuevas alternativas que puedan dar solución y así corregir el problema.

Con la realización de este trabajo se procura hacer un aporte al desarrollo social y mejorar la calidad de vida de la comunidad de Mochuelo Bajo, que hace parte de la zona semiurbana de la Localidad de Ciudad Bolívar de la ciudad de Bogotá, Cundinamarca, permitiendo resolver la problemática que ha venido surgiendo en la Asociación de Usuarios del Acueducto Aguas Calientes “AUACACT”.

La relevancia del problema en cuestión es considerable, ya que estamos tratando con un servicio vital para todo ser humano como lo es el agua. Por esta razón el trabajo se enfoca en evaluar y eliminar las deficiencias en el suministro actual del líquido, ya que presenta caudales y presiones inapropiadas en la red de distribución. El objetivo es mejorar el acueducto desde el punto

de salida del tanque de almacenamiento hasta el punto final que son los usuarios tanto de las casas como también para la industria ladrillera y un colegio que hay en la zona.

En consecuencia, se evaluaron las condiciones actuales de la red de distribución del Acueducto AUACACT, incluyendo topología, topografía, presiones, caudales, diámetros, demandas, desde el tanque de almacenamiento hasta las acometidas de las viviendas, resolviendo quizás uno de los principales inconvenientes para los ingenieros a la hora de simular una red real, que no es el diseño en si como se podría pensar inicialmente, sino la calibración del sistema, lo que permite realizar una modelación hidráulica en EPANET tanto en condiciones reales como mejoradas y de esta manera finalmente comparar y establecer criterios de valoración proporcionando alternativas de solución a la problemáticas encontradas.

1 GENERALIDADES DEL TRABAJO DE GRADO

1.1 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

El proyecto está definido por la línea de investigación de Saneamiento ambiental que incluye el diseño, construcción y optimización de sistemas de acueducto, alcantarillado, potabilización de agua, tratamiento de aguas residuales, tratamiento de lodos y disposición de residuos sólidos.

1.2 PLANTEAMIENTO Y ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

Si bien el país ha avanzado en gran medida en la construcción y ampliación de sistemas de suministro de agua potable, de transporte y tratamiento de las aguas servidas en las zonas rurales, es necesario garantizar que estos sistemas presten un servicio de calidad y de forma continua. El sistema de acueducto AUACACT en la localidad de Ciudad Bolívar, de acuerdo con lo indicado por los representantes de la asociación, se construyó en el año 2000, presta el servicio a mil doscientos diez (1210) suscriptores residenciales y a 10 suscriptores industriales, principalmente de la industria ladrillera, además de la población flotante.

Aunque el acueducto mejoró inmensamente la calidad de vida de los usuarios en el momento de su construcción y puesta en servicio, por el incremento desmedido en la población residente y flotante, se ha venido desmejorando las condiciones de presentación del servicio, evidentes en la intermitencia del suministro tanto en los periodos secos, como en los días de mayor consumo en algunos sectores, ya sea por la falta de presión o por la falta de agua.

Teniendo en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior, es necesario contar con una herramienta que simule la prestación del servicio en las condiciones actuales, además del comportamiento ante posibles afectaciones del sistema o el crecimiento de la población

beneficiada. De tal forma que se puedan encontrar alternativas de solución a dichas problemáticas, proyectando las inversiones requeridas para mejorar las condiciones de suministro.

1.3 PREGUNTA DE INVESTIGACION

¿Es posible mejorar las condiciones deficientes de la red de distribución de agua potable del Acueducto AUACACT en la localidad de Ciudad Bolívar?

2 JUSTIFICACIÓN

Consideramos que el actual trabajo es de vital importancia para la comunidad en general, ya que se enfoca en buscar soluciones a un problemática muy grave y recurrente en nuestro entorno, como lo es el consumo de agua de mala calidad y la falta de continuidad en el suministro de agua potable, lo que lleva a un detrimento en las condiciones de vida, por el incremento de enfermedades de origen hídrico al tener que recurrir a otras fuentes de suministro, el uso ineficiente del líquido y la contaminación de la naturaleza.

La construcción de los sistemas de acueducto se ve afectada por malos diseños, actos de corrupción en los que se eliminan componentes importantes del sistema para disminuir costos, un crecimiento desmesurado y desorganizado de la población, entre otros factores. En el caso del sistema de acueducto AUACACT, se evidencia la falta de componentes en el sistema, la expansión del sistema sin diseños, un incremento de la población y la falta de planeación.

3 TIPO DE INVESTIGACION O ALCANCE

La tesis que abordamos sigue dos tendencias o tipos de investigación, descriptiva y comparativa, ya que por un lado, describe el estado actual del sistema de acueducto AUACACT, donde se recogen datos de carácter topográfico, topológico, demográfico e hidráulico, dimensionando su comportamiento y como se manifiesta, pero al mismo tiempo pretende comparar dos escenarios distintos de un mismo sistema, calibrados y modelados matemáticamente a través de la plataforma EPANET, que finalmente nos permite comparar y aportar conclusiones y soluciones para el mejoramiento del acueducto.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal del proyecto es plantear un mejoramiento en el sistema de la red de abastecimiento de agua potable AUACACT de la localidad de Ciudad Bolívar en la ciudad de Bogotá que cumpla los requerimientos obligatorios determinados por la norma RAS, mediante escenarios realizados a partir de un modelo hidráulico calibrado el cual permita detectar los problemas actuales en la red y en consecuencia subsanarlos, formulando alternativas que puedan mejorar la prestación del servicio y por ende las condiciones de vida de la comunidad.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recolectar y clasificar toda la información necesaria topológica, topografía y de campo, con el fin de establecer un modelo hidráulico inicial y las curvas de calibración de caudal y presión como punto de partida.
- Efectuar la calibración de la modelación hidráulica inicial que permita reflejar las condiciones actuales de la red de distribución del acueducto
- Evaluar la sensibilidad de los parámetros que intervienen en el proceso de calibración y así mismo detectar de qué forma afectan el sistema.
- Evidenciar la problemática de acuerdo al modelo calibrado que justifica el cumplimiento o no de la norma de carácter obligatorio RAS, donde se detecten puntos con altas y/o bajas presiones y velocidades de flujo.
- Crear escenarios mejorados a partir de la modelación hidráulica calibrada de la red de distribución del acueducto AUACACT.
- Realizar un análisis con los resultados de las modelaciones en estado actual y en estado mejorado.
- Formular conclusiones y recomendaciones a tener en cuenta para el mejoramiento de la prestación del servicio y funcionamiento del sistema.

5 PRODUCTOS A ENTREGAR

En la Tabla 1 se relacionan los entregables por fases que se desarrollaran detalladamente en el transcurso del siguiente trabajo. La primera fase hace referencia a la recolección de datos proveniente de las entidades colaboradoras como la EAAB, SDHT y la Asociación de Usuarios de Acueducto Aguas Calientes (AUACACT), entre los que se destacan datos topográficos, topológicos, demográficos, catastrales, entre otros; las 3 siguientes fases son teóricas donde se selecciona el programa de simulación hidráulica más adecuado para utilizar, tomando como base la disponibilidad de información, la facilidad de acceso (licencias) y confiabilidad de resultados. Para lo cual se realiza un comparativo de los principales métodos de calibración existentes en nuestro medio, presentando las ventajas y desventajas, quedando a criterio de los autores del trabajo de grado, el más conveniente tomando como base los criterios antes mencionados.

En la fase de calibración y mejoramiento del sistema se entregará la modelación inicial, la cual representa el estado actual del sistema con su respectiva calibración, posteriormente se realizaran las recomendaciones para llegar al modelo mejorado, el cual se entregara y finalmente se creará un comparativos de los dos escenarios modelados, el cual será insumo para las conclusiones y recomendaciones.

Tabla 1 - Productos a entregar en el trabajo de grado

PRINCIPALES FASE DEL PROYECTO	ENTREGABLE
RECOLECCION DE INFORMACION	CARACTERISTICAS TOPOLOGICAS Y TOPOGRAFICAS DEL SISTEMA
	DEMANDAS FACTURADAS DE LOS USUARIOS Y CAUDALES A LA SALIDA DEL TANQUE
	MUESTREOS REALES DE CAUDAL Y PRESION EN VARIOS PUNTOS DE LA RED
ESTADO DEL ARTE	COMPARATIVO DE LOS PRINCIPALES METODOS DE CALIBRACION
HERRAMIENTA DE MODELACION	CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE EPANET

PRINCIPALES FASE DEL PROYECTO	ENTREGABLE
METODOLOGIA DE CALIBRACION	CARACTERISTICAS DE LA METODOLOGIA USADA
CALIBRACION Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA	MODELO INICIAL DE LA RED
	PATRONES Y CURVAS DE CALIBRACION
	MODELO CALIBRADO DE LA RED
	MODELO MEJORADO DE LA RED
	ANALISIS DE RESULTADOS MODELO CALIBRADO VS MODELO MEJORADO
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6 RESULTADOS ESPERADOS E IMPACTOS

Con el desarrollo del proyecto se espera encontrar puntos críticos que tengan deficiencias en la red de distribución del Acueducto AUACACT, es decir, encontrar puntos con presiones inadecuadas, diámetros insuficientes, problemas hidráulicos, velocidades inapropiadas, concentraciones de cloro por fuera de la norma, entre otras problemáticas. Teniendo en cuenta que al identificar los eventos mencionados, se pueden evaluar y buscar soluciones a las problemáticas planteadas.

De acuerdo a lo anterior se generaría un impacto positivo para la población, mejorando las condiciones de vida de las personas, tanto de los habitantes lugareños como también todo el personal que labora y visita la zona, y finalmente dejando una herramienta de planeación y toma de decisiones para los administradores y personal operativo del acueducto.

7 ESTRATEGIAS DE COMUNICACIÓN

Para dar a conocer el desarrollo y los resultados obtenidos del proyecto, se dejará por escrito y en medio digital el trabajo realizado en la Universidad Católica de Colombia para la consulta por parte de cualquier persona interesada, de igual forma se entregará una copia escrita y digital del trabajo a los representantes de la Asociación de Usuarios de Acueducto Aguas Calientes y asimismo a las entidades distritales que de una u otra forma apoyan al prestador.

Además, se realizará una exposición a modo de sustentación del trabajo de grado para cumplir con los requisitos y optar al título de Especialista en Recursos Hídricos de la Universidad Católica de Colombia.

8 MARCOS DE REFERENCIA

8.1 MARCO CONCEPTUAL

Un acueducto es un sistema o conjunto de sistemas de irrigación que permite transportar agua en forma de flujo continuo desde un lugar en el que está accesible en la naturaleza hasta un punto de consumo distante, generalmente una ciudad o poblado. Está compuesto por una captación o bocatoma desde donde se transporta el agua hasta el punto deseado. Este transporte se divide en aducción que incluye la red desde la bocatoma pasando por el desarenador hasta la planta de tratamiento y la conducción que es la red desde la planta de tratamiento hasta el tanque de almacenamiento. Finalmente, por la red distribución llega el agua potable hasta las casas de los usuarios, más comúnmente conocido como acometidas, mediante el uso de mangueras en polietileno. (RIAÑO, 2015)

Como es un sistema, por definición, es necesario que todas sus partes cumplan su función y estén interrelacionados, pero en determinadas ocasiones los acueductos pueden quedar obsoletos si cumplen con su periodo de vida o simplemente su diseño y construcción no fue la adecuada, por lo que en algún momento durante su funcionamiento pueden presentar problemas de suministro deficiente ocasionados por presiones, demandas y velocidades altas o bajas. En estos casos es pertinente realizar una descripción topológica y un análisis hidráulico con el fin de reconocer el problema y solucionarlo.

El proceso de calibración es una de las actividades más importantes y de vital importancia para el trabajo ya que consiste en la recolección de datos de campo que alimentaran la simulación con el fin de aproximarla a las condiciones reales y así de esta manera obtener diferentes resultados como poder investigar la calidad de operación del sistema, medir la fiabilidad de los instrumentos de medición, detectar zonas problemáticas en la red, detectar zonas con altas y mayores fugas,

cálculos y modelaciones hidráulicas y de calidad de agua, ubicar pérdidas de energía y masa, entre otras (SALDARRIAGA, HIDRAULICA DE TUBERIAS, 1998).

Existen diferentes programas por computador que permiten realizar una simulación hidráulica y modelar escenarios muy cercanos a la realidad que integran todas las variables, parámetros, topología y características que pueda tener un acueducto ya sean tuberías, nodos, válvulas, tanques, etc. Un programa muy intuitivo y mundialmente utilizado es el EPANET el cual es de dominio público y es desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. El programa es capaz de trabajar con períodos de simulación sobre hidráulica y el comportamiento de la calidad de las aguas dentro de una red presurizada, además de estar diseñado para ser una herramienta de investigación que mejore nuestro conocimiento del movimiento y destino del agua potable y sus constituyentes en una red de aguas. (ROSSMAN, 1993)

8.2 MARCO TEÓRICO

Para la optimización del sistema hidráulico de la red de distribución del Acueducto AUACACT en la localidad de Ciudad Bolívar, objeto de estudio de la tesis que se presenta, se tomó como referencia los conceptos teóricos de aplicación para el diseño de acueductos de agua potable en Colombia, Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000 que consigue ser el hilo conductor principal de todo el trabajo ingenieril y es el manual que indica las buenas prácticas, establece criterios y recomendaciones de diseño, construcción, supervisión, interventoría, operación y mantenimiento inherente a cualquier sistema de agua potable y saneamiento básico (RAS, 2000).

Dentro de este marco es primordial nombrar la aplicación del método de Cross que tiene como principio dos leyes fundamentales, la ley de continuidad de la masa en los nodos y la ley de la conservación de la energía en las tuberías, “la suma algebraica de los caudales másicos (o volumétricos, ya que el fluido es incompresible) que confluyen en el nudo debe ser 0”.

La energía por unidad de peso en una determinada sección consta de tres componentes y relaciona la presión, la velocidad y la altura de dos puntos cualesquiera (1 y 2) en un fluido con flujo laminar constante (khanacademy, 2007) como lo recoge la ecuación 1.

$$E_1 + h_b = E_2 + h_{1-2}$$

$$E = \frac{P}{\gamma} + Z + \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 1 de Bernulli

P/γ : cabezal de presión
 Z : cota geométrica.
 $v^2/2g$: cabezal de velocidad

Siguiendo los fundamentos hidráulicos debemos tener en cuenta la ecuación 2 universal de conductos a presión y tuberías con un diámetro interior continuo que proporciona una base racional para el análisis y el cálculo de las pérdidas por fricción en una tubería. En el uso de esta teoría es imprescindible tener en cuenta las ecuaciones de Darcy y Colebrook para el cálculo de las pérdidas por fricción en la tubería.

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

Ecuación 2 de Darcy - Weisbach

h_f = pérdida por fricción.
 f es el factor de fricción de Darcy(adimensional).
 d es el diámetro (m).
 g es la gravedad (m/s²).
 l es la longitud (m).
 v es la velocidad (m/s).

El factor de fricción f de la fórmula de Darcy-Weisbach se calcula, según el tipo de régimen, con uno de los siguientes métodos:

- Para flujo laminar ($Re < 2.000$) emplea la fórmula de Hazen-Poiseuille, indica que para flujo laminar en tuberías el factor de fricción únicamente es función del número de Reynolds. En este caso, la rugosidad relativa del ducto no influye en las pérdidas por fricción como se muestra en la ecuación 3.

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

Ecuación 3 para calcular la F de Darcy en régimen laminar

- Para flujo turbulento ($Re > 4.000$) emplea la aproximación explícita de Swamee y Jain a la fórmula de Colebrook-White mediante la siguiente ecuación 4:

$$f = \frac{0.25}{\left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon}{3.7d} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2}$$

Ecuación 4 para calcular la F de Darcy en régimen turbulento

1 Para el flujo de transición ($2000 < Re < 4000$) aplica una interpolación Cúbica al diagrama de Moody.

Como el factor de fricción es una función no explícita del número de Reynolds y de la rugosidad relativa, se genera la siguiente ecuación 5:

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

Ecuación 5 de Colebrook - White

ks: es la rugosidad absoluta (m).

d: Es el diámetro (m).

El hecho de que la anterior ecuación sea no explícita para el factor de fricción f implica que la solución de problemas de tuberías debe incluir métodos numéricos iterativos. Teniendo en cuenta lo anterior, es importante tener una lista de rugosidades de materiales con el fin de alimentar la ecuación. Los materiales más comunes son los que se relacionan en la Tabla 2.

Tabla 2 - Rugosidad absoluta de materiales

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	ϵ (mm)	Material	ϵ (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06 - 0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12 - 0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03 - 0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03 - 0,09
Fundición revestida de cemento	0,002	Hierro galvanizado	0,06 - 0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18 - 0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3 - 3,0

Fuente: (SALDARRIAGA, HIDRAULICA DE TUBERIAS , 2007)

La ecuación 6 para el cálculo de las pérdidas menores de energía causada por los accesorios en una tubería es de la siguiente forma:

$$h_m = K_m \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 6 para el cálculo de pérdidas por accesorios

h_m es el valor de pérdida por accesorios.

K_m es el coeficiente de pérdidas menores en el accesorio.

En la Tabla 3 se muestra un resumen de coeficientes de pérdidas menores para accesorios de uso frecuente en sistema de tuberías.

Tabla 3 - Coeficientes de perdidas menores por accesorios

Coeficiente de pérdidas (Ks)	
Válvula esférica, totalmente abierta	K = 10
Válvula de ángulo, totalmente abierta	K = 5
Válvula de retención de clapeta	K = 2,5
Válvula de pié con colador	K = 0,8
Válvula de compuerta, totalmente abierta	K = 0,19
Codo de retroceso	K = 2,2
Empalme en T normal	K = 1,8
Codo de 90° normal	K = 0,9
Codo de 90° de radio medio	K = 0,75
Codo de 90° de radio grande	K = 0,60
Codo de 45°	K = 0,42

Fuente: (SALDARRIAGA, HIDRAULICA DE TUBERIAS , 2007)

8.3 MARCO JURÍDICO

Sin duda uno de los principales establecimientos jurídicos se encuentra en la Constitución Política de Colombia (artículos 365 a 370) en donde se le entrega al estado la responsabilidad fundamental de asegurar la prestación eficiente de los servicios públicos en todo el territorio, sin embargo, el cuerpo legislativo que limita y rige este proyecto se enmarca en la ley 142 de 1994 que instrumenta la prestación de servicios públicos domiciliarios, regulación, cobertura, calidad, financiación y régimen tarifario, con criterios de solidaridad y redistribución de ingresos.

La ley 373 de 1997 establece el programa de uso eficiente y ahorro del agua. Mediante la resolución 2320 del 2009 se establecen las dotaciones netas máximas permitidas, la resolución 215 del 2007 en la que se disponen características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua de consumo humano y en donde se implementa un parámetro llamado IRCA.

El ministerio de desarrollo económico le confiere carácter oficial y obligatorio en todo el territorio nacional en lo dispuesto en el reglamento técnico RAS – 2000, en especial al título A y B para que se cumplan los requisitos, procedimientos y practicas contenidas y mencionadas.

El reglamento 1575 del 2007 expedido por el Ministerio de salud y desarrollo económico se refiere a las normas técnicas de calidad de agua potable y vertimientos a los cuerpos de agua contenidos.

Los decretos 3050 del 2013 en el cual se establecen las condiciones para el trámite de las solicitudes de viabilidad y disponibilidad de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado.

8.4 MARCO GEOGRÁFICO

De acuerdo con la Secretaria de Gobierno de Bogotá D.C., la localidad de Ciudad Bolívar es la numero 19, ver Ilustración 1, de las 20 localidades que conforman el Distrito Capital y está

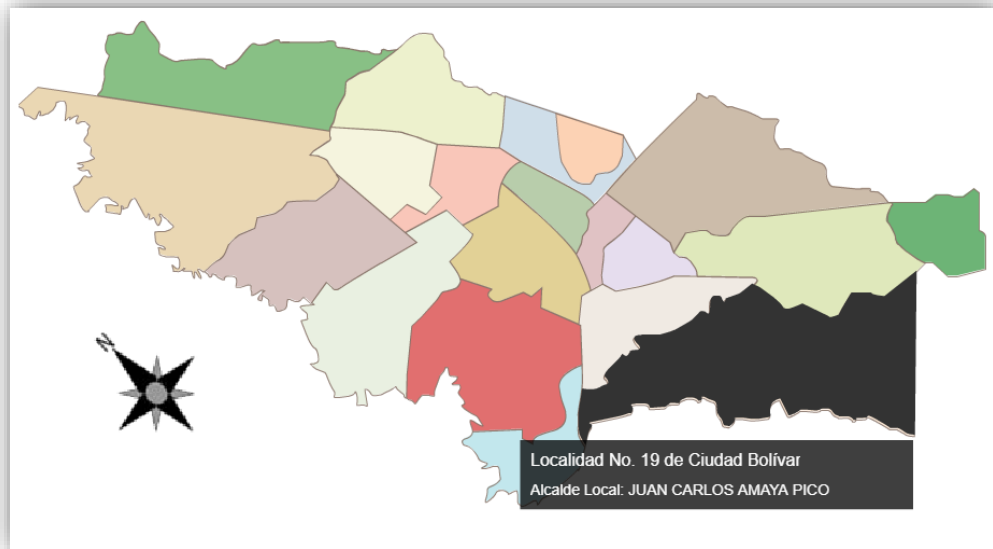


Ilustración 1 - Localidad de Ciudad Bolívar

Fuente: (BOGOTA A. M., 2018)

situada al sur de la ciudad. Limita al norte con la localidad de Bosa, con la avenida del Sur y la avenida Ferrocarril del Sur de por medio; al oriente con las localidades Tunjuelito y Usme, con el río Tunjuelo de por medio; al sur con la localidad de Usme, con el río Chisacá de por medio; y al occidente con el municipio de Soacha.

La UPZ El Mochuelo, ver ilustración 2, donde se encuentra el acueducto AUACACT, representa un 9,3% de la extensión de la localidad de Ciudad Bolívar y es considerada zona semiurbana.

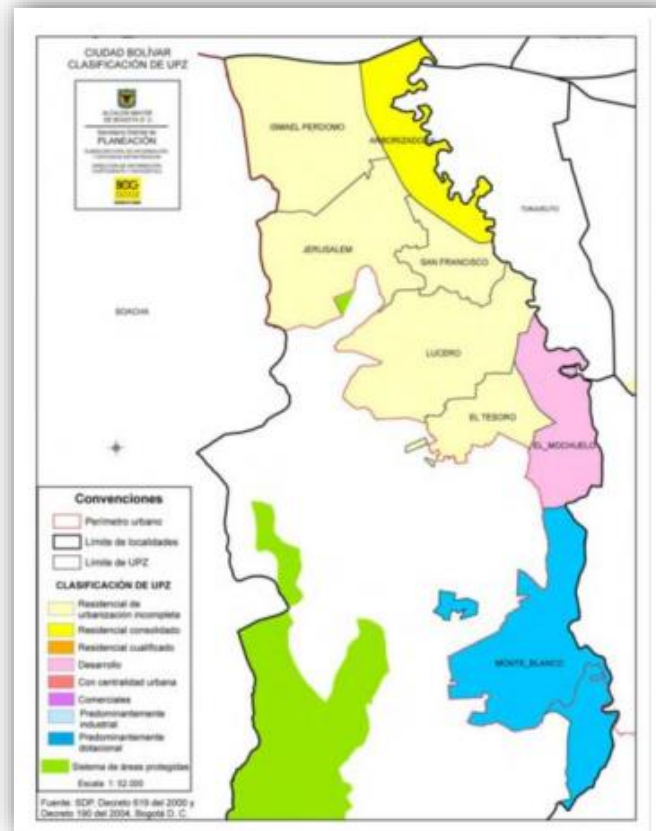


Ilustración 2 - UPZ Mochuelo Bajo

Fuente: (BOGOTÁ A. D., 2018)

El sector de Mochuelo Bajo de acuerdo con Catastro Bogotá cuenta con un área total de 828,54 hectáreas y un 8,62% de participación sobre el suelo rural de la localidad, la vereda limita al norte y al oriente con el área urbana de la localidad, al sur con la vereda de Mochuelo Alto y al occidente con las veredas de Quiba Alta y Quiba Baja.

8.5 MARCO DEMOGRÁFICO

Ciudad Bolívar de acuerdo con lo establecido por la Secretaria Distrital de Ambiente cuenta con una población estimada de 687.923 (2015), y es una de las más densas de la ciudad de Bogotá, pues tiene en promedio 208,4 habitantes por hectárea de suelo urbano para el año 2011, ver ilustración 3.

La localidad de Ciudad Bolívar cuenta con cubrimiento casi total de todos los servicios públicos domiciliarios, la cobertura de energía eléctrica, acueducto y aseo es del 100%, mientras que la de alcantarillado sanitario es del 96% y la de alcantarillado pluvial del 90%. Por su parte, la

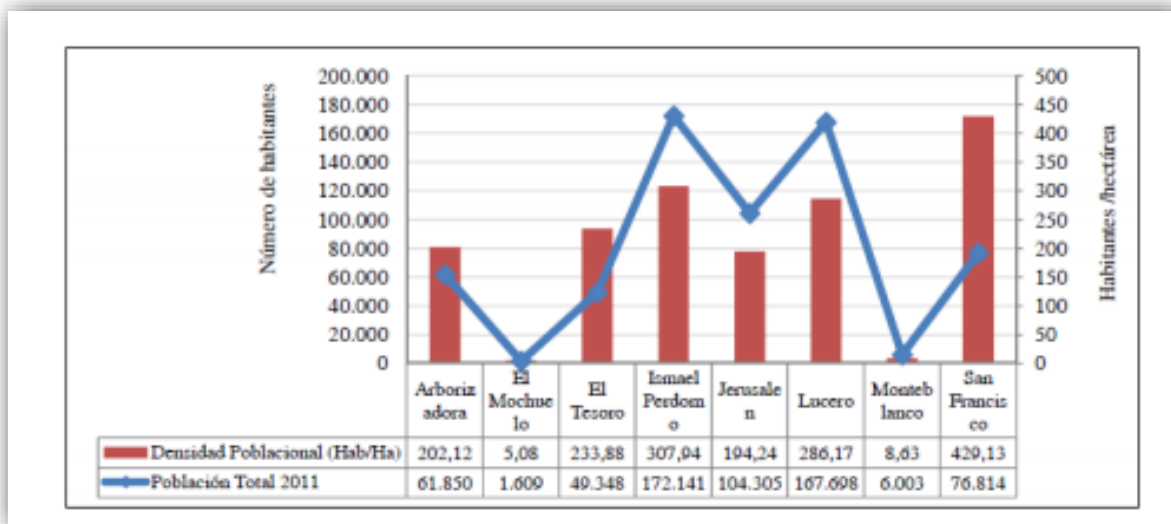


Ilustración 3 – Población y densidad poblacional por UPZ

Fuente: (DANE, 2009)

de gas natural es del 92%, y finalmente la de telefonía fija llega al 80%²². El gasto promedio de los hogares de la localidad en el pago de servicios públicos es cercano a los \$82.434, menor al del promedio de Bogotá (\$127.427), lo que ubica a Ciudad Bolívar como la segunda localidad con menor pago mensual promedio. (BOLIVAR, 2016)

9 METODOLOGÍA

9.1 FASES DE LA METODOLOGIA

Para el desarrollo del proyecto se considera muy importante cumplir con todas las fases de la metodología descritas a continuación:

9.1.1 IDENTIFICACION Y PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA ACTUAL

Como punto de partida es necesario, de acuerdo con el objeto del presente trabajo de grado, conocer las problemáticas que se presentan en la prestación del servicio de abastecimiento de agua. Para ello se realizó una reunión con los representantes y operarios del sistema de acueducto en la que se expuso cada una de los aspectos negativos dentro de los que se destaca en mayor medida las altas presiones.

9.1.2 RECOLECCION Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACION

Posteriormente y ya teniendo identificado el problema, con el fin de conocer los sectores abastecidos, la composición del sistema de acueducto y las principales características de la zona, se realizó una recopilación y revisión de información existente en diferentes fuentes como los son la planoteca de la Empresa de Acueducto y Alcantarillad de Bogotá (EAAB), la Secretaria Distrital del Hábitat, los archivos del prestador del servicio, así como en diferentes websites de la administración distrital. Entre la información más relevante, una vez finalizada esta fase del trabajo, se encuentra la topografía de la zona, consumos reales de los usuarios, topología, plano catastral aproximado de las redes existentes, informes de visitas técnicas, entre otros.

9.1.3 IDENTIFICACION DE LA HERRAMIENTA DE MODELACION A USAR

Una vez realizada la tarea de clasificación y verificación de la información recopilada se procedió a la revisión de las principales herramientas para llevar a cabo la simulación hidráulica y así estructurar el modelo inicial y posterior calibración. Teniendo en cuenta las facilidades de uso, la gratuidad y versatilidad, se escogió el modelador Epanet Versión 2.0. Con el objetivo de alimentar el modelo de simulación hidráulica Epanet para representar el acueducto AUACACT, de acuerdo a la teoría hidráulica y al manual operativo del programa, se tuvieron en cuenta los siguientes factores:

- Diámetros de tubería.
- Longitudes de tuberías.
- Altimetría y planimetría del terreno.
- Válvulas de cierre, reguladoras de presión, ventosas y purgas.
- Accesorios.
- Tanques de almacenamiento.
- Demandas concentradas.

9.1.4 IDENTIFICACION DE LA METODOLOGIA DE CALIBRACION A SEGUIR

Posteriormente se llevó a cabo un procedimiento imprescindible y quizás el más importante dentro del trabajo de grado el cual consiste en definir la metodología de calibración más adecuada que viene condicionada en gran medida por los datos que se tengan en el momento de la recolección y clasificación de la información, pero también finalmente establecida de acuerdo a un criterio hidráulico inherente a los responsables de la calibración.

En consecuencia se evaluaron varias metodologías de calibración, entre las cuales se encuentran la inteligencia artificial con algoritmo genético utilizando el programa WaterGEMS, restricción de parámetros, métodos esquemáticos usando sistemas SCADA, metodología CIACUA, metodología aplicando la herramienta PEST, etc.

Se optó en definitiva por la metodología CIACUA, ver ilustración 4, para llevar a cabo la calibración ya que tiene un enfoque sistémico (calibración de masas y energía) clasificando las variables involucradas dependiendo de sus características principales, y adicionalmente, bajo un criterio hidráulico se considera un método muy organizado, fácil de aplicar y que garantiza una calibración muy aproximada a las condiciones reales.

En general, esta metodología de calibración incluye una exploración manual del espacio de solución, partiendo de un análisis secuencial el cual busca en primera instancia un ajuste de la masa que ingresa al sistema, para posteriormente corregir la energía en cada uno de los puntos de la red. El ajuste de las curvas de masa y energía se logra a través de una búsqueda por ensayo y error, la cual se realiza mediante el uso de escenarios de calibración.

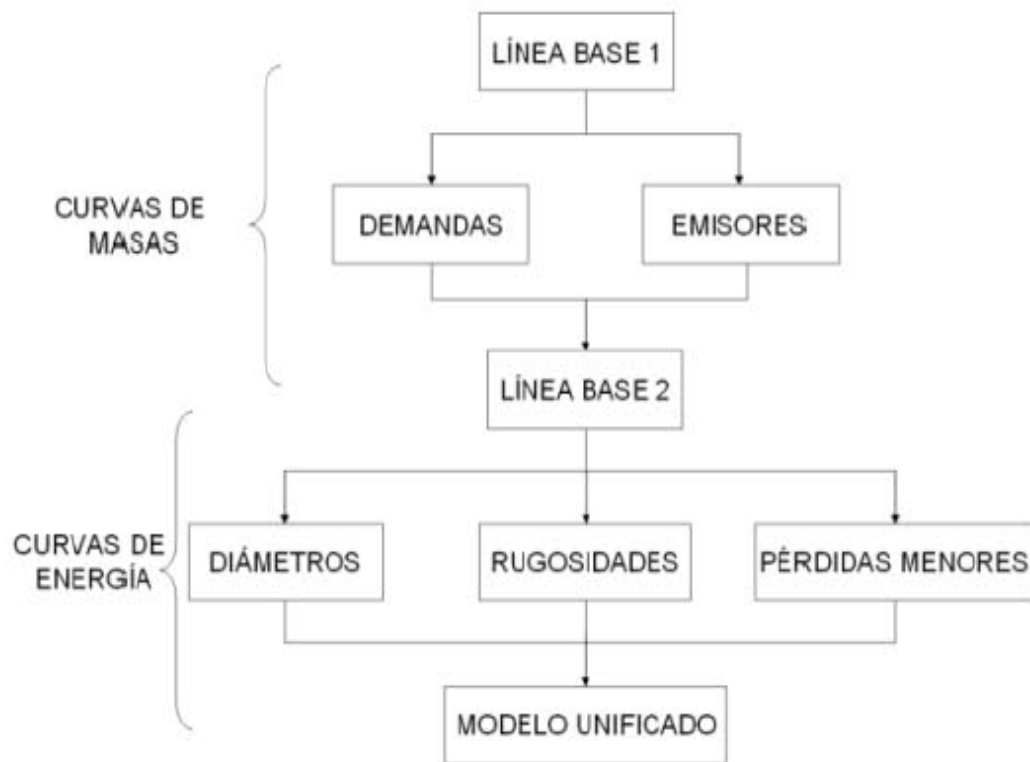


Ilustración 4 – Metodología CIACUA

Fuente: (TAKAHASHI, 2008)

9.1.5 MODELO INICIAL Y CURVAS DE CALIBRACION

Luego de contar con todos los requerimientos y datos necesarios para alimentar el simulador, información topológica, topográfica, socioeconómica, entonces se procedió a la carga del sistema en el programa EPANET generando el Modelo Inicial, verificando que el sistema se ejecutara de forma satisfactoria (sin errores ni advertencias), verificando que las tuberías no tengan velocidades nulas, que las válvulas estén en su posición correcta, no existan presiones negativas, entre otros.

Paralelamente y con el fin de llevar a cabo el paso siguiente, que consiste en la calibración del sistema (es decir ajustar parámetros del modelo, buscando que los resultados obtenidos en la simulación sean lo más cercanos a los datos tomados en las mediciones), se solicitó el apoyo en la toma de datos técnicos de caudal y presión en la red a la EAAB, quienes llevaron a cabo una campaña de medición de cinco días a la salida del tanque de almacenamiento, con el fin de registrar las variaciones de caudal a lo largo del día, incluyendo el fin de semana, teniendo en cuenta que se presume que es cuando se presentan los mayores consumos.

Como base para crear las curvas de calibración de caudal y de presión durante este proceso, se tomaron datos de caudal en dos puntos estratégicos de la red, en el barrio Patiscos y en el barrio La Esmeralda. Cabe resaltar que según lo anterior, la modelación se llevara a cabo en flujo no permanente, es decir, en horario extendido para varios momentos del día, lo que genera una mayor confianza en los resultados.

9.1.6 CALIBRACION DEL MODELO INICIAL

En detalle, el sistema plantea partir del modelo inicial donde ya se tiene procesado toda la información topológica que se recopiló en la primera fase del trabajo incluyendo los diámetros de las tuberías, las longitudes, las rugosidades, las elevaciones, las demandas, así como también la ubicación de los nodos, las válvulas y las fuentes de suministro. Asignando diámetros internos

reales propuestos por los fabricantes, pérdidas menores por accesorios y calculando el Índice de Agua No Contabilizada IANC se consigue la línea base 1.

Una vez se tenga la línea base 1 se puede iniciar la calibración de masas y de energía. En la primera se crean distintos escenarios donde se modifique la demanda base con factores multiplicadores, agrupando los usuarios según su estrato socioeconómico, ubicación del nodo y uso del agua. De igual forma se crean escenarios donde se modifiquen los caudales emisores o fugas que viene relacionado con las presiones, agrupando los nodos en altas, medias y bajas presiones y aplicando factores multiplicadores.

Consecuentemente siguiendo el proceso anterior se obtiene la línea base 2, en donde se puede realizar la calibración de energía para poder acercarse a las curvas de presión y caudal que se obtienen de los valores medidos en campo. En este proceso se crean escenarios donde se varíe ligeramente los diámetros producto de la corrosión o colmatación de las tuberías, se analizan las pérdidas menores por el hecho de que los accesorios crean pérdidas de energía cuando están en contacto con el flujo y finalmente se analizan las rugosidades con pequeñas variaciones producto de factores multiplicadores y que vienen determinados teniendo en cuenta los tipos de material, la edad del material o las velocidades de flujo.

Por último se obtiene el modelo unificado que integra los resultados de la calibración de masas y la calibración de energía reproduciendo todas las mediciones de campo y en donde ya se puede concluir que se tiene un modelo calibrado.

9.1.7 ANALISIS DE SENSIBILIDAD DE LA CALIBRACION

En esta fase se realizará una evaluación de los procesos que se llevaron a cabo durante la calibración para poder identificar que parámetros son más sensibles respecto a otros y de qué manera pueden afectar el sistema.

9.1.8 MEJORAMIENTO DEL SISTEMA

Una vez calibrado el sistema, se obtienen dos modelos que permiten diferenciar las condiciones simuladas, tanto en la modelación en condición actual, como la modelación en condición mejorada. En este sentido, se realiza un estudio cuantitativo y cualitativo de presiones y caudales en cada tubería o nodo dentro de cada escenario creado, resolviendo las problemáticas antes planteadas.

9.1.9 ANALISIS DE RESULTADOS – MODELO CALIBRADO VS MODELO MEJORADO

Se analizarán por un lado los resultados de la calibración identificando la problemática descrita en el inicio del proyecto donde se reflejen las razones, si es el caso, de porque no se cumplen los requerimientos obligatorios de la norma RAS. Por otro lado se analizarán los resultados obtenidos luego de haber hecho el proceso de mejoramiento del sistema y en qué medida se resolvió la problemática.

9.1.10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalmente se generarán las conclusiones pertinentes de acuerdo a los objetivos planteados en el inicio del proyecto y se definirán una serie de recomendaciones que contribuyan a mejorar la prestación del servicio.

10 INSTRUMENTOS O HERRAMIENTAS DE MODELACION A USAR

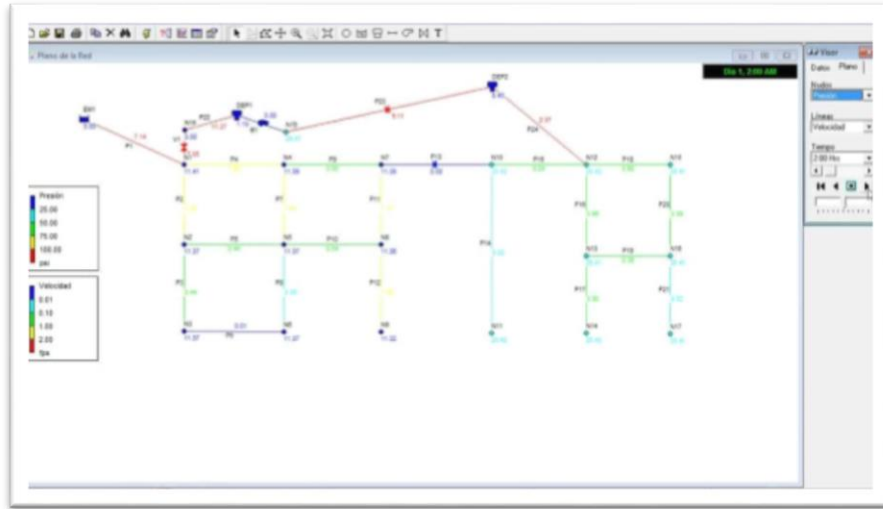


Ilustración 5 – Entorno integrado de Windows con EPANET

FUENTE: (PLAZA, 2017)

Uno de los programas más usados y que se adapta a los objetivos de este trabajo es EPANET, ver ilustración 5 anterior, que es un programa de computador que realiza simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico en redes de suministro a presión y orientado al estudio de redes de distribución de agua y calidad de la misma. Una red puede estar constituida por tuberías, nodos (uniones entre tuberías), bombas, válvulas y depósitos de almacenamiento o embalses. Efectúa un seguimiento de la evolución de los caudales en las tuberías, las presiones en los nodos y los niveles en los depósitos a lo largo del periodo de simulación discretizado en múltiples intervalos de tiempo. (PLAZA, 2017)

El programa proporciona un entorno integrado bajo Windows, para la edición de los datos de entrada a la red, la realización de simulaciones hidráulicas y la visualización de resultados en una amplia variedad de formatos. Entre éstos se incluyen mapas de la red codificados por colores, tablas numéricas, gráficas de evolución y mapas de isolíneas. En esencia, el modelo hidráulico utilizado se fundamenta en la ecuación de la energía y la ecuación de la conservación de la masa, generándose un sistema no lineal de ecuaciones, para cuya resolución se utiliza el método de

Newton-Raphson y el principio del gradiente hidráulico en donde la dirección de flujo va de mayor a menor energía (PILATI, 1987).

El gradiente hidráulico se define como la pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua; es decir, representa la pérdida o cambio de potencial hidráulico por unidad de longitud, medida en el sentido del flujo de agua. (REBOLLO, 2009)

El problema es finalmente conducido a una solución algebraica mediante el proceso iterativo conocido como Algoritmo de Factorización Incompleta de Choleski / Gradiente Conjugado Modificado, cuyas siglas en inglés corresponden a ICF/MCG (Incomplete Choleski Factorization / Modified Conjugate Gradiente). Propone dos sistemas de ecuaciones, uno basado en las pérdidas de carga de los elementos de la red, y otro aplicando la ecuación de continuidad en nudos, de modo que en ambos casos, las incógnitas son los caudales circulantes. El método de resolución del gradiente comienza estimando inicialmente el caudal que atraviesa cada tubería, sin necesidad de cumplir la ecuación de continuidad. (GARCIA, 2006)

El programa EPANET se caracteriza por:

- Redes de tamaño ilimitado.
- Las pérdidas se calculan por las ecuaciones mundialmente conocidas como la de Darcy-Weisbach (todo tipo de fluidos), Hazen-Williams (agua) o Chezy (canales).
- Incluye en sus cálculos pérdidas menores.
- Admite bombas y en sus cálculos se pueden incluir válvulas.
- Entre otros (MARTINEZ, 2001)

Para la implementación del modelo en EPANET hay que tener en cuenta que los elementos que la integran se dividen en físicos y no físicos. En cuanto a la primera, las redes a presión, sin importar su tipo ni su geometría, requieren de elementos físicos que permitan su implementación,

tales como tuberías, conexiones o nudos, válvulas, fuentes de abastecimiento, bombas y emisores como se muestra en la ilustración 6.

- Embalse: es el elemento físico que suministra el fluido a la red que se desea simular por lo general infinito con cota constante.
- Nudos: Son elementos físicos utilizados para unir las tuberías. Los nudos o uniones sirven también como punto hidráulico de extracción o inyección de agua en la red.
- Tubería: Son elementos que permiten el transporte de agua en una red dada. Para el caso de EPANET, las tuberías se encuentra siempre a presión y la dirección del flujo obedece al principio del gradiente hidráulico; por lo tanto, el agua se mueve de un punto de mayor a menor energía.
- Válvulas: Las válvulas son elementos que principalmente controlan el flujo o caudal dentro de un tramo de tubería específico. (MARTINEZ, 2001)

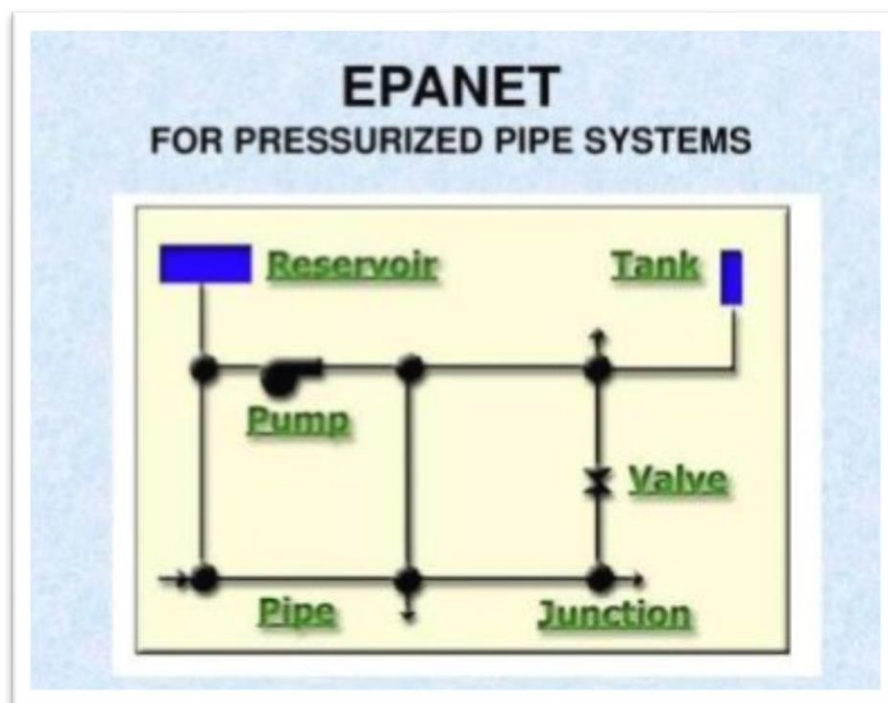


Ilustración 6 – Elementos físicos en redes de EPANET

FUENTE: (PLAZA, 2017)

EPANET calcula las pérdidas de energía para lograr simular el comportamiento hidráulico en distintos tipos de tuberías (concreto, acero, PVC, etc.). Además, se pueden tener en cuenta las pérdidas de energía por accesorios, para lo cual es necesario conocer las constantes de los accesorios utilizados (Km) en el tramo de tubería simulada.

Con este simulador se pretende calibrar la red y modelar dos escenarios con funcionamiento hidráulico, el primero con las condiciones actuales donde se refleje el comportamiento real de la red y se observen los problemas, y el segundo modelo es con las condiciones mejoradas del sistema, es decir un funcionamiento ideal.

11 GENERALIDADES A TENER EN CUENTA

En la toma adecuada de decisiones en la operación de un sistema de acueducto, es necesario contar con una herramienta de simulación que analice las condiciones topológicas y de composición del sistema, las evalúe mediante un proceso de calibración y luego refleje las condiciones reales hidráulicas de presión y caudal de tal forma que permita prever y detectar problemas o alguna variabilidad en la operación y así dar soluciones efectivas durante la vida útil de la red de distribución.

El estado concreto de todas las variables que hacen parte del sistema solo se encuentran en un estado ideal en la etapa de diseño, sin embargo cuando el sistema se encuentra construido y en funcionamiento, el comportamiento varía respecto al ideal. Además de desconocer el estado real de los parámetros topológicos e hidráulicos, la presencia de fugas y de agua no contabilizada agrega bastante dificultad al proceso de calibración y se deben tener en cuenta. Los parámetros topológicos involucrados en los modelos matemáticos de redes de distribución de agua son los coeficientes de rugosidad, los coeficientes de pérdidas por accesorios, las demandas en los nodos, fugas, niveles en los tanques y diámetros (SALDARRIAGA, HIDRAULICA DE TUBERIAS , 2007).

El problema radica en que las tuberías muy posiblemente tienen más de 20 o 30 años, lo que puede crear un sistema con fugas indetectables generando una gran cantidad de incógnitas que necesariamente deben ser calibradas. A medida que pasa el tiempo, las redes van sufriendo cambios, no solo por los mantenimientos preventivos y correctivos de redes y accesorios sino también con los procesos operativos con los que se controlan, con el cambio de las rugosidades de las tuberías ya sea por deterioro o por acumulación de partículas en la pared de contacto con el flujo, entre otros. (LOPEZ, 2012)

Como se indicó anteriormente, por una parte se definen las variables topológicas que son desconocidas, a las cuales en el primer proceso de modelado les asignaremos unos valores teóricos

determinados por los fabricantes, y por otro lado hay variables denominadas hidráulicas, caudales y presiones, que se obtienen de dos formas, mediante cálculos y también las observadas en campo en algunos puntos donde se hayan hecho pruebas, En la calibración se intenta que las variables hidráulicas calculadas se asemejen a las recogidas en campo. (ALZAMORA, 2017)

Cada variable tiene distinta sensibilidad frente al sistema, es decir, cada parámetro influye en menor o mayor grado en las condiciones del sistema en el momento que hagamos un cambio para acercarlo a la realidad. La información recogida y usada durante el proceso de carga del modelo inicial en muchas ocasiones no es perfecta, por lo que algunos valores deben ser modificados para acercarlo a lo observado. Para corregir inexactitudes en los datos de entrada es necesario entender primero las fuentes de estas inexactitudes. Estos se pueden agrupar en varias categorías:

- Estimación incorrecta del uso del agua.
- Capacidad de carga incorrecta en la tubería.
- Cabezal piezométrico incorrecto en puntos constantes como bombas, tanques, válvulas reductoras de presión.
- Deficiente representación del modelo al eliminar demasiados tubos en el momento de esquematizar el sistema. (WALSKY, 2015)

Sin la calibración de un modelo muy seguramente obtendremos cálculos incorrectos que están fuera de la realidad y más teniendo en cuenta que las fugas no contabilizadas representan aproximadamente el 30% del caudal que pasa por el sistema. Conociendo el diámetro de las tuberías, la rugosidad absoluta, el coeficiente de pérdidas menores, el caudal de fugas no detectadas (caudal total de entrada al sistema menos los caudales facturados), características de la tubería y las ecuaciones hidráulicas que relacionan las fugas con la presión, podemos empezar con la calibración.

En cuanto al análisis de pérdidas menores en donde se desconocen los accesorios y válvulas existentes se debe optar por una de las dos soluciones planteadas por algunos autores o por

experiencia y criterio profesional las cuales plantean, considerar un 10% o 5% de las pérdidas por fricción totales dependiendo si hay velocidades de flujo promedio cercanas a 2m/s o cercanas a 1m/s respectivamente (Jimenez, 2007); según otro criterio para el cálculo de las pérdidas menores es posible asignar un coeficiente de 0,03 a tubería de concreto y 0,02 a tuberías de PVC expresada en metro por kilómetro de tubería que se le adiciona al coeficiente inicial de cada una, para el caso de las válvulas se le adiciona 0,2 al coeficiente de pérdidas menores de la tubería en donde esté ubicada. En todo caso las pérdidas menores no pueden superar el 30% de las pérdidas por fricción. (SALDARRIAGA, HIDRAULICA DE TUBERIAS , 2007)

Uno de los resultados que se obtienen después de calibrar una red bajo un ambiente de fugas se evidencia en el momento de modelar el sistema en una condición mejorada donde sí se reducen las presiones de la red de forma localizada así mismo se reducen las fugas drásticamente del sistema sin variar los consumos de los usuarios. El proceso de calibración finalmente permite detectar zonas con fugas ya sean puntuales o distribuidas, y reconocer caudales de agua perdidos con el fin de ejecutar obras de mitigación y rehabilitación de redes. (SALDARRIAGA, CALIBRACION DE REDES BAJO UN AMBIENTE DE FUGAS, 2010)

Para efectos de calibración de factores como la rugosidad, las tuberías no deben ser agrupadas solamente con respecto al material; deben ser agrupadas también de acuerdo con los rangos de velocidades del flujo que transportan. Esta división permite afectar de manera lógica sus diámetros, teniendo en cuenta la magnitud del esfuerzo cortante. (LOPEZ, 2012)

12 CRITERIOS DE EVALUACION DE LA CALIBRACION

Es indispensable tener en cuenta durante el proceso de calibración de un modelo de abastecimiento de agua potable los rangos aceptables en los cuales pueden estar los valores finales que intentemos acercar a los obtenidos en campo. A continuación se establece los porcentajes mínimos y máximos que podemos tener entre los valores simulados y los valores medidos según criterio Bantley.

12.1 NIVELES ACEPTABLES DE CALIBRACIÓN

12.2 CRITERIOS DE CAUDAL

- Para Líneas Primarias (Caudal $>10\%$ de la Demanda Total del Sistema o Sector) el valor simulado debe tener una diferencia de $\pm 5\%$ con los valores de caudal medidos
- Para Líneas Secundarias (caudal $\leq 10\%$ de la Demanda Total del Sistema o Sector) el valor simulado debe tener una diferencia de $\pm 10\%$ con los valores de caudal medidos

12.3 CRITERIOS DE PRESIÓN

- 85% de las medidas de campo deben estar entre ± 0.5 m o $\pm 5\%$ de la máxima pérdida de carga a través del sistema (el criterio que sea más grande)
- 95% de las medidas de campo deben estar entre ± 0.75 m o $\pm 7.5\%$ de la máxima pérdida de carga a través del sistema (el criterio que sea más grande).
- 100% de las medidas de campo deben estar entre ± 2.0 m o $\pm 15.0\%$ de la máxima pérdida de carga a través del sistema (la que sea más grande)

FUENTE: (LOPEZ, 2012)

13 ESTADO DEL ARTE

Teniendo en cuenta que al evaluar los componentes del sistema se obtienen una mayor cantidad de variables desconocidas que de ecuaciones, se establece que el sistema es no lineal, es decir, tiene infinitas soluciones. De esta manera se trata de buscar la mejor solución teniendo en cuenta criterios hidráulicos acertados y coherentes, empleando métodos analíticos e iterativos con herramientas que permitan calibrar un modelo de distribución de agua potable.

En consecuencia surgen distintos métodos de calibración para facilitar el proceso y reducir el tiempo empleado, recogidos en 4 grandes grupos, como lo indica Enrique Roldan Galán (2016) en su informe:

- Técnicas analíticas: que incluyen métodos iterativos de prueba y error, ajustando parámetros desconocidos en cada iteración hasta resolver las ecuaciones básicas de la red en estado estacionario; y métodos explícitos para un sistema extendido donde se resuelven ecuaciones básicas de la red para estado estacionario y ecuaciones adicionales de acuerdo con la presión y el caudal observados.
- Técnicas implícitas: Estas emparejan un modelo de simulación hidráulica para resolver las ecuaciones de la red y con un modelo optimizado para determinar los valores de los parámetros de la calibración.
- Métodos implícitos no evolutivos: usan algoritmos de programación no lineal optimizando los sistemas de distribución de agua y donde la función objetivo busca minimizar las diferencias entre las variables medidas en campo frente a las simuladas.
- Métodos implícitos evolutivos: basados en las leyes de la evolución darwiniana utiliza algoritmos genéticos evaluando múltiples soluciones simultáneamente. (GALAN, 2016)

En la modelación de la red de distribución de agua potable en el Municipio de Madrid Cundinamarca, tema de la tesis de grado de Shanel Florián, se hizo uso del método manual para la

calibración del sistema mediante el análisis de la energía estática y la energía dinámica, siendo afectadas la energía estática por la altura del tanque y la dinámica por la rugosidad de la tubería y las pérdidas menores del sistema (FLORIAN, 2017).

Está misma metodología se evidenció en la calibración de un sistema complejo de distribución de agua potable en la Ciudad de Valencia - España, como lo explica Fernando Martínez en su artículo técnico, donde detalla todo el proceso desarrollado mediante un sistema de telemetría SCADA de tratamiento de datos y ejecución en tiempo real para periodos extendidos; el contar con esta tecnología, permitió calibrar el sistema de forma localizada, distinguiendo sectores principales de inyección y sectores secundarios de demanda, asimismo creando circuitos más reducidos con cortes de válvulas y evaluando las condiciones de cada “subsistema” sin modificar los contiguos. Finalmente se ajustaron los valores de las elevaciones en los nodos, y las rugosidades de las tuberías, la calibración se inició en los sectores más alejados, continuando hasta llegar a las fuentes de suministro. (ALZAMORA, 2017)

En distintas ciudades de Colombia se ha empleado la metodología CIACUA para calibrar redes de distribución de agua potable, como se identifican en la tesis desarrollada por Claudia Stella López quien describe que en varios sectores de la ciudad de Bogotá se siguieron los lineamientos del método CIACUA para calibrar el sistema. Primero supusieron rugosidades absolutas por tablas, las demandas las cargaron a los nudos de acuerdo a la facturación de los usuarios, según el catastro de redes fijaron los diámetros de tuberías, longitudes y cotas, con lo que llegaron a la línea base 1. Paralelamente hicieron muestreos en distintos puntos estratégicos de la red, recogiendo información de caudal y presión.

En la siguiente fase de la calibración calcularon el IANC mediante la relación del caudal medio de la entrada del sistema y el caudal medio facturado, aumentando el porcentaje de la demanda en cada nodo. Para la calibración de masas agruparon los nodos de acuerdo a la estratificación y le aplicaron un factor multiplicador de 1 a 10 a la demanda. Se evaluaron las presencias de fugas y para ello se agruparon los nodos de acuerdo a los valores de las presiones arrojados por la modelación inicial, y en consecuencia, a las demandas base, en puntos de mayor presión se le asignó un factor multiplicador mayor y lo puesto a un punto de menor presión que

oscila entre 0 a 1. En cuanto a la calibración de energía se crearon grupos de acuerdo al tipo de material (rugosidad) y se le aplicó un factor multiplicador (LOPEZ, 2012).

Asimismo existen programas avanzados para resolver el proceso de calibración que se han desarrollado a nivel comercial como lo son Darwin Calibrator de WaterGEMS, H2ONET Calibrator e InfoWater Calibrator, sin embargo para utilizar estos programas es necesario pagar por una licencia generando un alto costo. En distintos sectores de Bogotá y en ciudades del Valle del Cauca se realizó la calibración de los modelos hidráulicos de las redes de distribución de agua potable mediante algoritmos genéticos y la herramienta WATERGEMS.

Un algoritmo genético es una herramienta computacional eficiente y de éxito en múltiples problemas de optimización en ingeniería. Esta técnica se basa en conceptos de selección natural y genética. Un algoritmo genético funciona con similitud a la naturaleza, creando poblaciones compuestas por individuos, los individuos son cada uno de los valores generados de forma aleatoria para realizar una corrida sobre el modelo, esta corrida luego es evaluada por una función objetivo, a partir de la cual se hace una selección de las poblaciones más adaptadas, es decir de aquellas que hayan generados los mejores valores correspondientes a la función objetivo y que por ser las más aptas tienen el derecho a utilizarse como padres para la generación siguiente en la formación de nuevas poblaciones de prueba. (SALAS, 2001)

Aunque a cabalidad el resultado óptimo que se obtiene a través del algoritmo genético no es global, al igual que ocurre con cualquier procedimiento numérico, este representa una perspectiva de solución importante, ya que explora el espacio de soluciones a partir del estudio de muchas variables simultáneamente.

De acuerdo a lo anterior, para calibrar con la herramienta WATERGEMS que usa un algoritmo genético, se siguen las mismas reglas descritas en el párrafo de la metodología CIACUA hasta llegar al modelo inicial y aplicar el factor multiplicador que arroja el IANC. En este punto y para continuar con el proceso de calibración se crea la función objetivo con los datos recogidos en

campo de caudales y presiones y a través del software DARWIN CALIBRATOR, que emplea algoritmos genéticos, se crean varios escenarios con grupos de acuerdo a las rugosidades y se le asigna un factor multiplicador por rangos, luego mediante un criterio de ajuste como el de mínimos cuadrados se estipulan unas diferencias mínimas entre los valores medidos reales y los modelados. Finalmente el calibrador correlaciona los datos medidos y simulados para cada solución, y escoge los mejores resultados (LOPEZ, 2012).

Dentro de las funciones matemáticas que tienen como fin la optimización de un grupo de valores se ha encontrado que el uso del algoritmo Levenberg – Marquardt para calibración, requiere menos tiempo de cálculo que los algoritmos genéticos ya que requiere menos ejecuciones (Koppel y Vassiljev, 2009). No solo se ha usado el algoritmo genético para la calibración de modelos, sino que también, y de acuerdo a la tesis de Sandra Parrado, donde se expone que también para la estimación de parámetros, se ha desarrollado el algoritmo Gauss-Marquardt-Levenberg que supone la base para el uso de la herramienta PEST (Model-independent Parameter Estimation) el cual es un programa utilizado para la calibración de parámetros de modelos matemáticos. Los formatos de entrada y salida en EPANET permiten que se pueda ejecutar la herramienta PEST para encontrar los parámetros óptimos que permitan contar con el modelo matemático calibrado de una red de distribución de agua determinada. (PARRADO, 2016).

Siguiendo la metodología PEST en Colombia, se realizó la calibración de un modelo de la red de acueducto de La Sirena en el Valle del Cauca, y en Estados Unidos de América para la red de distribución de agua de Holcomb Boulevard en Carolina del Norte. (PARRADO, 2016).

Existen otras metodologías como las simulaciones de Monte Carlo que consisten en la generación de conjuntos de parámetros aleatorios que son evaluados con el fin de encontrar el grupo de parámetros óptimo para la solución del caso de estudio, o como también la metodología por restricción de parámetros que hace parte de la inteligencia artificial.

En la programación por restricciones se busca optimizar un modelo a partir de la aplicación y propagación de restricciones a sus variables usando razonamientos lógicos. En todo momento se debe contar con la información actualizada para que en cada cambio se propague la información, deduciendo nueva información y así reducir el dominio de las variables o restricciones que no se tenían.

El primer paso es discretizar las variables que consiste en separarlas en clases de acuerdo a las mismas características. En este caso solo se les pueden hacer esto a las variables topológicas ya que las demandas y fugas varían notablemente. Los cambios que se realicen dependerán de los resultados de las curvas de energía del modelo (presión). Por consiguiente si la presión observada es mayor a la calculada entonces se debe proceder a aumentar el diámetro, si por el contrario la presión es menor entonces la rugosidad y el coeficiente de pérdidas menores se incrementara en la tubería. Con un proceso controlado gracias a la búsqueda heurística se minimizan las posibles soluciones y los cambios no se harán en todas las tuberías al tiempo sino se escogerá unas al azar las cuales sean las más prometedoras. (TAKAHASHI, 2008)

14 METODOS DE CALIBRACION - COMPARATIVO

A continuación se relacionan las características más importantes de las metodologías que nos darán la pauta para elegir entre ellas, la más conveniente de acuerdo a un criterio hidráulico, ingenieril y funcional que se ajuste a los datos y herramientas que se tienen, ver ilustración 7.

En la siguiente tabla 4 se describen tres de las metodologías más importantes para la calibración de redes de distribución de agua potable y que se han aplicado en distintos proyectos reales, algunos de ellos descritos a grosso modo en el apartado anterior de la tesis en desarrollo.

1. METODOLOGIA ESQUEMATIZADA SCADA-GISRED-SCARED

La característica principal es el hecho de aplicar una sectorización de la red, dividiendo y creando subsistemas más pequeños para poder calibrarlos independientemente sin que afecte a los otros.

2. METODOLOGIA CIACUA-EPANET

Su punto fuerte está en tener una estructura muy definida, con líneas base de monitoreo, lo cual permite evaluar los parámetros por etapas y así mismo los resultados de cualquier cambio o variables que afecten el sistema, como por ejemplo poder determinar sectores donde haya una alta probabilidad de fuga.

3. METODOLOGIA WATERGEMS-ALGORIMOS GENETICOS

Su valiosa ventaja es su facilidad de uso permitiendo calibrar redes grandes con mucha información.

Tabla 4 - Comparativo de métodos de calibración mas importantes

COMPARATIVO DE METODOS DE CALIBRACION DE REDES DE DISTRIBUCION DE AGUA POTABLE			
METODOLOGIAS	ESQUEMATIZADO CON SCADA-GISRED-SCARED	CIACUA-EPANET	ALGORITMO GENETICO-WATERGEMS
PROCESOS	CARACTERISTICAS PRINCIPALES		
CARGA DE MODELO BASE	Desde fichero CAD o SHAPE con GISRED y SCARed	Desde los archivos INP a EPANET o REDES	Archivos SIG a SHAPE con WATERGEMS
	Contiene rugosidad inicial, diámetro de tubería y longitud, cotas de nudos e información de elementos de regulación	Contienen cotas de nudos y sus respectivas coordenadas, longitudes de tuberías, diámetros, rugosidades de materiales.	Contiene la topografía y la topología
	Demandas base en los nudos del promedio de demandas diarias de facturaciones	Demandas base en los nudos de promedio de demandas diarias de facturaciones	Demandas base en los nudos de promedio de demandas diarias de facturaciones
CAPTURA, TRATAMIENTO Y FILTRADO DE DATOS	Se carga con promedios horarios de presiones y caudales	La generación de archivos SIG con curvas de niveles y superficies topográficas en 3D facilita el chequeo de las cotas de los nudos y tanques.	Permite elaborar patrones de consumo, horario diario y mensual
	En las válvulas automáticas se registra la variable de consigna(presión y caudal) y las válvulas a control remoto la variable del obturador en cada momento	Revisión de la correspondencia de coordenadas de los usuarios con respecto a las coordenadas de nudos de la red.	Permite evaluar el error entre lo observado y lo calculado
	Revisar valores fuera de rango, valores que no cambian, o huecos que deben reemplazarse por valores estimados	Incluye revisión de tuberías y nudos repetidos y faltantes. Permite identificar los nodos de entrada y salida al cargar el modelo	Permite depurar nodos y tuberías repetidos o faltantes

METODOLOGIAS	ESQUEMATIZADO CON SCADA-GISRED-SCARED	CIACUA-EPANET	ALGORITMO GENETICO-WATERGEMS
PROCESOS	CARACTERISTICAS PRINCIPALES		
AJUSTE DE DEMANDAS	Distingue sectores de inyección que engloba las fuentes de suministro, las válvulas de regulación y los caudalímetros más importantes	Los patrones de consumo tienen en cuenta la diferenciación de datos tomados en días ordinarios y fines de semana	Permite elaborar un SHAPE con estratos socioeconómicos
	Distingue sectores de demanda que se refiere a los caudalímetros de segundo nivel en zonas menos importantes	La asignación de patrones de consumo depende de las características de los usuarios.	Permite variación de los valores de los parámetros.
	El primer paso es asignar todos los nudos a algunos de los dos sectores. Se calcula un factor de demanda para cada sector con la diferencia de los caudalímetros de entrada y salida de cada sector y así se incorpora un rendimiento hidráulico.	Se realiza mediante ASIGNA que genera el PLANO ESTRELLA una herramienta gráfica que permite identificar posibles errores de asignación.	La asignación se hace buscando la tubería más cercana al usuario, luego el total de la demandas se distribuye por mitad entre los nudos inicial y final.
AJUSTE DE COTAS	Resuelve un problema de minimización de pérdidas, en donde los caudales son mínimos, entre dos puntos de medida de presión consecutivos que equivale a un trayecto para así modificar lo menor posible en valor y en cantidad. Para ello soluciona el problema derivando la expresión general frente a cada una de las cotas a revisar		Las curvas de modulación calculadas para los tanques son una excelente alternativa para modelar en periodo extendido la red. Establecer un tanque en representación de la conexión de entrada es una buena opción para la simulación del gradiente de entrada al sector.
CALCULO DE PERDIDAS COMERCIALES Y TECNICAS		Se incluyen valores de pérdidas menores correspondientes a las longitudes determinadas y al material de la tubería.	Las pérdidas solo se calculan por fricción.

METODOLOGIAS	ESQUEMATIZADO CON SCADA-GISRED-SCARED	CIACUA-EPANET	ALGORITMO GENETICO-WATERGEMS
PROCESOS	CARACTERISTICAS PRINCIPALES		
IANC		La distribución del IANC se hace identificando las zonas con pérdidas representativas y de manera ponderada.	La distribución de las pérdidas totales (IANC) se hace mediante un factor promedio.
ESCENARIOS DE CALIBRACION	CORTES DE CALIBRAC.: se introducen cortes en las entradas y salidas de todos los sectores para calibrar por etapas. En el nudo aguas arriba se extrae el caudal medido Q, y en el nudo aguas abajo se inyecta el mismo caudal Q. Los dos nudos extremos, de cada sector, pasan a ser de caudal fijo.	Se tienen en cuenta para tuberías: agrupación por material, velocidad y caudal. Para nudos: agrupación por estrato. El software REDES contiene distintos métodos de optimización: Algoritmos Genéticos, Ensayo y Error, Programación por Restricciones	Se generan grupos de análisis teniendo en cuenta solamente el material de las tuberías. Y para los nodos se crean grupos donde la demanda sea representativamente elevada.
AJUSTE DE LAS RUGOSIDADES	Se hará de acuerdo a los caudales máximos donde las pérdidas son mayores y aguas arriba desde las zonas más alejadas hasta las fuentes de suministro. Con un árbol de máxima expansión y máximo coste que sería el caudal circundante se definen los trayectos a calibrar.	No solo incluyen rugosidades de tuberías y demandas bases, sino también diámetros internos, coeficientes de pérdidas menores, emisores (ambiente de fugas), etc.	Se calibran solo dos variables: Rugosidades en las tuberías y demandas bases en los nudos. No se tienen en cuenta diámetros, perdidas menores, análisis por fugas, ni evaluación de operación.
		Todas las variables son analizadas. Cuando ya se haya determinado cuales son relevantes, se hace el análisis.	
COMPARACION DE VARIABLES CALC. VS MED.		Presenta gráficas de caudales y presiones del modelo antes y después de calibrar. No se realizan gráficas de correlación.	Elabora graficas de correlación entre variables

La primera metodología descrita se puede considerar alternativa ya que se sale en cierta medida de las teorías clásicas de calibración pero que al final resulta ser muy efectiva si se tiene un sistema de distribución complejo, puesto que su principio base es dividir en “subsistemas” más pequeños y además en zonificar de acuerdo a la importancia de cada tramo dentro del mallado, diferenciando en ramales que aportan o descargan caudal. Consecuentemente y con los datos recopilados en las pruebas de campo en tiempo real, al contar con un sistema de telemetría (SCADA), el método de calibración indica como ajustar las demandas, cotas y rugosidades esquemáticamente por tipo de material y edad, siguiendo los flujos principales del agua y desde zonas más alejadas hasta llegar a la fuente de suministro.

Sin embargo para llevar a cabo este procedimiento es necesario disponer de un gran número de válvulas de cierre, de caudalímetros y manómetros para poder sectorizar y evaluar cada sistema sin que afecte los contiguos. En el mallado del sistema de distribución del acueducto AUACACT no se cuenta con un gran número de válvulas de cierre, y el número de caudalímetros dispuestos en la toma de medidas de campo son reducidos, por tanto se debe optar por otra metodología que se adapte de mejor manera al sistema y características existentes.

Los siguientes dos métodos caracterizados en la tabla anterior permiten de manera fácil exportar los datos topológicos necesarios para cargar el modelo inicial a través de archivos INP y SIG al programa de simulación EPANET y WATERGEMS respectivamente. Para la asignación de las demandas a cada nudo, que se obtienen del promedio mensual de la facturación de cada micromedidor, se realiza mediante las herramientas “Asigna” para EPANET y “LoadBuilder” para WATERGEMS adjudicando los caudales de acuerdo a la tubería más cercana a cada usuario. Englobando el procedimiento anterior, en este punto se establece el modelo inicial.

Adicionalmente las dos metodologías en el proceso de análisis de masas asignan los diámetros internos reales de las tuberías según los catálogos de los fabricantes, pérdidas menores por efecto de accesorios, pérdidas técnicas (fugas), y calculan el IANC teniendo en cuenta la lectura del macromedidor a la salida del tanque y todas las lecturas de las micromediciones, pero a

diferencia de WATERGEMS la distribución del IANC se asigna de forma ponderada a los nudos dependiendo de las presiones y no como un factor promedio. WATERGEMS solo tiene en cuenta las pérdidas por fricción.

En este sentido, una de las ventajas del método CIACUA, frente a WATERGEMS, es que permite detectar las zonas donde haya probabilidad de pérdidas técnicas para así mismo facilitar la operación y mantenimiento de la red y adicionalmente permite calibrar el coeficiente de emisores y el coeficiente de pérdidas menores. No solo permite identificar la cantidad de agua perdida en la red, sino también identificar qué porcentaje de esa agua corresponde a pérdidas comerciales por conexiones ilícitas y que porcentaje corresponde a pérdidas técnicas por fugas.

Una vez se tienen ajustados los caudales, a continuación las dos metodologías realizan un análisis de energía calibrando las variables topológicas que van íntimamente relacionadas a las presiones del sistema. La metodología CIACUA y WATERGEMS tienen como similitud que permiten crear distintos escenarios de calibración, pero en el primer método hay más posibles variantes, mientras que el segundo método nombrado es más limitado, ya que solo evalúa por tipo de material y por demandas muy elevadas. En el método CIACUA se pueden crear escenarios ya sea por tipo de material, edad del material, estratos socioeconómicos, rangos de los valores de las rugosidades, rangos de demandas, velocidades medias de flujo, pérdidas menores entre otros.

Finalmente al comparar los 3 escenarios descritos anteriormente, se observa que la metodología CIACUA, bajo un criterio hidráulico e ingenieril, además de adaptarse mejor a la información y herramientas con las que se cuentan según los requerimientos que el mismo exige, permite abordar de una forma más detallada cada uno de los procesos contemplados a la hora de realizar la calibración del modelo, por lo cual inherentemente conlleva a aproximar los valores calculados con los valores observados que lógicamente es el objetivo principal.

15 CALIBRACION DEL MODELO Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA

El objetivo principal que se debe cumplir durante el desarrollo del proyecto, es el mejoramiento del sistema de abastecimiento de agua, pero para llegar a este punto es necesario primero generar el modelo inicial que incluye la incorporacion de las características topologicas, topograficas y la asignacion de demandas, asi como tambien las curvas de calibracion de caudal y presion con los datos de campo. Con lo anterior podemos calcular las aguas no contabilizadas, dar inicio al proceso de calibracion y finalmente mejorar el Sistema.

15.1 MODELO INICIAL DE LA RED

15.1.1 TOPOLOGIA Y TOPOGRAFIA DE LA RED

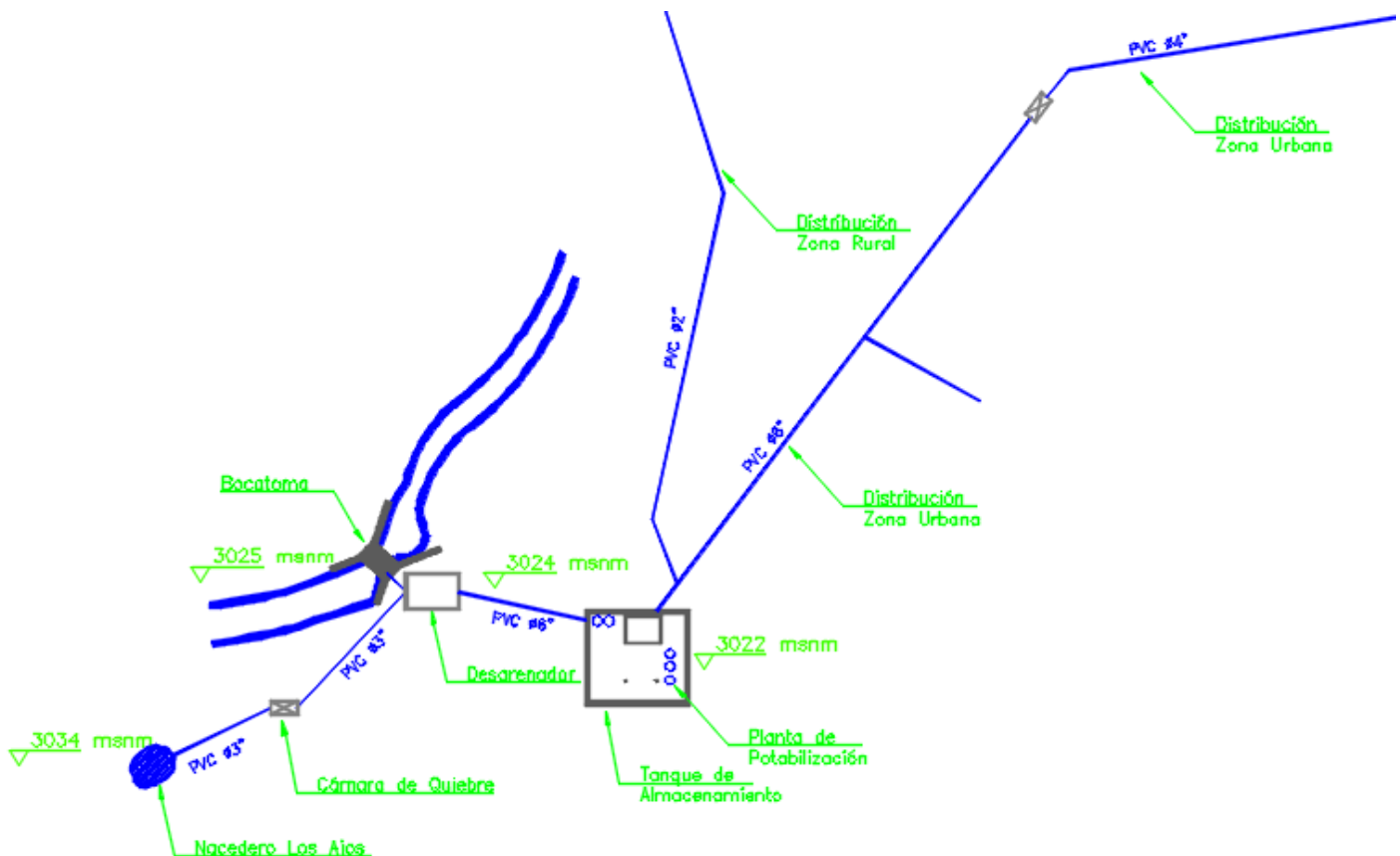


Ilustración 7 – Diagrama general del acueducto AUACACT

Con el fin de generar el modelo inicial, es necesario en primera instancia realizar una caracterización de la red que permita conocer el estado general del sistema, para ello se realiza un esquema general dando un primer acercamiento y localización de todos los componentes del sistema.

En el esquema general del cueducto AUACACT, ver ilustracion anterior 8, se ubican los nacimientos de agua que tributan al sistema, tanto la fuente de abastecimiento de la quebrada Aguascalientes, asi como tambien la fuente de agua “El Ajo”. Aguas abajo se encuentran camaras de quiebre para reducir energia con un total 2 unidades, luego el agua es captada en la bocatoma con una altimetria de 3006 m.s.n.m y mediante la tuberia de aduccion en 6” PVC pasan por el desarenador y se transportan hasta la planta de tratamiento.

El caudal que suministra la planta de tratamiento, ver ilustracion 9, es de 10 l/s y se almacena en un tanque en concreto que permite la dispocision de agua en todo momento con una capacidad de 300M³, al que adicionalmente se le instalaron 6 tanques plasticos para aumentar la capacidad en 30m³ mas.



Ilustración 8 – Planta de tratamiento y tanque de almacenamiento

En caso de alguna eventualidad en el sistema de acueducto, aguas arriba o aguas abajo del tanque de almacenamiento, se tienen instaladas dentro del compartimiento exterior de concreto ubicado en un costado del tanque en cuestión, dos válvulas de cierre de diámetro 6” en HD, la primera se encuentra operando en el tramo de tubería normal al fondo del tanque de almacenamiento, que viene desde el desarenador, la segunda válvula opera aguas abajo del tanque de almacenamiento.

Mediante valvulas de paso el agua fluye hacia la la red de distribucion en direccion a Mochuelo bajo. En este recorrido se encuentran ubicadas valvulas reductoras de presion para un total de 5 unidades. La primera camara, ver ilustracion 10, esta localizada en la Carrera 1 con



Ilustración 9 – Cámara de quiebre y estación reductora de presión

calle 9, la segunda ubicada en la Carrera 4 con calle 8, la tercera se encuentra en la Carrera 4 con calle 12, la cuarta localizada en la Carrera 6 con calle 7 y finalmente la quinta cámara esta ubicada en la Carrera 9 con calle 8. Estas estructuras que contiene las válvulas reductoras de presión están construidas en concreto reforzado y se encuentran en buen estado estructural e hidráulico.

La red de distribución a la comunidad, según los planos aprobados de construcción para las redes de acueducto AUACACT construidas en el año 2001 en tuberías en material PVC y diámetros

de 6", 4", 3" y 2" para un trazado de mayor a menor diámetro, salen del tanque de almacenamiento en una línea de 6" en PVC para luego derivarse en dos direcciones:

a. Línea 1: La primera línea conduce agua para la zona rural e industrial., tiene una longitud de 702 m, transporta el líquido en tubería de PVC de diámetro de 3" para luego más adelante volver a bifurcarse en dos líneas, una de 838m de longitud de 2" y otra 193 m de 3" hasta una cámara de quiebre la cual sale una tubería de longitud 625,07 m en 2" PVC.

b. Línea 2: conducen el agua para consumo en tubería 6" para los sectores Paticos, Lagunitas, Barranquitos y La Esmeralda. Consiste en una red de 807 m de longitud en 6" PVC que inicia en el tanque de almacenamiento y llega hasta una estación reguladora de presión a la entrada del área donde se concentran los usuarios.

Este sistema abastece a 1260 usuarios representados en 5040 habitantes, empleando para ello la conducción del líquido por gravedad.

15.1.2 TOPOGRAFIA DE LA RED

En lo que se refiere al análisis y clasificación de información, como primera instancia se recibió el levantamiento topográfico, el cual se realizó bajo la norma técnica de servicios NS-030 "Lineamientos para Trabajos de Topográficos", a partir de dos puntos con GPS, ver ilustración 11 anterior, de alta precisión cerca al proyecto Cerrito Blanco, localidad de Ciudad Bolívar.

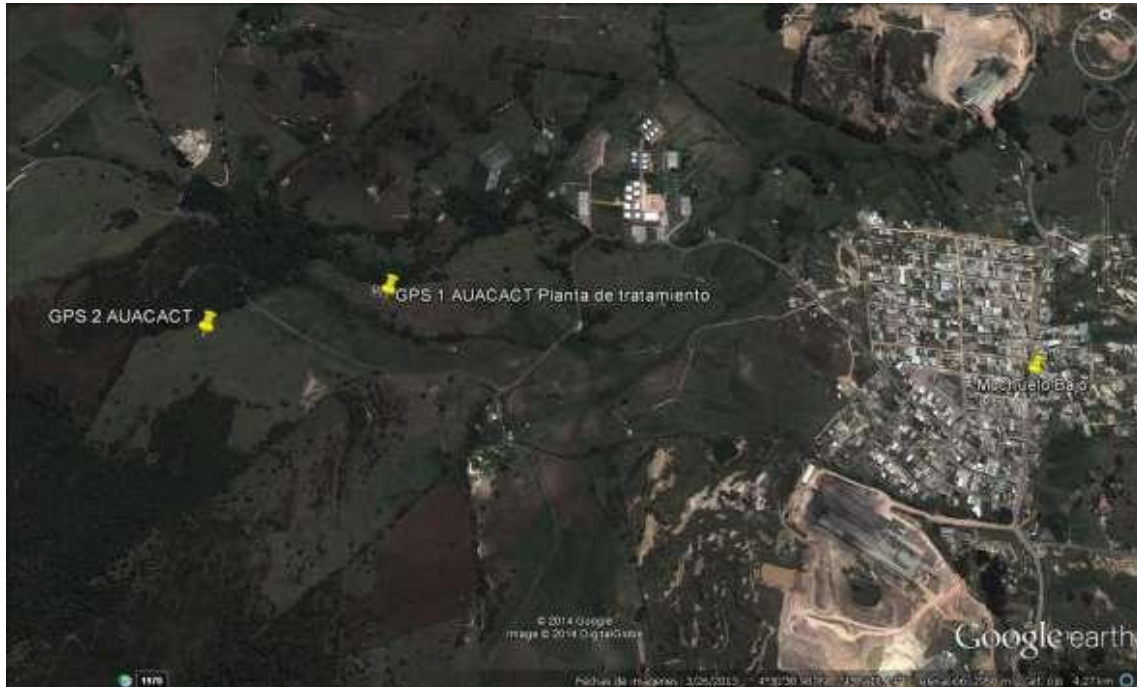


Ilustración 10 - Localización de los puntos GPS acueducto AUACACT

En lo que se refiere al análisis y clasificación de información, como primera instancia se recibió el levantamiento topográfico, ver ilustración 12, el cual se realizó bajo la norma técnica de servicios NS-030 “Lineamientos para Trabajos de Topográficos”, a partir de dos puntos con GPS de alta precisión cerca al proyecto Cerrito Blanco, localidad de Ciudad Bolívar. La información de cotas fue confrontada con la información de coberturas de curvas de nivel entregada por Catastro Distrital. A partir de esta correlación entre las dos fuentes de información se realizaron algunas correcciones y se complementaron algunos sectores que carecían de cotas, parcial o totalmente.

Una vez exportado el archivo de AutoCAD a EPANET, de forma manual se corrigieron longitudes de la tubería y cotas de nodos que estuvieran por fuera de lo normal, así como también tramos desalineados, tuberías sobrantes, nodos adicionales necesarios, se verificó las ubicaciones de la fuente de suministro, etc. Inicialmente se supusieron las rugosidades absolutas establecidas según el material de los tubos en la Tabla 2 del presente documento.

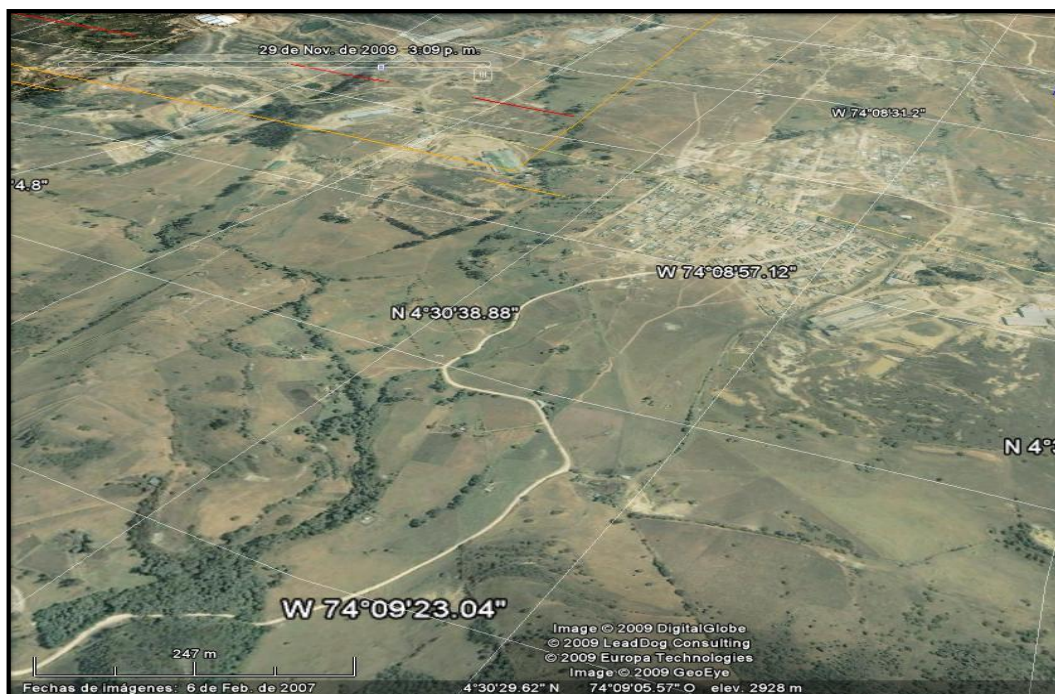


Ilustración 11 - Topografía del acueducto ACUACACT

15.1.3 ASIGNACION DE DEMANDAS INICIALES A LOS NODOS

Siguiendo con el análisis de información al recibir la relación de los consumos asociados a direcciones de todo el sector, se corrigieron distintos datos que tenían direcciones erróneas y facturaciones nulas para poder asignarlo a un nodo en el momento de cargar el modelo inicial.

Con respecto a la distribución de demandas en los nudos de la red, se tomaron los datos de facturación del consumo de los usuarios de varios meses suministrados por la empresa prestadora del servicio, se calculó el consumo promedio de cada usuario y el consumo promedio total. La asignación de demandas de usuarios a los nudos se hizo al más cercano de forma manual, y equitativamente entre dos nudos de un mismo tramo correspondiente hacia ambos direcciones.

A continuación se relaciona en la tabla 5 la lista de los primeros 23 usuarios de 1260 con sus respectivos consumos facturados de 3 meses consecutivos, el consumo promedio y su nudo asignado.

Tabla 5 – Usuarios del acueducto con consumos, dirección y nodo asignado

PROPIETARIO	CONSUMO 1 (m3)	CONSUMO 2 (m3)	CONSUMO 3(m3)	CONSUMO PROMEDIO(m3)	DIRECCION	NODO	BARRIO	ESTRATO
PEDRO GUERRERO MORENO	1	14	11	9	DG 91 No 18- SUR	J-355	LAGUNITAS	1
LUIS ALFREDO MEDINA JIMENEZ	8	10	9	9	CR 18F No 91-73 SUR	J-159	LAGUNITAS	1
MARIELA SOLER GOMEZ	16	16	12	15	TV 18 No 93-50 SUR	J-159	LAGUNITAS	1
NELLY CRISTINA MUÑOZ HUERFANO	6	8	5	6	CR 18F No 93-09 SUR	J-175	LAGUNITAS	1
RUTH MARINA MUÑOZ DE DIAZ	14	10	13	12	CR 18F No 91- SUR	J-175	LAGUNITAS	1
BENEDICTO MONTAÑO	11	12	8	10	DG 91C No 18F-29 SUR	J-175	LAGUNITAS	1
OLGA LUCIA ROA SANCHEZ	4	8	9	7	DG 91 No 18G-03	J-159	LAGUNITAS	1
BUENAVENTURA RODRIGUEZ VANEGAS	8	7	9	8	DG 91C No 18G-07 SUR	J-184	LAGUNITAS	1
MARTHA ISABEL GAVIRIA CABEZAS	1	2	1	1	DG 91C No 18G-29 SUR	J-184	LAGUNITAS	1
JORGE BELLO RODRIGUEZ	16	25	19	20	DG 91 No 18-29	J-159	LAGUNITAS	1
PEDRO IGNACIO BELTRAN	33	44	25	34	DG 91 No 18G-11 SUR	J-159	LAGUNITAS	1
LUCY MENDIVELSO	-	-	-	0	DG 91G No 18-43 SUR	J-159	LAGUNITAS	1
JHON ENRIQUE MARTINEZ RODRIGUEZ	3	5	3	4	DG 91 No 18G-55 SUR	J-159	LAGUNITAS	1
ELSA MARIA ALVARADO COTRINA	14	10	8	11	DG 91 No 18G-61 SUR	J-159	LAGUNITAS	1
ANA MILENA PARRA SOSA	12	12	9	11	CR 18H No 93-05 sur	J-159	LAGUNITAS	1
FELIX GOYENECHÉ GUTIERREZ	10	13	9	11	DG 91 No 18H-11 SUR	J-159	LAGUNITAS	1
JOSE JAIME GONZALEZ	6	12	6	8	DG 91C SUR No 18M-07	J-144	LAGUNITAS	1
PIOQUINTO MARENTES	9	9	7	8	DG 91 No 18H-35	J-159	LAGUNITAS	1
JUDY ESPITIA MORALES	10	12	9	10	TV 18N No 92-28 SUR	J-145	LAGUNITAS	1
ANA MARIA CAMELO GONZALEZ	2	10	5	6	DG 91C SUR No 18H - 53	J-184	LAGUNITAS	1
ESTEBAN CANTOR VIGOYA	7	8	5	7	DG 91 SUR No 18L-06	J-159	LAGUNITAS	1
JOSE JAIME GONZALEZ	17	12	9	13	DG 91C No 18M-17 SUR	J-144	LAGUNITAS	1
JORGE RENSO BELLO FONSECA	1	-	6	2	TV 18N No 93-36 SUR	J-145	LAGUNITAS	1

Una vez las demandas de los usuarios fueron asignadas a los nodos como se muestra en la tabla anterior, entonces la tabulación de cada nodo con su respectiva demanda total quedaría de la siguiente manera como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6 – Demandas iniciales en cada nodo del sistema

DEMANDA(L/S)	NODO
0.044	1
0.027	J-111
0.263	J-116
0.134	J-117
0.006	J-119
0.131	J-122
0.138	J-125
0.008	J-127
0.037	J-132
0.047	J-135
0.085	J-136
0.168	J-139
0.025	J-144
0.015	J-145
0.003	J-149
0.023	J-153
0.017	J-158
0.167	J-159
0.086	J-160
0.001	J-162
0.110	J-163
0.092	J-164
0.011	J-167
0.019	J-168
0.086	J-169
0.003	J-173
0.077	J-175
0.064	J-18
0.025	J-183
0.088	J-184

DEMANDA(L/S)	NODO
0.022	J-185
0.034	J-187
0.012	J-193
0.018	J-194
0.174	J-196
0.004	J-198
0.069	J-204
0.008	J-207
0.049	J-209
0.028	J-212
0.023	J-22
0.014	J-222
0.028	J-223
0.012	J-224
0.036	J-228
0.028	J-23
0.006	J-25
0.013	J-251
0.006	J-255
0.176	J-261
0.006	J-264
0.006	J-27
0.035	J-277
0.068	J-28
0.038	J-29
0.001	J-3
0.058	J-31
0.038	J-312
0.058	J-315
0.020	J-318
0.100	J-32
0.002	J-320
0.017	J-332
0.038	J-337
0.005	J-338
0.059	J-344
0.011	J-345

DEMANDA(L/S)	NODO
0.001	J-346
0.007	J-347
0.008	J-352
0.016	J-355
0.079	J-356
0.041	J-357
0.025	J-359
0.089	J-360
0.040	J-361
0.037	J-362
0.045	J-363
0.009	J-365
0.337	J-366
0.372	J-367
0.015	J-371
0.011	J-374
0.029	J-375
0.140	J-376
0.112	J-377
0.046	J-384
0.188	J-385
0.040	J-66
0.061	J-87
0.003	J-91
0.035	JA1
5.110	TOTAL

El consumo promedio total equivale a la suma de todos los consumos promedios de los usuarios del acueducto AUACACT, el cual es 5,11 L/S.

15.1.4 MODELO INICIAL EN EPANET

El sistema de abastecimiento de agua potable AUACACT está compuesto por las características principales recogidas en la ilustración 13 que se muestra a continuación, y esta tabulada de acuerdo a la información recogida inicialmente y posteriormente cargada en el programa EPANET.

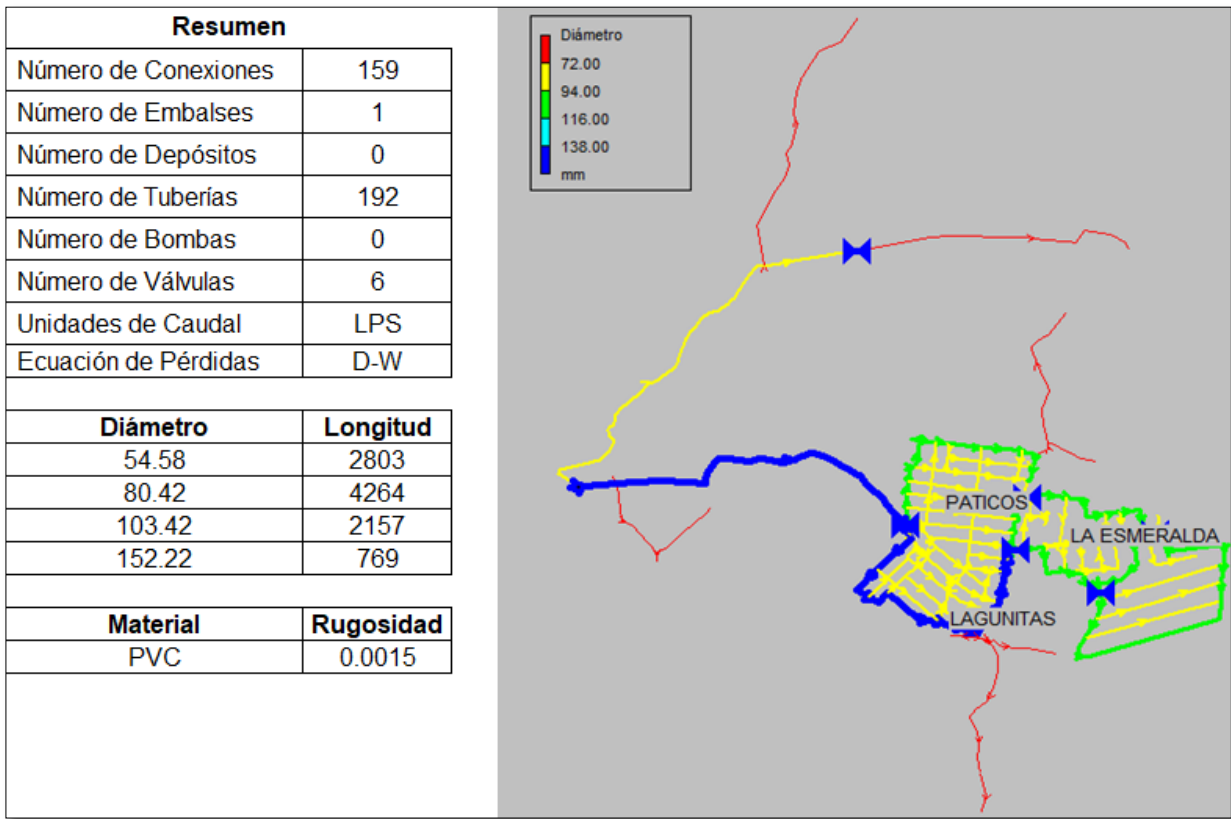


Ilustración 12 – Características principales del modelo inicial y red en EPANET

La metodología adoptada para la calibración del sistema a este primer paso lo llama Modelo Inicial en donde se cargaron los diámetros, rugosidades iniciales, longitudes, ubicación de nodos, alturas de los nodos, ubicación de válvulas y demandas iniciales. Seguidamente se corre el modelo sin ningún error, lo que indica que el sistema está balanceado.

15.1.5 PATRONES DE CONSUMO Y CURVAS DE CALIBRACION

Un patrón de consumo se obtiene partir de los registros de macro medición de caudal a la salida de los tanques, ver ilustración 14, y permiten modelar las variaciones en el consumo de los usuarios a lo largo del día. Para ello se contó con el suministro de información por parte de la Secretaria Distrital de Hábitat, acompañamiento de los representantes del acueducto veredal AUACACT y apoyo técnico del EAAB quienes instalaron un equipo de medición ultrasónico de caudal fijo a la salida de la PTAP hacia los 4 barrios y la zona industrial de Mochuelo Bajo, registrando medidas de caudal cada 15 minutos desde el 14 al 19 de junio del 2018.



Ilustración 13 - Toma de caudales a la salida del tanque de abastecimiento

FUENTE: Informe técnico de la SDHT

En la tabla 7 se relacionan todas las medidas registradas por el caudalímetro instalado a la salida del tanque de almacenamiento de agua potable del acueducto, organizadas por día y cada quince minutos desde las 10.30 am del día 14 de junio de 2018 hasta el día 19 de junio del 2018 a las 10.30 am.

Tabla 7 – Caudales horarios a la salida del tanque de almacenamiento

N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad	N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad	N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad
1	14/06/2018	10:30 a. m.	7.195	l/s	161	16/06/2018	2:30 a. m.	1.262	l/s	321	17/06/2018	6:30 p. m.	5.537	l/s
2	14/06/2018	10:45 a. m.	8.765	l/s	162	16/06/2018	2:45 a. m.	1.241	l/s	322	17/06/2018	6:45 p. m.	5.325	l/s
3	14/06/2018	11:00 a. m.	7.928	l/s	163	16/06/2018	3:00 a. m.	1.201	l/s	323	17/06/2018	7:00 p. m.	5.258	l/s
4	14/06/2018	11:15 a. m.	8.312	l/s	164	16/06/2018	3:15 a. m.	1.245	l/s	324	17/06/2018	7:15 p. m.	4.457	l/s
5	14/06/2018	11:30 a. m.	8.703	l/s	165	16/06/2018	3:30 a. m.	1.316	l/s	325	17/06/2018	7:30 p. m.	4.784	l/s
6	14/06/2018	11:45 a. m.	9.021	l/s	166	16/06/2018	3:45 a. m.	1.665	l/s	326	17/06/2018	7:45 p. m.	4.316	l/s
7	14/06/2018	12:00 p. m.	9.184	l/s	167	16/06/2018	4:00 a. m.	2.074	l/s	327	17/06/2018	8:00 p. m.	4.689	l/s
8	14/06/2018	12:15 p. m.	9.251	l/s	168	16/06/2018	4:15 a. m.	2.013	l/s	328	17/06/2018	8:15 p. m.	5.515	l/s
9	14/06/2018	12:30 p. m.	8.724	l/s	169	16/06/2018	4:30 a. m.	2.488	l/s	329	17/06/2018	8:30 p. m.	5.425	l/s
10	14/06/2018	12:45 p. m.	8.122	l/s	170	16/06/2018	4:45 a. m.	2.761	l/s	330	17/06/2018	8:45 p. m.	4.926	l/s
11	14/06/2018	1:00 p. m.	7.784	l/s	171	16/06/2018	5:00 a. m.	3.168	l/s	331	17/06/2018	9:00 p. m.	5.05	l/s
12	14/06/2018	1:15 p. m.	7.792	l/s	172	16/06/2018	5:15 a. m.	3.471	l/s	332	17/06/2018	9:15 p. m.	4.638	l/s
13	14/06/2018	1:30 p. m.	8.571	l/s	173	16/06/2018	5:30 a. m.	3.732	l/s	333	17/06/2018	9:30 p. m.	3.749	l/s
14	14/06/2018	1:45 p. m.	8.592	l/s	174	16/06/2018	5:45 a. m.	4.284	l/s	334	17/06/2018	9:45 p. m.	3.297	l/s
15	14/06/2018	2:00 p. m.	7.699	l/s	175	16/06/2018	6:00 a. m.	4.995	l/s	335	17/06/2018	10:00 p. m.	2.651	l/s
16	14/06/2018	2:15 p. m.	6.935	l/s	176	16/06/2018	6:15 a. m.	5.582	l/s	336	17/06/2018	10:15 p. m.	2.82	l/s
17	14/06/2018	2:30 p. m.	7.156	l/s	177	16/06/2018	6:30 a. m.	5.983	l/s	337	17/06/2018	10:30 p. m.	2.069	l/s
18	14/06/2018	2:45 p. m.	6.82	l/s	178	16/06/2018	6:45 a. m.	5.826	l/s	338	17/06/2018	10:45 p. m.	1.521	l/s
19	14/06/2018	3:00 p. m.	6.162	l/s	179	16/06/2018	7:00 a. m.	5.39	l/s	339	17/06/2018	11:00 p. m.	1.543	l/s
20	14/06/2018	3:15 p. m.	6.537	l/s	180	16/06/2018	7:15 a. m.	4.801	l/s	340	17/06/2018	11:15 p. m.	1.269	l/s
21	14/06/2018	3:30 p. m.	7.136	l/s	181	16/06/2018	7:30 a. m.	5.654	l/s	341	17/06/2018	11:30 p. m.	1.127	l/s
22	14/06/2018	3:45 p. m.	6.385	l/s	182	16/06/2018	7:45 a. m.	5.714	l/s	342	17/06/2018	11:45 p. m.	0.913	l/s
23	14/06/2018	4:00 p. m.	6.03	l/s	183	16/06/2018	8:00 a. m.	6.207	l/s	343	18/06/2018	12:00 a. m.	0.84	l/s
24	14/06/2018	4:15 p. m.	6.547	l/s	184	16/06/2018	8:15 a. m.	7.06	l/s	344	18/06/2018	12:15 a. m.	0.982	l/s
25	14/06/2018	4:30 p. m.	7.003	l/s	185	16/06/2018	8:30 a. m.	7.222	l/s	345	18/06/2018	12:30 a. m.	0.903	l/s
26	14/06/2018	4:45 p. m.	6.153	l/s	186	16/06/2018	8:45 a. m.	7.414	l/s	346	18/06/2018	12:45 a. m.	0.817	l/s
27	14/06/2018	5:00 p. m.	6.247	l/s	187	16/06/2018	9:00 a. m.	7.645	l/s	347	18/06/2018	1:00 a. m.	0.737	l/s
28	14/06/2018	5:15 p. m.	6.952	l/s	188	16/06/2018	9:15 a. m.	8.168	l/s	348	18/06/2018	1:15 a. m.	0.608	l/s
29	14/06/2018	5:30 p. m.	7.331	l/s	189	16/06/2018	9:30 a. m.	8.752	l/s	349	18/06/2018	1:30 a. m.	0.737	l/s
30	14/06/2018	5:45 p. m.	7.043	l/s	190	16/06/2018	9:45 a. m.	9.975	l/s	350	18/06/2018	1:45 a. m.	0.692	l/s
31	14/06/2018	6:00 p. m.	6.285	l/s	191	16/06/2018	10:00 a. m.	9.971	l/s	351	18/06/2018	2:00 a. m.	0.643	l/s
32	14/06/2018	6:15 p. m.	6.316	l/s	192	16/06/2018	10:15 a. m.	9.818	l/s	352	18/06/2018	2:15 a. m.	0.654	l/s

N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad	N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad	N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad
33	14/06/2018	6:30 p. m.	6.714	l/s	193	16/06/2018	10:30 a. m.	9.885	l/s	353	18/06/2018	2:30 a. m.	0.693	l/s
34	14/06/2018	6:45 p. m.	6.667	l/s	194	16/06/2018	10:45 a. m.	10.48	l/s	354	18/06/2018	2:45 a. m.	0.633	l/s
35	14/06/2018	7:00 p. m.	6.101	l/s	195	16/06/2018	11:00 a. m.	10.53	l/s	355	18/06/2018	3:00 a. m.	0.665	l/s
36	14/06/2018	7:15 p. m.	5.356	l/s	196	16/06/2018	11:15 a. m.	11.43	l/s	356	18/06/2018	3:15 a. m.	0.708	l/s
37	14/06/2018	7:30 p. m.	6.287	l/s	197	16/06/2018	11:30 a. m.	12.55	l/s	357	18/06/2018	3:30 a. m.	0.828	l/s
38	14/06/2018	7:45 p. m.	6.142	l/s	198	16/06/2018	11:45 a. m.	12.19	l/s	358	18/06/2018	3:45 a. m.	0.925	l/s
39	14/06/2018	8:00 p. m.	5.646	l/s	199	16/06/2018	12:00 p. m.	12.62	l/s	359	18/06/2018	4:00 a. m.	1.231	l/s
40	14/06/2018	8:15 p. m.	5.703	l/s	200	16/06/2018	12:15 p. m.	12.17	l/s	360	18/06/2018	4:15 a. m.	1.733	l/s
41	14/06/2018	8:30 p. m.	5.432	l/s	201	16/06/2018	12:30 p. m.	10.75	l/s	361	18/06/2018	4:30 a. m.	1.999	l/s
42	14/06/2018	8:45 p. m.	5.544	l/s	202	16/06/2018	12:45 p. m.	11.38	l/s	362	18/06/2018	4:45 a. m.	2.131	l/s
43	14/06/2018	9:00 p. m.	5.318	l/s	203	16/06/2018	1:00 p. m.	10.62	l/s	363	18/06/2018	5:00 a. m.	2.462	l/s
44	14/06/2018	9:15 p. m.	4.578	l/s	204	16/06/2018	1:15 p. m.	10.38	l/s	364	18/06/2018	5:15 a. m.	2.806	l/s
45	14/06/2018	9:30 p. m.	3.59	l/s	205	16/06/2018	1:30 p. m.	10.26	l/s	365	18/06/2018	5:30 a. m.	3.006	l/s
46	14/06/2018	9:45 p. m.	2.913	l/s	206	16/06/2018	1:45 p. m.	11.15	l/s	366	18/06/2018	5:45 a. m.	3.574	l/s
47	14/06/2018	10:00 p. m.	3.07	l/s	207	16/06/2018	2:00 p. m.	8.947	l/s	367	18/06/2018	6:00 a. m.	4.047	l/s
48	14/06/2018	10:15 p. m.	3.088	l/s	208	16/06/2018	2:15 p. m.	9.138	l/s	368	18/06/2018	6:15 a. m.	4.27	l/s
49	14/06/2018	10:30 p. m.	2.737	l/s	209	16/06/2018	2:30 p. m.	8.372	l/s	369	18/06/2018	6:30 a. m.	4.138	l/s
50	14/06/2018	10:45 p. m.	2.429	l/s	210	16/06/2018	2:45 p. m.	9.031	l/s	370	18/06/2018	6:45 a. m.	4.363	l/s
51	14/06/2018	11:00 p. m.	2.003	l/s	211	16/06/2018	3:00 p. m.	8.55	l/s	371	18/06/2018	7:00 a. m.	4.485	l/s
52	14/06/2018	11:15 p. m.	2.177	l/s	212	16/06/2018	3:15 p. m.	7.728	l/s	372	18/06/2018	7:15 a. m.	4.765	l/s
53	14/06/2018	11:30 p. m.	1.669	l/s	213	16/06/2018	3:30 p. m.	8.719	l/s	373	18/06/2018	7:30 a. m.	4.736	l/s
54	14/06/2018	11:45 p. m.	1.664	l/s	214	16/06/2018	3:45 p. m.	8.226	l/s	374	18/06/2018	7:45 a. m.	6.265	l/s
55	15/06/2018	12:00 a. m.	1.665	l/s	215	16/06/2018	4:00 p. m.	7.326	l/s	375	18/06/2018	8:00 a. m.	6.375	l/s
56	15/06/2018	12:15 a. m.	1.434	l/s	216	16/06/2018	4:15 p. m.	7.681	l/s	376	18/06/2018	8:15 a. m.	6.73	l/s
57	15/06/2018	12:30 a. m.	1.496	l/s	217	16/06/2018	4:30 p. m.	6.67	l/s	377	18/06/2018	8:30 a. m.	7.255	l/s
58	15/06/2018	12:45 a. m.	1.501	l/s	218	16/06/2018	4:45 p. m.	7.396	l/s	378	18/06/2018	8:45 a. m.	7.876	l/s
59	15/06/2018	1:00 a. m.	1.277	l/s	219	16/06/2018	5:00 p. m.	6.697	l/s	379	18/06/2018	9:00 a. m.	6.564	l/s
60	15/06/2018	1:15 a. m.	1.34	l/s	220	16/06/2018	5:15 p. m.	6.98	l/s	380	18/06/2018	9:15 a. m.	8.156	l/s
61	15/06/2018	1:30 a. m.	1.297	l/s	221	16/06/2018	5:30 p. m.	5.991	l/s	381	18/06/2018	9:30 a. m.	9.095	l/s
62	15/06/2018	1:45 a. m.	1.297	l/s	222	16/06/2018	5:45 p. m.	6.243	l/s	382	18/06/2018	9:45 a. m.	8.603	l/s
63	15/06/2018	2:00 a. m.	1.297	l/s	223	16/06/2018	6:00 p. m.	4.732	l/s	383	18/06/2018	10:00 a. m.	9.675	l/s
64	15/06/2018	2:15 a. m.	1.289	l/s	224	16/06/2018	6:15 p. m.	4.611	l/s	384	18/06/2018	10:15 a. m.	8.993	l/s
65	15/06/2018	2:30 a. m.	1.35	l/s	225	16/06/2018	6:30 p. m.	4.367	l/s	385	18/06/2018	10:30 a. m.	8.691	l/s
66	15/06/2018	2:45 a. m.	1.292	l/s	226	16/06/2018	6:45 p. m.	4.934	l/s	386	18/06/2018	10:45 a. m.	8.689	l/s

N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad	N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad	N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad
67	15/06/2018	3:00 a. m.	1.292	l/s	227	16/06/2018	7:00 p. m.	5.263	l/s	387	18/06/2018	11:00 a. m.	9.174	l/s
68	15/06/2018	3:15 a. m.	1.439	l/s	228	16/06/2018	7:15 p. m.	3.977	l/s	388	18/06/2018	11:15 a. m.	10.08	l/s
69	15/06/2018	3:30 a. m.	1.573	l/s	229	16/06/2018	7:30 p. m.	4.695	l/s	389	18/06/2018	11:30 a. m.	9.466	l/s
70	15/06/2018	3:45 a. m.	1.92	l/s	230	16/06/2018	7:45 p. m.	4.788	l/s	390	18/06/2018	11:45 a. m.	9.715	l/s
71	15/06/2018	4:00 a. m.	2.251	l/s	231	16/06/2018	8:00 p. m.	4.621	l/s	391	18/06/2018	12:00 p. m.	9.603	l/s
72	15/06/2018	4:15 a. m.	2.386	l/s	232	16/06/2018	8:15 p. m.	3.71	l/s	392	18/06/2018	12:15 p. m.	9.61	l/s
73	15/06/2018	4:30 a. m.	3.002	l/s	233	16/06/2018	8:30 p. m.	3.843	l/s	393	18/06/2018	12:30 p. m.	9.495	l/s
74	15/06/2018	4:45 a. m.	3.243	l/s	234	16/06/2018	8:45 p. m.	4.962	l/s	394	18/06/2018	12:45 p. m.	9.292	l/s
75	15/06/2018	5:00 a. m.	3.691	l/s	235	16/06/2018	9:00 p. m.	3.951	l/s	395	18/06/2018	1:00 p. m.	8.582	l/s
76	15/06/2018	5:15 a. m.	4.413	l/s	236	16/06/2018	9:15 p. m.	3.508	l/s	396	18/06/2018	1:15 p. m.	9.104	l/s
77	15/06/2018	5:30 a. m.	5.439	l/s	237	16/06/2018	9:30 p. m.	3.397	l/s	397	18/06/2018	1:30 p. m.	9.184	l/s
78	15/06/2018	5:45 a. m.	6.135	l/s	238	16/06/2018	9:45 p. m.	2.549	l/s	398	18/06/2018	1:45 p. m.	9.033	l/s
79	15/06/2018	6:00 a. m.	6.996	l/s	239	16/06/2018	10:00 p. m.	2.06	l/s	399	18/06/2018	2:00 p. m.	8.707	l/s
80	15/06/2018	6:15 a. m.	7.015	l/s	240	16/06/2018	10:15 p. m.	1.661	l/s	400	18/06/2018	2:15 p. m.	7.816	l/s
81	15/06/2018	6:30 a. m.	6.518	l/s	241	16/06/2018	10:30 p. m.	1.719	l/s	401	18/06/2018	2:30 p. m.	8.92	l/s
82	15/06/2018	6:45 a. m.	5.318	l/s	242	16/06/2018	10:45 p. m.	1.296	l/s	402	18/06/2018	2:45 p. m.	7.997	l/s
83	15/06/2018	7:00 a. m.	6.687	l/s	243	16/06/2018	11:00 p. m.	1.299	l/s	403	18/06/2018	3:00 p. m.	8.007	l/s
84	15/06/2018	7:15 a. m.	6.647	l/s	244	16/06/2018	11:15 p. m.	0.861	l/s	404	18/06/2018	3:15 p. m.	8.781	l/s
85	15/06/2018	7:30 a. m.	7.392	l/s	245	16/06/2018	11:30 p. m.	0.958	l/s	405	18/06/2018	3:30 p. m.	7.649	l/s
86	15/06/2018	7:45 a. m.	6.856	l/s	246	16/06/2018	11:45 p. m.	0.659	l/s	406	18/06/2018	3:45 p. m.	7.195	l/s
87	15/06/2018	8:00 a. m.	7.054	l/s	247	17/06/2018	12:00 a. m.	0.416	l/s	407	18/06/2018	4:00 p. m.	6.619	l/s
88	15/06/2018	8:15 a. m.	6.973	l/s	248	17/06/2018	12:15 a. m.	0.282	l/s	408	18/06/2018	4:15 p. m.	6.663	l/s
89	15/06/2018	8:30 a. m.	7.267	l/s	249	17/06/2018	12:30 a. m.	0.198	l/s	409	18/06/2018	4:30 p. m.	6.673	l/s
90	15/06/2018	8:45 a. m.	7.432	l/s	250	17/06/2018	12:45 a. m.	0.204	l/s	410	18/06/2018	4:45 p. m.	6.575	l/s
91	15/06/2018	9:00 a. m.	8.451	l/s	251	17/06/2018	1:00 a. m.	0.193	l/s	411	18/06/2018	5:00 p. m.	6.152	l/s
92	15/06/2018	9:15 a. m.	7.506	l/s	252	17/06/2018	1:15 a. m.	0.215	l/s	412	18/06/2018	5:15 p. m.	6.872	l/s
93	15/06/2018	9:30 a. m.	7.708	l/s	253	17/06/2018	1:30 a. m.	0.14	l/s	413	18/06/2018	5:30 p. m.	7.1	l/s
94	15/06/2018	9:45 a. m.	7.374	l/s	254	17/06/2018	1:45 a. m.	0.204	l/s	414	18/06/2018	5:45 p. m.	6.983	l/s
95	15/06/2018	10:00 a. m.	8.094	l/s	255	17/06/2018	2:00 a. m.	0.169	l/s	415	18/06/2018	6:00 p. m.	7.241	l/s
96	15/06/2018	10:15 a. m.	7.813	l/s	256	17/06/2018	2:15 a. m.	0.197	l/s	416	18/06/2018	6:15 p. m.	6.281	l/s
97	15/06/2018	10:30 a. m.	8.3	l/s	257	17/06/2018	2:30 a. m.	0.133	l/s	417	18/06/2018	6:30 p. m.	7.249	l/s
98	15/06/2018	10:45 a. m.	7.771	l/s	258	17/06/2018	2:45 a. m.	0.091	l/s	418	18/06/2018	6:45 p. m.	6.622	l/s
99	15/06/2018	11:00 a. m.	7.658	l/s	259	17/06/2018	3:00 a. m.	0.194	l/s	419	18/06/2018	7:00 p. m.	6.443	l/s
100	15/06/2018	11:15 a. m.	7.895	l/s	260	17/06/2018	3:15 a. m.	0.207	l/s	420	18/06/2018	7:15 p. m.	6.448	l/s

N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad	N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad	N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad
101	15/06/2018	11:30 a. m.	7.496	l/s	261	17/06/2018	3:30 a. m.	0.363	l/s	421	18/06/2018	7:30 p. m.	7.282	l/s
102	15/06/2018	11:45 a. m.	7.373	l/s	262	17/06/2018	3:45 a. m.	0.375	l/s	422	18/06/2018	7:45 p. m.	6.662	l/s
103	15/06/2018	12:00 p. m.	8.08	l/s	263	17/06/2018	4:00 a. m.	0.404	l/s	423	18/06/2018	8:00 p. m.	6.651	l/s
104	15/06/2018	12:15 p. m.	7.571	l/s	264	17/06/2018	4:15 a. m.	0.53	l/s	424	18/06/2018	8:15 p. m.	6.574	l/s
105	15/06/2018	12:30 p. m.	7.768	l/s	265	17/06/2018	4:30 a. m.	0.537	l/s	425	18/06/2018	8:30 p. m.	5.66	l/s
106	15/06/2018	12:45 p. m.	8.182	l/s	266	17/06/2018	4:45 a. m.	0.744	l/s	426	18/06/2018	8:45 p. m.	4.643	l/s
107	15/06/2018	1:00 p. m.	8.244	l/s	267	17/06/2018	5:00 a. m.	0.944	l/s	427	18/06/2018	9:00 p. m.	5.08	l/s
108	15/06/2018	1:15 p. m.	8.208	l/s	268	17/06/2018	5:15 a. m.	1.048	l/s	428	18/06/2018	9:15 p. m.	4.199	l/s
109	15/06/2018	1:30 p. m.	8.284	l/s	269	17/06/2018	5:30 a. m.	1.19	l/s	429	18/06/2018	9:30 p. m.	3.021	l/s
110	15/06/2018	1:45 p. m.	8.015	l/s	270	17/06/2018	5:45 a. m.	1.41	l/s	430	18/06/2018	9:45 p. m.	2.842	l/s
111	15/06/2018	2:00 p. m.	7.937	l/s	271	17/06/2018	6:00 a. m.	1.369	l/s	431	18/06/2018	10:00 p. m.	2.775	l/s
112	15/06/2018	2:15 p. m.	8.279	l/s	272	17/06/2018	6:15 a. m.	1.754	l/s	432	18/06/2018	10:15 p. m.	2.706	l/s
113	15/06/2018	2:30 p. m.	7.844	l/s	273	17/06/2018	6:30 a. m.	3.85	l/s	433	18/06/2018	10:30 p. m.	2.095	l/s
114	15/06/2018	2:45 p. m.	7.635	l/s	274	17/06/2018	6:45 a. m.	5.583	l/s	434	18/06/2018	10:45 p. m.	1.885	l/s
115	15/06/2018	3:00 p. m.	7.839	l/s	275	17/06/2018	7:00 a. m.	4.043	l/s	435	18/06/2018	11:00 p. m.	1.592	l/s
116	15/06/2018	3:15 p. m.	7.574	l/s	276	17/06/2018	7:15 a. m.	4.497	l/s	436	18/06/2018	11:15 p. m.	1.691	l/s
117	15/06/2018	3:30 p. m.	7.262	l/s	277	17/06/2018	7:30 a. m.	5.231	l/s	437	18/06/2018	11:30 p. m.	1.302	l/s
118	15/06/2018	3:45 p. m.	7.646	l/s	278	17/06/2018	7:45 a. m.	5.65	l/s	438	18/06/2018	11:45 p. m.	1.277	l/s
119	15/06/2018	4:00 p. m.	6.061	l/s	279	17/06/2018	8:00 a. m.	6.639	l/s	439	19/06/2018	12:00 a. m.	1.132	l/s
120	15/06/2018	4:15 p. m.	6.517	l/s	280	17/06/2018	8:15 a. m.	7.635	l/s	440	19/06/2018	12:15 a. m.	0.969	l/s
121	15/06/2018	4:30 p. m.	6.287	l/s	281	17/06/2018	8:30 a. m.	7.958	l/s	441	19/06/2018	12:30 a. m.	1.029	l/s
122	15/06/2018	4:45 p. m.	6.764	l/s	282	17/06/2018	8:45 a. m.	7.971	l/s	442	19/06/2018	12:45 a. m.	0.91	l/s
123	15/06/2018	5:00 p. m.	7.191	l/s	283	17/06/2018	9:00 a. m.	9.479	l/s	443	19/06/2018	1:00 a. m.	0.877	l/s
124	15/06/2018	5:15 p. m.	6.491	l/s	284	17/06/2018	9:15 a. m.	9.519	l/s	444	19/06/2018	1:15 a. m.	0.822	l/s
125	15/06/2018	5:30 p. m.	6.48	l/s	285	17/06/2018	9:30 a. m.	10.03	l/s	445	19/06/2018	1:30 a. m.	0.759	l/s
126	15/06/2018	5:45 p. m.	6.292	l/s	286	17/06/2018	9:45 a. m.	10.71	l/s	446	19/06/2018	1:45 a. m.	0.807	l/s
127	15/06/2018	6:00 p. m.	6.417	l/s	287	17/06/2018	10:00 a. m.	10.94	l/s	447	19/06/2018	2:00 a. m.	0.838	l/s
128	15/06/2018	6:15 p. m.	6.375	l/s	288	17/06/2018	10:15 a. m.	11.74	l/s	448	19/06/2018	2:15 a. m.	0.852	l/s
129	15/06/2018	6:30 p. m.	5.5	l/s	289	17/06/2018	10:30 a. m.	10.57	l/s	449	19/06/2018	2:30 a. m.	0.839	l/s
130	15/06/2018	6:45 p. m.	6.267	l/s	290	17/06/2018	10:45 a. m.	10.79	l/s	450	19/06/2018	2:45 a. m.	0.841	l/s
131	15/06/2018	7:00 p. m.	4.846	l/s	291	17/06/2018	11:00 a. m.	9.812	l/s	451	19/06/2018	3:00 a. m.	0.768	l/s
132	15/06/2018	7:15 p. m.	5.345	l/s	292	17/06/2018	11:15 a. m.	10.48	l/s	452	19/06/2018	3:15 a. m.	0.884	l/s
133	15/06/2018	7:30 p. m.	4.937	l/s	293	17/06/2018	11:30 a. m.	11.57	l/s	453	19/06/2018	3:30 a. m.	1.085	l/s
134	15/06/2018	7:45 p. m.	5.093	l/s	294	17/06/2018	11:45 a. m.	10.46	l/s	454	19/06/2018	3:45 a. m.	1.214	l/s

N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad	N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad	N°	Fecha	Hora	Caudal	Unidad
135	15/06/2018	8:00 p. m.	5.136	l/s	295	17/06/2018	12:00 p. m.	9.349	l/s	455	19/06/2018	4:00 a. m.	1.51	l/s
136	15/06/2018	8:15 p. m.	4.59	l/s	296	17/06/2018	12:15 p. m.	10.44	l/s	456	19/06/2018	4:15 a. m.	2.146	l/s
137	15/06/2018	8:30 p. m.	4.132	l/s	297	17/06/2018	12:30 p. m.	10.34	l/s	457	19/06/2018	4:30 a. m.	2.381	l/s
138	15/06/2018	8:45 p. m.	3.98	l/s	298	17/06/2018	12:45 p. m.	10.6	l/s	458	19/06/2018	4:45 a. m.	2.68	l/s
139	15/06/2018	9:00 p. m.	3.917	l/s	299	17/06/2018	1:00 p. m.	10.36	l/s	459	19/06/2018	5:00 a. m.	3.242	l/s
140	15/06/2018	9:15 p. m.	3.859	l/s	300	17/06/2018	1:15 p. m.	9.375	l/s	460	19/06/2018	5:15 a. m.	3.276	l/s
141	15/06/2018	9:30 p. m.	3.19	l/s	301	17/06/2018	1:30 p. m.	9.824	l/s	461	19/06/2018	5:30 a. m.	3.881	l/s
142	15/06/2018	9:45 p. m.	3.042	l/s	302	17/06/2018	1:45 p. m.	8.657	l/s	462	19/06/2018	5:45 a. m.	3.72	l/s
143	15/06/2018	10:00 p. m.	2.525	l/s	303	17/06/2018	2:00 p. m.	8.012	l/s	463	19/06/2018	6:00 a. m.	4.882	l/s
144	15/06/2018	10:15 p. m.	2.598	l/s	304	17/06/2018	2:15 p. m.	7.869	l/s	464	19/06/2018	6:15 a. m.	4.339	l/s
145	15/06/2018	10:30 p. m.	2.762	l/s	305	17/06/2018	2:30 p. m.	6.932	l/s	465	19/06/2018	6:30 a. m.	5.127	l/s
146	15/06/2018	10:45 p. m.	1.912	l/s	306	17/06/2018	2:45 p. m.	6.479	l/s	466	19/06/2018	6:45 a. m.	4.933	l/s
147	15/06/2018	11:00 p. m.	1.947	l/s	307	17/06/2018	3:00 p. m.	6.409	l/s	467	19/06/2018	7:00 a. m.	5.246	l/s
148	15/06/2018	11:15 p. m.	1.941	l/s	308	17/06/2018	3:15 p. m.	6.67	l/s	468	19/06/2018	7:15 a. m.	5.106	l/s
149	15/06/2018	11:30 p. m.	1.718	l/s	309	17/06/2018	3:30 p. m.	6.159	l/s	469	19/06/2018	7:30 a. m.	5.049	l/s
150	15/06/2018	11:45 p. m.	1.457	l/s	310	17/06/2018	3:45 p. m.	6.014	l/s	470	19/06/2018	7:45 a. m.	5.942	l/s
151	16/06/2018	12:00 a. m.	1.379	l/s	311	17/06/2018	4:00 p. m.	5.479	l/s	471	19/06/2018	8:00 a. m.	5.738	l/s
152	16/06/2018	12:15 a. m.	1.336	l/s	312	17/06/2018	4:15 p. m.	5.825	l/s	472	19/06/2018	8:15 a. m.	7.902	l/s
153	16/06/2018	12:30 a. m.	1.236	l/s	313	17/06/2018	4:30 p. m.	5.304	l/s	473	19/06/2018	8:30 a. m.	7.038	l/s
154	16/06/2018	12:45 a. m.	1.224	l/s	314	17/06/2018	4:45 p. m.	5.68	l/s	474	19/06/2018	8:45 a. m.	6.256	l/s
155	16/06/2018	1:00 a. m.	1.298	l/s	315	17/06/2018	5:00 p. m.	5.115	l/s	475	19/06/2018	9:00 a. m.	7.689	l/s
156	16/06/2018	1:15 a. m.	1.277	l/s	316	17/06/2018	5:15 p. m.	5.829	l/s	476	19/06/2018	9:15 a. m.	7.957	l/s
157	16/06/2018	1:30 a. m.	1.198	l/s	317	17/06/2018	5:30 p. m.	6.126	l/s	477	19/06/2018	9:30 a. m.	8.953	l/s
158	16/06/2018	1:45 a. m.	1.158	l/s	318	17/06/2018	5:45 p. m.	6.027	l/s	478	19/06/2018	9:45 a. m.	9.016	l/s
159	16/06/2018	2:00 a. m.	1.188	l/s	319	17/06/2018	6:00 p. m.	5.307	l/s	479	19/06/2018	10:00 a. m.	9.043	l/s
160	16/06/2018	2:15 a. m.	1.173	l/s	320	17/06/2018	6:15 p. m.	6.598	l/s	480	19/06/2018	10:15 a. m.	9.157	l/s

Con los datos relacionados anteriormente se puede obtener el caudal promedio a la salida de la fuente abastecedora, como se muestra en la tabla 8, que permite calcular posteriormente el IANC y calibrar las demandas en los nudos:

Tabla 8 – Caudal promedio a la salida del tanque

DIA	CAUDAL PROMEDIO DIARIO(L/S)
14/06/2018	6.2
15/06/2018	5.2
16/06/2018	5.5
17/06/2018	4.9
18/06/2018	5.2
CAUDAL PROMEDIO TOTAL	5.4

Así mismo, con los datos recogidos de los caudales horarios podemos establecer la curva y establecer un patrón de consumo a la salida del tanque de almacenamiento de agua, el cual se relaciona en la ilustración 15 a continuación.

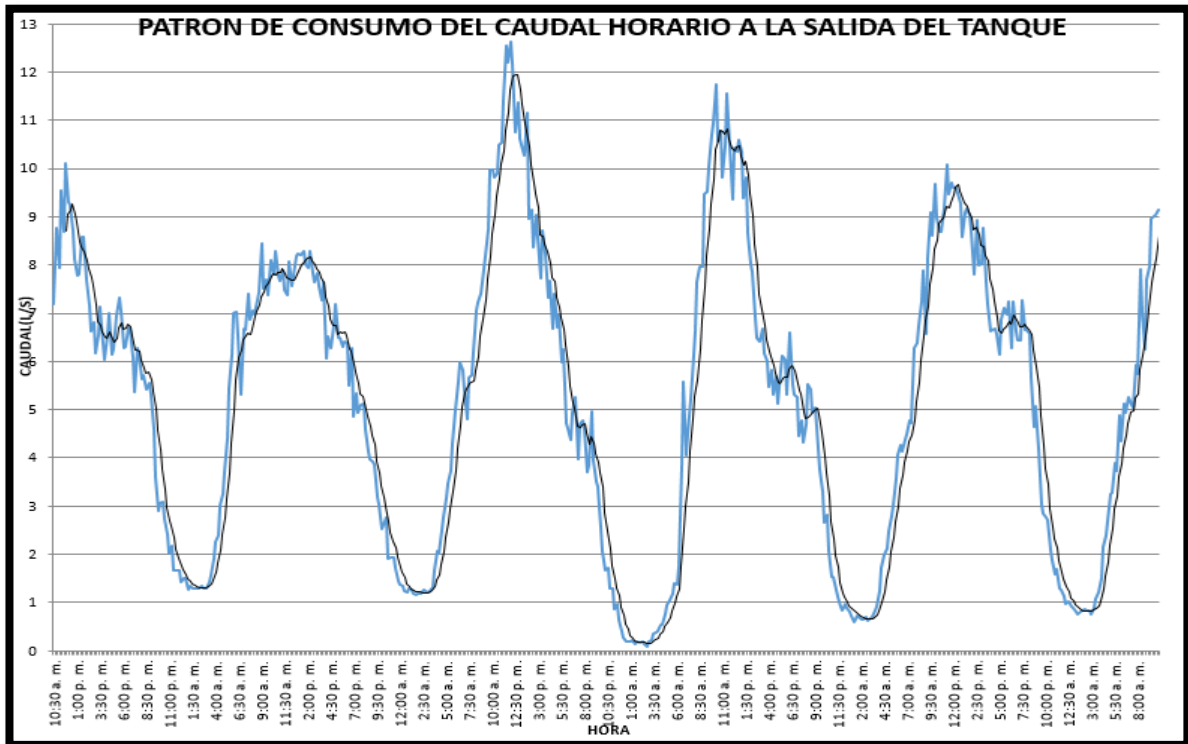


Ilustración 14 - Curva patrón de consumo horario a la salida del tanque

Durante la modelación en horario extendido en EPANET es necesario ingresar un patrón de demanda que modifique los caudales hora a hora a lo largo del día o del periodo que modelemos en proporción a la demanda real que sale del tanque a esas mismas horas. Este vendrá dado de acuerdo a la relación que hay entre los caudales a la salida del tanque tomados en campo a determinada hora y el caudal medio calculado a partir de la toma de datos de varios días a la salida del tanque y que consecuentemente se aplicara a los cálculos que se hagan en los puntos de medición Patiscos y Esmeralda, como se observa en la siguiente tabla 9 y en la ilustración 16:

Tabla 9 – Calculo de variación horaria de la demanda

MUESTREO	FECHA	HORA	CAUDAL A LA SALIDA DEL TANQUE(L/S)	CAUDAL OBSERVADO PUNTO PATICOS(L/S)	CAUDAL MEDIO(L/S)	VARIACION HORARIA
1	14/06/2018	11:15 a. m.	8.312	7.8	5.4	1.54
2	14/06/2018	11:30 a. m.	8.703	8.54	5.4	1.61
3	14/06/2018	11:45 a. m.	9.021	6.8	5.4	1.67
4	14/06/2018	2:15 p. m.	6.935	5.6	5.4	1.28
5	14/06/2018	2:30 p. m.	6.638	7.87	5.4	1.23
MUESTREO	FECHA	HORA	CAUDAL A LA SALIDA DEL TANQUE(L/S)	CAUDAL OBSERVADO PUNTO ESMERALDA(L/S)	CAUDAL MEDIO(L/S)	VARIACION HORARIA
6	14/06/2018	12:00 p. m.	9.184	3.02	5.4	1.70
7	14/06/2018	12:15 p. m.	9.251	3.43	5.4	1.71
8	14/06/2018	12:30 p. m.	8.724	2.58	5.4	1.62
9	14/06/2018	2:30 p. m.	7.156	2.38	5.4	1.33
10	14/06/2018	2:45 p. m.	6.82	1.98	5.4	1.26
11	14/06/2018	3:00 p. m.	6.162	2.31	5.4	1.14

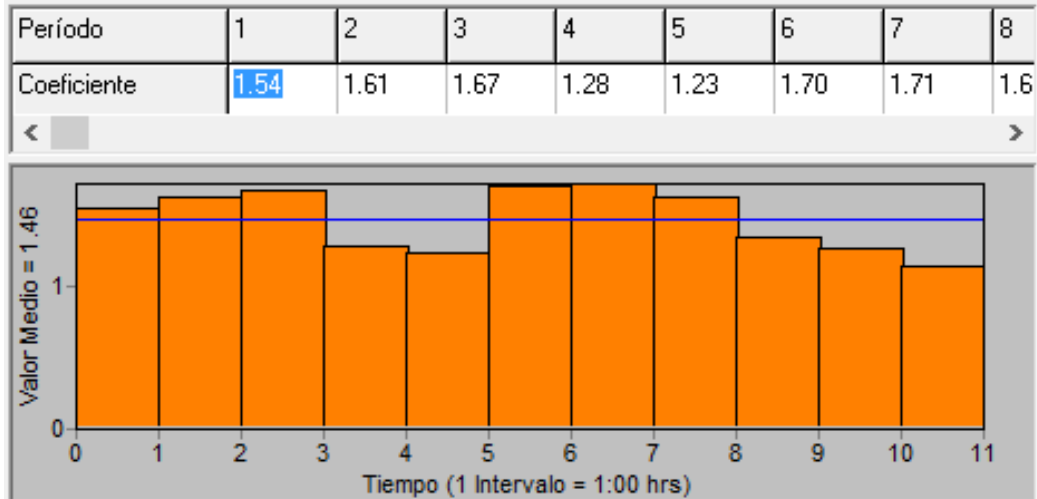


Ilustración 15 – Patrón de demanda horario en EPANET

Con el modelo cargado en EPANET con los datos iniciales reales de topología, topografía y patrón de consumo horario, se puede generar el modelo inicial del cual se obtienen los siguientes caudales sin calibrar a lo largo del periodo extendido para los puntos de medición Paticos y Esmeralda tabulados a continuación en la tabla 10:

Tabla 10 - Caudales en el modelo inicial sin calibrar

MUESTREO	HORA	CAUDAL CALCULADO PUNTO PATICOS(L/S)
1	11:15 a. m.	8.2
2	11:30 a. m.	8.52
3	11:45 a. m.	6.52
4	2:15 p. m.	6.27
5	2:30 p. m.	8.66
MUESTREO	HORA	CAUDAL CALCULADO PUNTO ESMERALDA(L/S)
6	12:00 p. m.	2.95
7	12:15 p. m.	2.80
8	12:30 p. m.	2.30
9	2:30 p. m.	2.18
10	2:45 p. m.	2.97
11	3:00 p. m.	2.66

El equipo se instaló en la tubería de 6” que sale del tanque de almacenamiento el día 14 de junio del 2018 registrando un caudal inicial de 8,1 l/s. A partir de ahí cada 15 min el caudalímetro registro una medida en su memoria y paralelamente cada hora se tomó lectura del macro medidor. Con un segundo equipo se verifica y se calibran las medidas del equipo 1, arrojando los siguientes datos recogidos en la tabla 11:

Tabla 11 – Calibración del caudalímetro instalado a la salida del tanque

MEDICIONES(L/S) EQUIPO 1	MEDICIONES(L/S) EQUIPO 2	HORA
8.10	8.106	13:00
8.6	8.3	13:15
7.5	7.5	13:30
7.64	7.57	13:45
7.3	7.1	14:00

Fuente: Informe técnico del EAAB

En resumen se implementaron 3 puntos de medición de caudales y presiones recogiendo datos que luego se emplearan en la calibración, uno a la salida del tanque, otro en el punto PATICOS y otro en el punto ESMERALDA. Los puntos se observan en la siguiente ilustración 17:



Ilustración 16 – Puntos de mediciones en campo en la red de acueducto AUACACT

Se tomaron mediciones de caudal en 2 puntos estratégicos acordados por la SDHT y el acueducto AUACACT cerca a la ubicación de las cámaras reductoras de presión de las cuales adicionalmente nos brindaron información de su respectiva toma de presiones recogidas anteriormente. Este procedimiento se hace con el fin de poder representar las curvas de presión y caudal en función de los datos observados y de esta manera en el momento de calibrar el modelo, los datos calculados se acerquen a los obtenidos en campo.



Ilustración 17 – Mediciones de caudal en el sector Paticos

Por una parte, en el punto denominado “PATICOS”, ver ilustración 18 y tabla 12, antes de la cámara reductora de presión con dirección Diag. 91C N° 18M-02 cuyo diámetro de la tubería es 6”, se tomaron las siguientes medidas de caudal:

Tabla 12 – Valores de caudales reales en el sector Paticos

MEDICIONES(L/S)	HORA
7.8	11:17
8.54	11:18
10.66	11:27
8.54	11:32
6.80	11:45
5.62	14:17
6.54	14:20
7.87	14:25

Por otra parte, en el punto denominado “ESMERALDA”, cerca de la cámara reductora de presión con dirección Diag. 91D sur N° 18F y cuyo diámetro de la tubería es 4”, se tomaron las siguientes medidas de caudal, ver ilustración 19 y tabla 13:



Ilustración 18 – Mediciones de caudal en el sector Esmeralda

Tabla 13 – Valores de caudales reales en el sector Esmeralda

MEDICIONES(L/S)	HORA
3.02	12:05
3.7	12:10
3.43	12:15
3.19	12:20
2.91	12:25
2.58	12:30
2.38	14:38
1.98	14:45
2.23	14:50
2.31	14:54

FUENTE: Informe técnico de la SDHT

Las curvas de calibración para caudales que se obtienen a partir de los datos observados en campo Vs los datos calculados en el modelo son las que se muestran a continuación en las ilustraciones 20 y 21 para los puntos Paticos y Esmeralda:

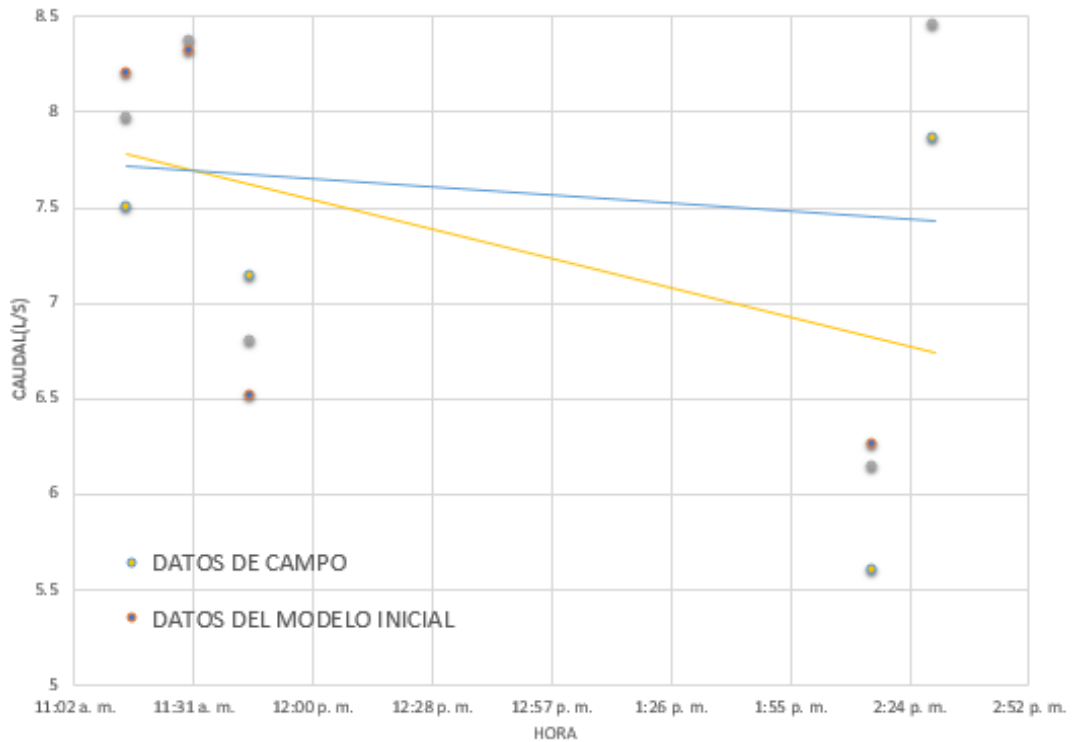


Ilustración 19 – Curva de calibración por caudal en el punto Paticos

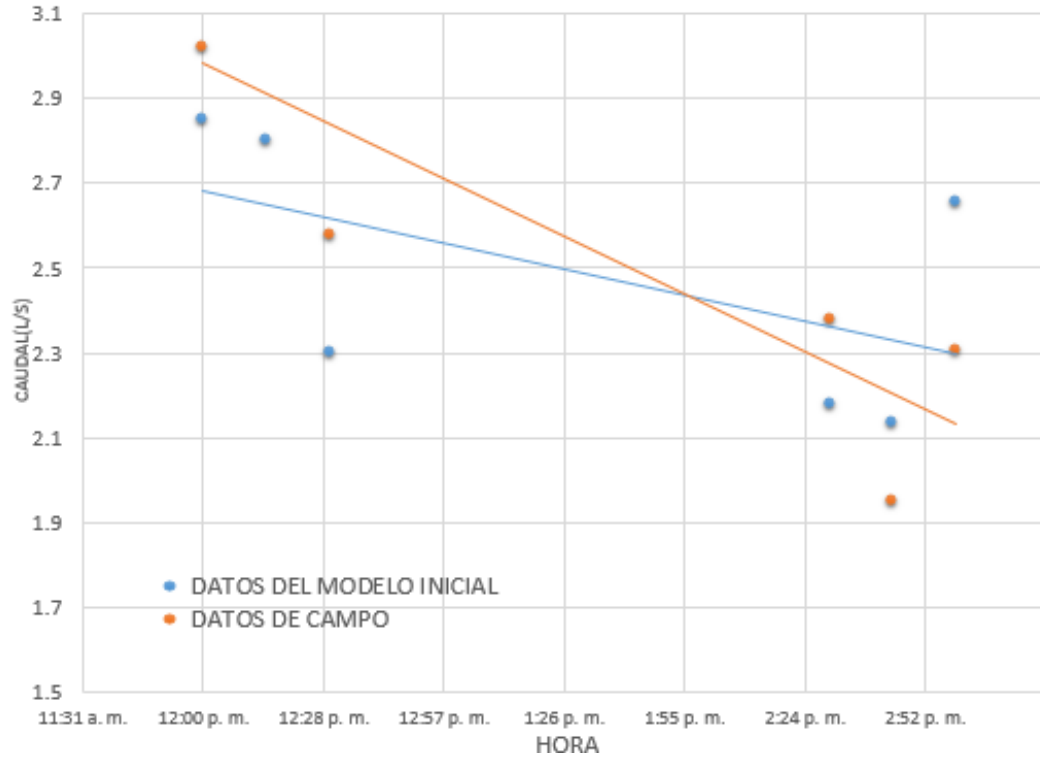


Ilustración 20 – Curva de calibración por caudal en el punto Esmeralda

Con el objeto de conocer el comportamiento de las presiones en la red, ver ilustración 22 y tabla 14, y poder así establecer las condiciones en las áreas críticas de servicio para realizar la curva de calibración de presiones, se realizó un plan piezométrico que consistió en la toma de presiones en sitios claves como lo son las cámaras reductoras tabuladas de la siguiente manera:

Tabla 14 – Valores de presiones reales en las cámaras de presión

SECTOR CAMARA REDUCTORA	PRESION ENTRADA(m.c.a)	PRESION SALIDA(m.c.a)	HORA	DIA
Paticos	87	40	11:45am	14/06/2018
Esmeralda Principal	64	42	12:00pm	14/06/2018
Esmeralda PTAR	75	15	12:15pm	14/06/2018
Barranquitos	69	25	12:30pm	14/06/2018



Ilustración 21 – Toma de presiones reales en las cámaras de presión

Las curvas de calibración para presiones que se obtienen a partir de los datos observados en campo son las que se muestran a continuación en la lustración 23 para los puntos de cámara de presión donde se hicieron las mediciones:

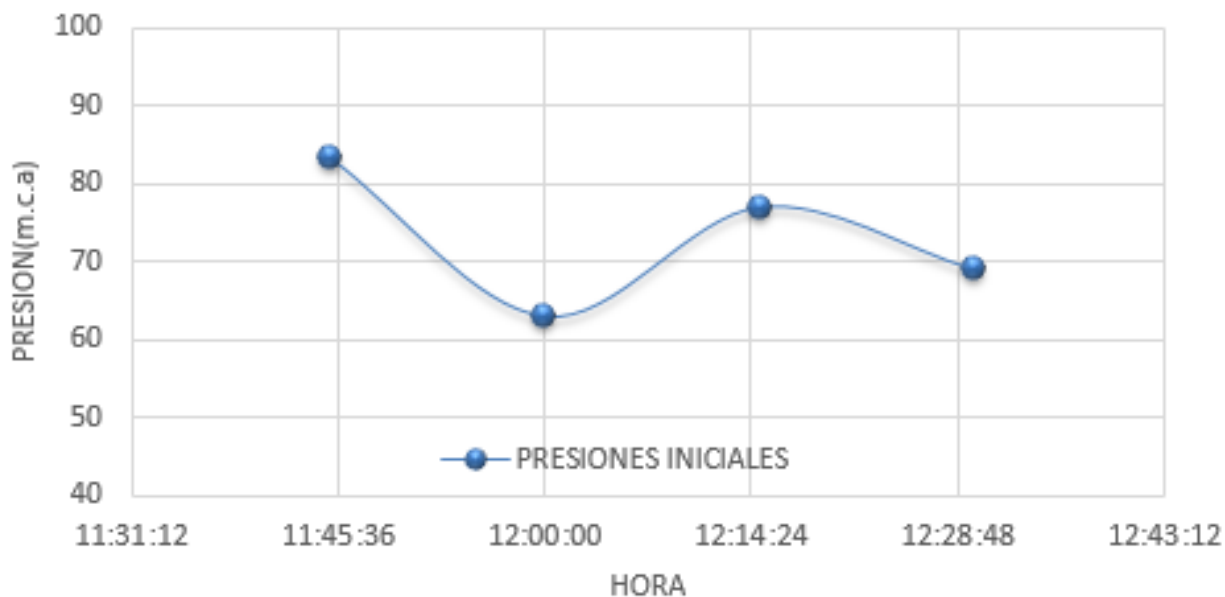


Ilustración 22 – Curva de calibración de presiones

15.2 CALIBRACION DEL MODELO INICIAL

15.2.1 LINEA BASE 1 – CALIBRACION DE MASAS

Siguiendo la metodología CIACUA escogida para la calibración del modelo, es necesario calcular el IANC como parte fundamental del proceso, ver ecuación 7. Para ello se calculó el factor de pérdidas que viene dado por los valores de los caudales promedio de las lecturas totales de la micromedición y el caudal promedio del macromedidor a la salida del tanque de la siguiente manera.

$$\text{IANC} = \frac{\text{CAUDAL MEDIO A SALIDA TANQUE} - \text{CAUDAL MEDIO FACTURADO}}{\text{CAUDAL MEDIO A SALIDA DE TANQUE}} * 100$$

Ecuación 7 para calculo del IANC

De acuerdo a lo anterior el factor del IANC se establece así:

$$\text{IANC} = \frac{5.4 - 5.11}{5.4} * 100 = 5.38\%$$

Ecuación 8 - Valor del IANC del acueducto AUACACT

El factor de demanda se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Fd} = \frac{5.4}{5.11} = 1.056$$

Ecuación 9 – Factor de demanda para ajuste de caudal de los nodos

El factor de demanda se le aplica a los consumos medios de todos los usuarios y de esta manera se ajustan las demandas de todo el sistema consiguiendo un balance hidráulico de la red donde lo que entra es igual a lo que sale, generando la siguiente tabulación de cada nodo frente a su demanda, ver tabla 15.

Tabla 15 – Demandas con IANC frente al nodo asignado

DEMANDA(L/S)	NODO
0.047	1
0.029	J-111
0.278	J-116
0.142	J-117
0.006	J-119
0.138	J-122
0.146	J-125
0.009	J-127
0.039	J-132
0.049	J-135
0.090	J-136
0.177	J-139
0.026	J-144
0.016	J-145
0.004	J-149
0.025	J-153
0.018	J-158
0.176	J-159
0.091	J-160
0.001	J-162
0.116	J-163
0.098	J-164
0.012	J-167
0.020	J-168
0.091	J-169
0.004	J-173
0.081	J-175
0.068	J-18
0.027	J-183
0.093	J-184
0.023	J-185
0.036	J-187
0.013	J-193
0.019	J-194
0.184	J-196

DEMANDA(L/S)	NODO
0.004	J-198
0.073	J-204
0.008	J-207
0.052	J-209
0.030	J-212
0.025	J-22
0.015	J-222
0.029	J-223
0.013	J-224
0.038	J-228
0.030	J-23
0.006	J-25
0.014	J-251
0.006	J-255
0.186	J-261
0.006	J-264
0.006	J-27
0.037	J-277
0.072	J-28
0.040	J-29
0.001	J-3
0.062	J-31
0.040	J-312
0.061	J-315
0.021	J-318
0.106	J-32
0.002	J-320
0.018	J-332
0.040	J-337
0.005	J-338
0.062	J-344
0.012	J-345
0.001	J-346
0.008	J-347
0.008	J-352
0.017	J-355
0.083	J-356

DEMANDA(L/S)	NODO
0.043	J-357
0.026	J-359
0.094	J-360
0.043	J-361
0.039	J-362
0.048	J-363
0.009	J-365
0.356	J-366
0.393	J-367
0.016	J-371
0.011	J-374
0.031	J-375
0.148	J-376
0.119	J-377
0.049	J-384
0.199	J-385
0.043	J-66
0.065	J-87
0.003	J-91
0.038	JA1
5.402	TOTAL

Entrando en la calibración de masas y de acuerdo a la metodología se crean escenarios para evaluar las demandas desconocidas creando grupos de nudos, diferenciando los nodos que están ubicados en las veredas, frente a los nodos que están ubicados en la zona urbana, ya que según el análisis de consumos promedio de los usuarios, en la zona veredal son más altos que en la zona urbana. La distribución de nodos según el grupo se aprecia en la ilustración 24 siguiente:

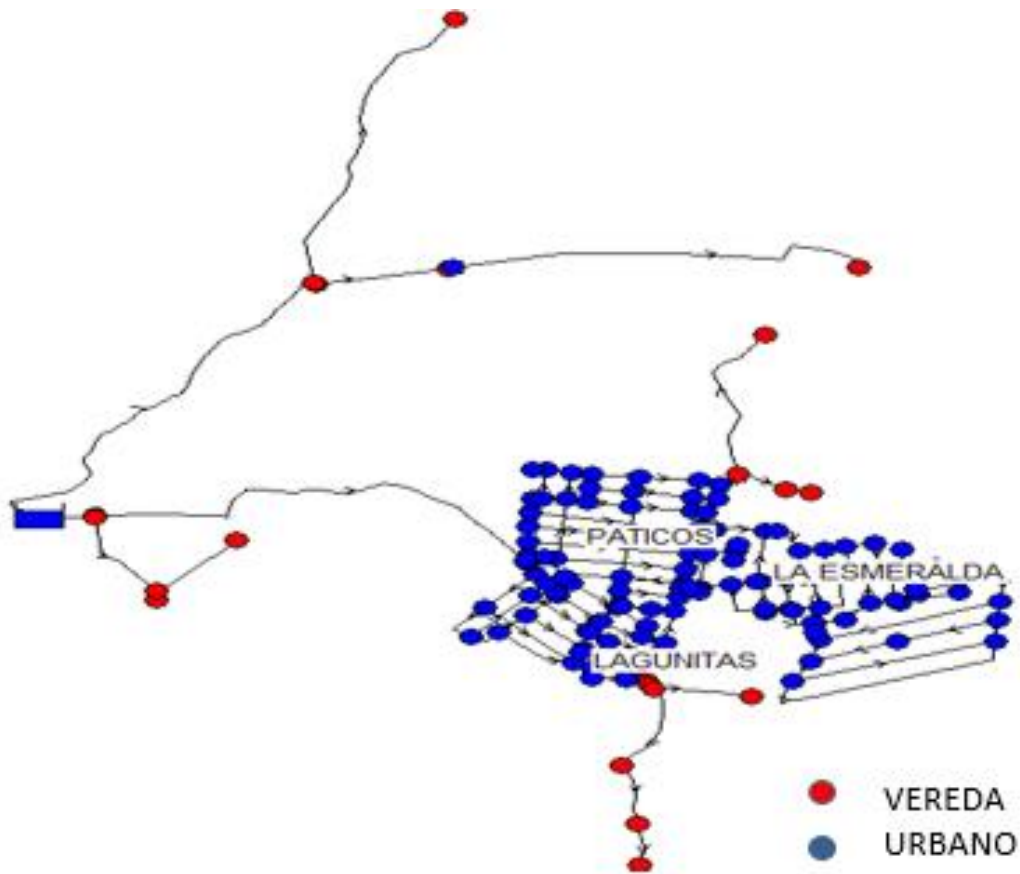


Ilustración 23 – Nodos en zona veredal y nodos en zona urbana

A la demanda base de estos nodos según la zona donde se encuentren se le aplica una combinación de factores multiplicadores, una distinta para cada escenario sin alterar el balance de masas ya que si aumentamos en algún nodo la demanda, esta deberá reducirse en otro. Estos factores varían de 0,1 a 10 variando de a 0.1 en adelante. La tabulación del proceso se muestra en la siguiente tabla 16:

Tabla 16 – Escenarios para calibración de masas por demandas

ESCENARIO POR DEMANDA	FACTOR MULTIPLICADOR		TIPO DE NODO		BALANCE DE MASAS
	URBANO	VEREDA	URBANO	VEREDA	CAUDAL(L/S)
			CAUDAL(L/S)	CAUDAL(L/S)	
4 MODELO INICIAL	1	1	4.874	0.528	5.402
5	0.989	1.1	4.8212	0.5808	5.402
6	1.011	0.9	4.9268	0.4752	5.402
7	1.022	0.8	4.9796	0.4224	5.402
8	0.978	1.2	4.7684	0.6336	5.402
9	1.100	0.077	5.3614	0.0406	5.402
10	0.900	1.923	4.3866	1.0154	5.402
11	0.800	2.846	3.8992	1.5028	5.402

La modelación de cada escenario que se le aplique la combinación de factores multiplicadores vendrá condicionada por el patrón de demanda introducido y evaluado en horario extendido, característica de EPANET. Los valores obtenidos en cada escenario se evalúan respecto a la curva de calibración por demandas que vienen dados por de los puntos de medición del caudal (paticos y esmeralda) obtenidos en campo y se determina “SI” cumple o “NO”, dependiendo del criterio de evaluación del 5% de diferencia mayor o menor para líneas principales (PATICOS) y del 10% para líneas secundarias (ESMERALDA).

El que tenga el mayor número en el conteo en la última columna de la tabla será el mejor escenario, así como se puede observar en la tabla 17 a continuación, en donde el escenario #7 es el que mejor se adapta y permite aproximar los datos calculados en la modelación a los datos observados en campo.

Tabla 17 – Calibración de masas por demandas

ESCENARIO DE CALIBRACION POR DEMANDAS	TIPO DE NODO	FACTOR MULTIPLICADOR		HORARIO EXTENDIDO											EVALUACION EN PUNTO DE MEDICION		CONTEO	
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	PATICOS	ESMERALDA		
		DATOS DE CAMPO	CAUDAL	7.8	8.54	6.8	5.6	7.87	3.02	3.43	2.58	2.38	1.98	2.31	5	6		11
		RANGO DE EVAL. MAYOR		8.19	8.96	7.14	5.88	8.26	3.32	3.77	2.83	2.61	2.17	2.54				
RANGO DE EVAL. MENOR		7.41	8.11	6.46	5.32	7.47	2.71	3.08	2.32	2.14	1.78	2.07						
4 MODELO INICIAL	VEREDA	1	ESTADO	NO	Si	Si	NO	NO	Si	NO	NO	Si	Si	NO	2	3	5	
	URBANO	1	CAUDAL	8.2	8.52	6.52	6.27	8.66	2.95	2.8	2.3	2.18	1.97	2.66				
5	VEREDA	1.100	ESTADO	NO	NO	Si	NO	NO	Si	NO	NO	Si	Si	NO	1	3	4	
	URBANO	0.989	CAUDAL	8.5	9.1	6.48	6.23	8.61	2.92	2.77	2.27	2.15	1.95	2.63				
6	VEREDA	0.900	ESTADO	NO	Si	Si	NO	NO	Si	NO	NO	Si	Si	NO	2	3	5	
	URBANO	1.011	CAUDAL	8.25	8.56	6.56	6.3	8.71	2.99	2.83	2.32	2.2	1.99	2.69				
7	VEREDA	0.800	ESTADO	NO	Si	Si	NO	NO	Si	NO	Si	Si	Si	NO	2	4	6	
	URBANO	1.022	CAUDAL	8.34	8.65	6.63	6.37	8.8	3.25	3.08	2.53	2.40	2.17	2.93				
8	VEREDA	1.200	ESTADO	Si	Si	NO	NO	NO	Si	NO	NO	NO	Si	NO	2	2	4	
	URBANO	0.978	CAUDAL	8.1	8.4	6.44	6.19	8.55	2.89	2.74	2.25	2.13	1.93	2.6				
9	VEREDA	0.077	ESTADO	NO	NO	Si	NO	NO	Si	NO	Si	Si	Si	NO	1	4	5	
	URBANO	1.100	CAUDAL	8.66	8.98	6.88	6.62	9.14	3.25	3.08	2.53	2.4	2.17	2.93				
10	VEREDA	1.923	ESTADO	Si	NO	NO	NO	Si	NO	NO	NO	NO	NO	Si	2	1	3	
	URBANO	0.900	CAUDAL	7.74	8.03	6.16	5.92	8.18	2.66	2.52	2.07	1.96	1.77	2.4				
11	VEREDA	2.846	ESTADO	NO	NO	NO	Si	Si	NO	NO	NO	NO	NO	Si	2	1	3	
	URBANO	0.800	CAUDAL	7.29	7.56	5.79	5.57	7.69	2.36	2.24	1.84	1.74	1.58	2.13				

 MEJOR ESCENARIO

En definitiva el mejor escenario para la calibración de masas por demandas desconocidas viene dado por la siguiente combinación de factores multiplicadores tabulada de la siguiente manera en la tabla 18:

Tabla 18 – Mejor escenario de calibración de masas por demandas desconocidas

ESCENARIO POR DEMANDAS DESCONOCIDAS	FACTOR MULTIPLICADOR	
	URBANO	VEREDA
7	1.022	0.80

Continuando con la calibración de masas, evaluaremos los emisores o fugas en donde crearemos distintos escenarios de acuerdo a rangos de presión en los nudos. En este sentido se diferencian grupos de presiones altas, medias y bajas, ver tabla 19 e ilustración 25, a las cuales se les asignan cada uno de los nodos dependiendo de su valor de presión.

Tabla 19 – Grupos de presiones para calibración de masas por emisores

RANGO DE PRESION	INTERVALO	UNIDAD	CANT. DE NODOS
1 - BAJO	0-40	m.c.a	7
2 - MEDIO	>40-55	m.c.a	24
3 - ALTO	>55	m.c.a	50

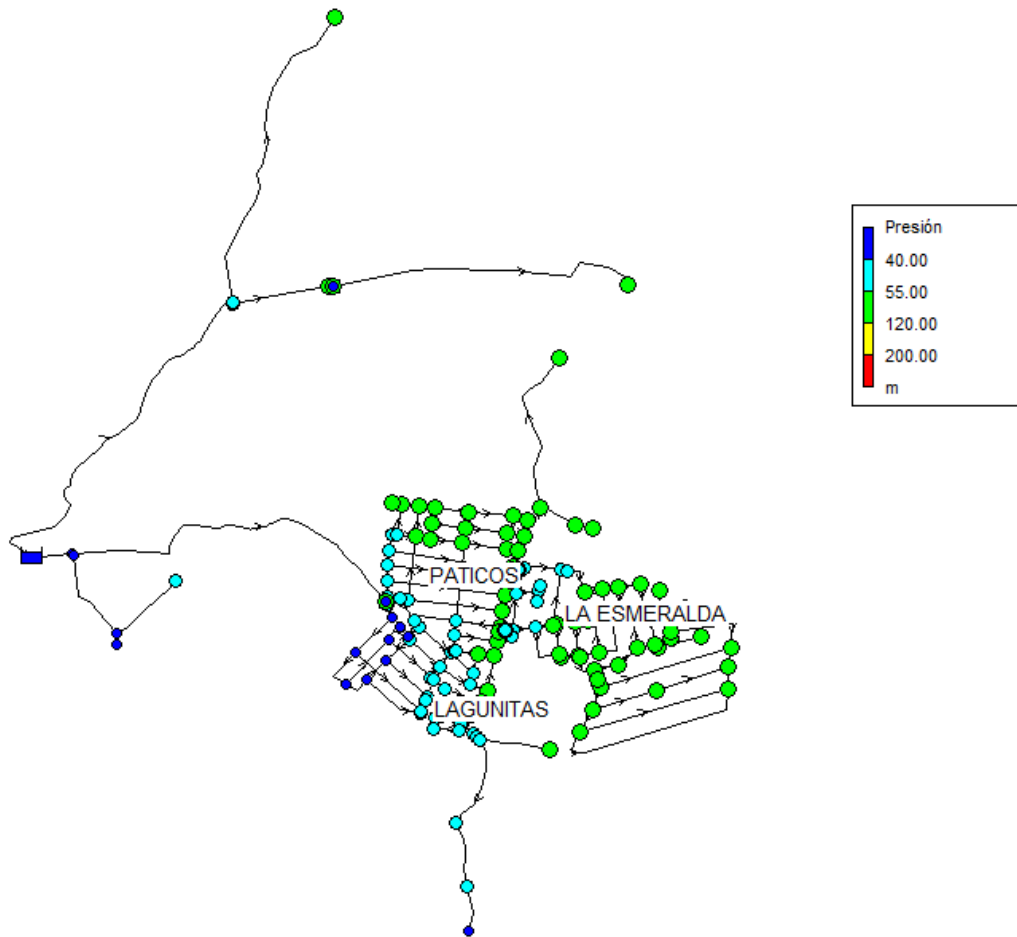


Ilustración 24 – Grupos de nodos por rango de presiones en la red

La modelación de cada escenario que se le aplique la combinación de factores multiplicadores vendrá condicionada por el patrón de demanda introducido y evaluado en horario extendido. Los escenarios son tabulados en la siguiente tabla 20. A los coeficientes de emisores se les aplica un factor multiplicador que puede estar en el rango de valores desde 0 a 1 aumentando en 0,001 cada vez.

Hay que tener en cuenta que este proceso se debe hacer sin modificar el balance de masas del sistema, por tanto si se le agrega un coeficiente emisor a un nodo se estará aumentando su demanda, por consiguiente se debe reducir el patrón de demanda con la misma proporción en el horario extendido durante la modelación y compensar este incremento.

Tabla 20 – Escenarios para calibración de masas por emisores

ESCENARIO	COEFICIENTE EMISOR		
	RANGO 1	RANGO 2	RANGO 3
ESCENARIO 13	0.006	0.003	0.001
ESCENARIO 14	0.001	0.003	0.006
ESCENARIO 15	0.002	0.001	0.006
ESCENARIO 16	0.003	0.002	0.001
ESCENARIO 17	0.004	0.006	0.001
ESCENARIO 18	0.001	0	0
ESCENARIO 19	0.001	0.003	0.001
ESCENARIO 20	0.001	0.002	0.002
ESCENARIO 21	0.002	0.002	0.001

Los valores obtenidos en cada escenario se evalúan respecto a la curva de calibración de los puntos de medición del caudal (paticos y esmeralda) y se determina si cumple o no dependiendo del criterio de evaluación como se puede observar en la tabla 21 a continuación.

Tabla 21 - Calibración de masas por emisores

ESCEN. DE CALIBR. POR EMISORES	RANGO DE PRESIONES	FACTOR MULTIP	HORARIO EXTENDIDO											EVALUACION EN PUNTO DE MEDICION		CONTEO
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	PATICOS	ESMERALDA	
		DATOS DE CAMPO	CAUDAL	7.8	8.54	6.8	5.6	7.87	3.02	3.43	2.58	2.38	1.98	2.31	5	6
	RANGO DE EVAL. MAYOR		8.19	8.97	7.14	5.88	8.26	3.32	3.77	2.83	2.61	2.17	2.54			
	RANGO DE EVAL. MENOR		7.41	8.11	6.46	5.32	7.48	2.72	3.09	2.32	2.14	1.78	2.08			
12 INICIAL	RANGO 1	0.000	NO	Si	Si	NO	NO	Si	NO	Si	Si	Si	NO	2	4	6
	RANGO 2	0.000														
	RANGO 3	0.000	8.34	8.65	6.63	6.37	8.8	3.25	3.08	2.53	2.40	2.17	2.93			
13	RANGO 1	0.006	NO	NO	Si	NO	NO	Si	NO	Si	NO	Si	NO	1	3	4
	RANGO 2	0.003														
	RANGO 3	0.001	8.62	8.99	6.95	6.58	9.11	3.2	3	2.46	2.72	2.1	2.85			
14	RANGO 1	0.001	NO	Si	Si	NO	NO	NO	Si	Si	Si	NO	NO	2	3	5
	RANGO 2	0.003														
	RANGO 3	0.006	8.54	8.9	6.87	6.46	9.02	3.44	3.25	2.72	2.59	2.36	3.75			
15	RANGO 1	0.002	NO	Si	Si	NO	NO	NO	Si	Si	NO	NO	NO	2	2	4
	RANGO 2	0.001														
	RANGO 3	0.006	8.53	8.84	6.86	6.49	9.03	3.47	3.26	2.75	2.62	2.4	3.12			
16	RANGO 1	0.001	Si	Si	Si	NO	NO	Si	NO	Si	Si	Si	NO	3	4	7
	RANGO 2	0.002														
	RANGO 3	0.003	8.18	8.48	6.5	6.25	8.63	3.25	3.08	2.53	2.4	2.17	2.93			

ESCEN. DE CALIBR. POR EMISORES	RANGO DE PRESIONES	FACTOR MULTIP	HORARIO EXTENDIDO											EVALUACION EN PUNTO DE MEDICION		CONTEO
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	PATICOS	ESMERALDA	
	DATOS DE CAMPO	CAUDAL	7.8	8.54	6.8	5.6	7.87	3.02	3.43	2.58	2.38	1.98	2.31	5	6	11
	RANGO DE EVAL. MAYOR		8.19	8.97	7.14	5.88	8.26	3.32	3.77	2.83	2.61	2.17	2.54			
RANGO DE EVAL. MENOR		7.41	8.11	6.46	5.32	7.48	2.72	3.09	2.32	2.14	1.78	2.08				
17	RANGO 1	0.004	NO	NO	Si	NO	NO	Si	NO	Si	Si	NO	NO	1	3	4
	RANGO 2	0.006														
	RANGO 3	0.001														
18	RANGO 1	0.001	NO	NO	Si	NO	NO	Si	NO	NO	Si	Si	NO	1	3	4
	RANGO 2	0.000														
	RANGO 3	0.000														
19	RANGO 1	0.001	NO	NO	NO	NO	NO	Si	NO	Si	Si	NO	NO	0	3	3
	RANGO 2	0.003														
	RANGO 3	0.001														
20	RANGO 1	0.001	NO	NO	NO	NO	NO	Si	Si	Si	Si	NO	NO	0	4	4
	RANGO 2	0.002														
	RANGO 3	0.002														
21	RANGO 4	0.002	Si	NO	NO	NO	NO	Si	NO	Si	Si	NO	NO	1	3	4
	RANGO 5	0.002														
	RANGO 6	0.001														

 MEJOR ESCENARIO

Según la metodología, el escenario que tenga el mayor número en el conteo será el que mejor se adapte y en consecuencia será el elegido, además de que debe superar en número a la cantidad que se traía del mejor escenario de calibración de masas por demandas desconocidas. En consecuencia el escenario 16 supera estas condiciones con 7 puntos afirmativos.

En definitiva el mejor escenario para la calibración de masas por emisores viene dado por la siguiente combinación de factores multiplicadores tabulada de la siguiente manera en la tabla 22 en donde se puede observar que los valores calculados en el modelo convergen hacia los valores reales tomados en campo:

Tabla 22 – Mejor escenario para calibración de masas por emisores

ESCENARIO	COEFICIENTE EMISOR		
	RANGO 1	RANGO 2	RANGO 3
ESCENARIO 16	0.001	0.002	0.003

De esta manera se da fin a la calibración de masas que incluye escenarios por demandas desconocidas y escenarios por emisores teniendo en cuenta los porcentajes de evaluación permitidos dentro de los cuales se deben encontrar los datos finales, y se da paso a la siguiente fase de la metodología que corresponde a la calibración de energía con rugosidades.

15.2.2 LINEA BASE 2 – CALIBRACION DE ENERGIA

El paso siguiente según la metodología CIACUA es la calibración de energía del modelo, donde someteremos las variables topológicas a cambios en su valor aplicándoles factores multiplicadores que dependen del escenario y grupo donde se encuentren con el fin de variar la curva de presión y acercar los valores de campo a los calculados.

Como todas las tuberías del sistema son en PVC entonces crearemos escenarios de acuerdo a la situación de caudales máximos, donde las pérdidas son mayores, creando rangos de valores de caudal como se muestra en la tabla 23 siguiente y la ilustración 26:

Tabla 23 – Rangos por caudal de tubería para escenarios de calibración por rugosidades

RANGO POR CAUDAL(L/S)		CANTIDAD DE TUBERIAS
1	0-0.5	130
2	0.5-1.5	37
3	>1.5	23

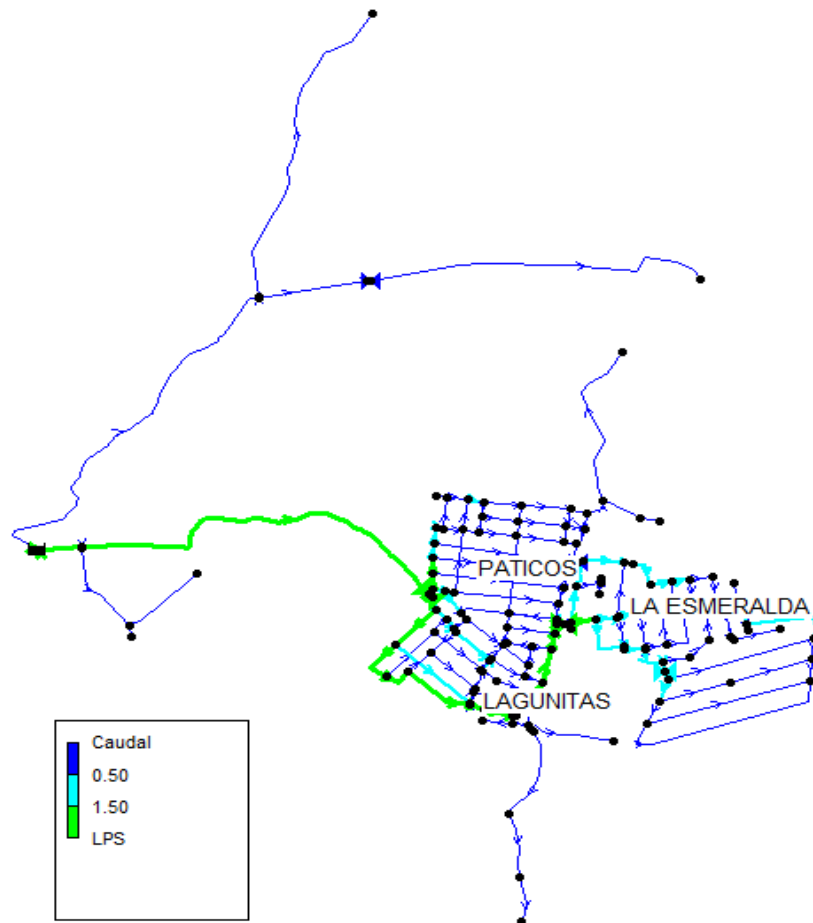


Ilustración 25 – Rangos de caudales en EPANET

Aplicando un factor multiplicador a la rugosidad inicial de la tubería con oscilaciones de 1 a 3 y aumentando cada 0,1 se crean y se tabulan los siguientes escenarios presentados en la tabla 24 a continuación:

Tabla 24 – Escenarios para calibración por rugosidades

ESCENARIOS DE CALIBRACION	FACTORES MULTIPLICADORES		
	RANGO 1	RANGO 2	RANGO 3
1	1	1	2
2	1	2	1
3	1	2	2
4	1	2	3
5	1	3	2
6	1.2	1	1
7	1.5	1	1
8	2	1	1
9	3	1	1
10	1.1	2.1	3
11	1.5	1	2
12	1	3	3
13	2	3	3
14	1.1	1.2	1.3

Los valores obtenidos en cada escenario se evalúan respecto a la curva de calibración de los puntos de medición de presión y se determina si cumple o no dependiendo del criterio de evaluación como se puede observar en la tabla 25 a continuación:

Tabla 25 – Calibración de energía por rugosidades

ESCENARIO DE CALIBRACION POR RUGOSIDADES	RANGO DE PRESIONES	FACTOR MULTIP.	CAMARAS DE PRESION				CONTEO
			PATICOS	ESMERALDA	ESMER. PTAR	BARRANQUITOS	
	DATOS DE CAMPO	PRESION	87	64	75.00	69	
	RANGO DE EVAL. MAY.		87.47	91.35	67.20	78.75	
	RANGO DE EVAL. MEN.		79.14	82.65	60.80	71.25	
22 INICIAL	RANGO 1	1.000	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	1.000					
	RANGO 3	1.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
23	RANGO 1	1.000	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	1.000					
	RANGO 3	2.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
24	RANGO 1	1.000	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	2.000					
	RANGO 3	1.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
25	RANGO 1	1.000	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	2.000					
	RANGO 3	2.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
26	RANGO 1	1.000	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	2.000					
	RANGO 3	3.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
27	RANGO 1	1.000	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	3.000					
	RANGO 3	2.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
28	RANGO 1	1.200	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	1.000					
	RANGO 3	1.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
29	RANGO 1	1.500	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	1.000					
	RANGO 3	1.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
30	RANGO 1	2.000	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	1.000					
	RANGO 3	1.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
31	RANGO 1	3.000	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	1.000					
	RANGO 3	1.000	84.45	65.12	77.26	65.96	

ESCENARIO DE CALIBRACION POR RUGOSIDADES	RANGO DE PRESIONES	FACTOR MULTIP.	CAMARAS DE PRESION				CONTEO
			PATICOS	ESMERALDA	ESMER. PTAR	BARRANQUITOS	
	DATOS DE CAMPO	PRESION	87	64	75.00	69	
	RANGO DE EVAL. MAY.		87.47	91.35	67.20	78.75	
	RANGO DE EVAL. MEN.		79.14	82.65	60.80	71.25	
32	RANGO 1	1.100	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	2.100					
	RANGO 3	3.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
33	RANGO 1	1.500	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	1.000					
	RANGO 3	2.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
34	RANGO 1	1.000	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	3.000					
	RANGO 3	3.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
35	RANGO 1	2.000	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	3.000					
	RANGO 3	3.000	84.45	65.12	77.26	65.96	
36	RANGO 1	1.100	Si	Si	Si	Si	4
	RANGO 2	1.200					
	RANGO 3	1.300	84.45	65.12	77.26	65.96	

Según la metodología, el escenario que tenga el mayor número en el conteo cumpliendo los criterios de evaluación será el que mejor se adapte y en consecuencia será el elegido para ser el mejor escenario de calibración de energía por rugosidades.

Como se puede observar en la tabla de calibración por rugosidades, para cualquier combinación de factores multiplicadores aplicado a las rugosidades de las tuberías se mantienen los mismos valores de presiones medidos inicialmente sin que presenten variación alguna. En consecuencia es imposible hacer converger más la curva de calibración calculada con la observada, aun así hay que resaltar que estos valores se encuentran dentro del criterio de evaluación por tanto se dará finalizada la calibración por energía y a su vez la del modelo en general.

15.3 ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL PROCESO DE CALIBRACION

MUESTREO	CAUDAL OBSERVADO PUNTO PATICOS(L/S)	CAUDAL CALCULADO PUNTO PATICOS(L/S)	PORCENTAJE DE ERROR INICIAL		CAUDAL CALCULADO PUNTO PATICOS(L/S)	PORCENTAJE DE ERROR CALIBRACION POR DEMANDAS		CAUDAL CALCULADO PUNTO PATICOS(L/S)	PORCENTAJE DE ERROR CALIBRACION POR DEMANDAS Y EMISORES	
				%			%			%
1	7.8	8.2	4.88	%	8.34	6.47	%	8.18	4.65	%
2	8.54	8.32	0.23	%	8.65	1.27	%	8.48	0.71	%
3	6.8	6.52	4.29	%	6.63	2.56	%	6.5	4.62	%
4	5.6	6.27	10.69	%	6.37	12.09	%	6.25	10.40	%
5	7.87	8.66	9.12	%	8.80	10.57	%	8.63	8.81	%
		PROMEDIO DE ERROR	6.84	%	PROMEDIO DE ERROR	6.59	%	PROMEDIO DE ERROR	5.05	%
			RANGO NO PERMITIDO		RANGO NO PERMITIDO			RANGO PERMITIDO		
MUESTREO	CAUDAL OBSERVADO PUNTO ESMERALDA(L/S)	CAUDAL CALCULADO PUNTO ESMERALDA(L/S)	PORCENTAJE DE ERROR INICIAL		CAUDAL CALCULADO PUNTO ESMERALDA(L/S)	PORCENTAJE DE ERROR CALIBRACION POR DEMANDAS		CAUDAL CALCULADO PUNTO ESMERALDA(L/S)	PORCENTAJE DE ERROR CALIBRACION POR DEMANDAS Y EMISORES	
				%			%			%
6	3.02	2.95	2.37	%	3.25	7.08	7.08	3.25	7.08	%
7	3.43	2.80	22.50	%	3.08	11.36	11.36	3.08	11.36	%
8	2.58	2.30	12.17	%	2.53	1.98	1.98	2.53	1.98	%
9	2.38	2.18	9.17	%	2.40	0.83	0.83	2.40	0.83	%
10	1.98	1.97	0.51	%	2.17	8.76	8.76	2.17	8.76	%
11	2.31	2.66	13.16	%	2.93	21.16	21.16	2.93	21.16	%
		PROMEDIO DE ERROR	9.98	%	PROMEDIO DE ERROR	8.53	%	PROMEDIO DE ERROR	8.53	%
			RANGO NO PERMITIDO		RANGO PERMITIDO			RANGO PERMITIDO		

Tabla 26 – Resultados de Calibración de masas por demandas desconocidas y emisores

15.3.1 CALIBRACION DE MASAS:

En la tabla # 17 de resultados de calibración de masas por demandas desconocidas, se puede observar en el primer escenario #5 que se aplica un valor más alto a los nodos que hacen parte del grupo de vereda, y en consecuencia para mantener el equilibrio de masas, un factor multiplicador más bajo al grupo de los nodos urbano, observando que los resultados disminuyen en el número de aciertos con valor 4, posteriormente para el segundo escenario #6 se realiza el proceso contrario, mostrando que se obtiene un acierto más con valor 5. Así las cosas se continúa la variación prefiriendo incrementar urbano y disminuyendo vereda en el escenario #7 obteniendo esta vez 6 aciertos. Se realizan posteriormente más variaciones obteniendo menos aciertos, razón por la cual se toma el escenario #7 como se indica en la tabla #18 como el mejor con 6 aciertos o valores dentro del rango de evaluación como se observa en la tabla 26 y de los cuales 4 fueron para la zona Esmeralda y 2 para la zona Paticos.

Lo anterior indica que la sensibilidad es mayor para esta variable para los usuarios del área urbana y menos para el área veredal. Este hecho se puede explicar teniendo en cuenta que los suscriptores urbanos tienen un gran peso en el total de los consumidores del acueducto y sus hábitos de consumo de agua son diferentes a los de la vereda, la cual está compuesta por industrias y fincas rurales.

Como parte del proceso de calibración se hace necesario tener en cuenta las pérdidas en el sistema, en este caso se utilizaron emisores, que consiste en el proceso de simular un caudal variable de salida para una caída de presión de 1 metro asignándole un valor a la casilla del coeficiente emisor en EPANET. En la tabla # 21 de resultados de calibración por emisores, inicialmente para el escenario #13 se toma una combinación de factores asignándole el valor mayor al grupo del rango de presiones más bajo entre 0 y 40 mca, un valor intermedio al grupo con el rango de presiones entre 40 y 55 mca y un valor menor al grupo del rango de presiones más alto entre 55 y 100 mca, obteniendo así 4 aciertos.

En el caso de los escenarios #15 y # 16 se le asigna un factor bajo al rango de presiones más bajo y un factor más alto al rango de presiones más alto y con mayor número de nodos obteniendo mejores resultados con un total de 5 y 7 valores respectivamente por dentro del rango de evaluación como se observa en la tabla 26 y por tal motivo se escoge como mejor escenario para la calibración por emisores el #16. Cabe agregar que para ningún otro escenario simulado a continuación se obtuvieron mejores resultados.

Lo anterior se explica porque a mayor presión es mayor la probabilidad de fugas (pérdidas técnicas en el sistema), puesto que se incrementa el caudal de agua que sale por las malas conexiones, roturas de la tubería, entre otros factores, siendo el control de presiones, uno de las acciones más valoradas en el proceso de gestión integral de pérdidas de agua.

15.3.2 CALIBRACION DE ENERGIA:

Como parte del proceso de calibración establecido por la metodología CIACUA, se requiere la calibración de la energía en el sistema, para lo cual se llevó a cabo la variación de las rugosidades de las tuberías. Lo anterior teniendo en cuenta que no existía diferencia en los materiales y que las edades de las tuberías son similares, estas se agrupan tomando como base el concepto de mayores pérdidas en el sistema, el cual está condicionado por el flujo de caudal, es decir, la velocidad de flujo en la tubería es directamente proporcional a las pérdidas en la misma.

Así las cosas, a los 3 grupos creados de caudales se les asigno un factor multiplicador distinto para cada escenario obteniendo resultados similares en el número de aciertos en todos los casos, lo que indica que no se produjo ninguna variación en las presiones iniciales y finales después de la modelación de cada escenario, esto sucede porque las velocidades en las tuberías es muy baja, siendo poco sensible este parámetro en la calibración. Cabe resaltar que los valores obtenidos en las presiones una vez hecha la modelación y el proceso de calibración de energía se encuentran dentro del rango de evaluación y por tanto se pueden considerar validos los resultados.

Finalmente con los resultados de la línea base 1 y la línea base 2, según la metodología, se obtiene el modelo unificado y en consecuencia el modelo calibrado totalmente. Las gráficas con los resultados de la calibración donde se puede observar cómo se aproximan los datos calculados mediante la modelación a los datos obtenidos en campo se presentan a continuación en las ilustraciones 18, 19, 20 y 21.

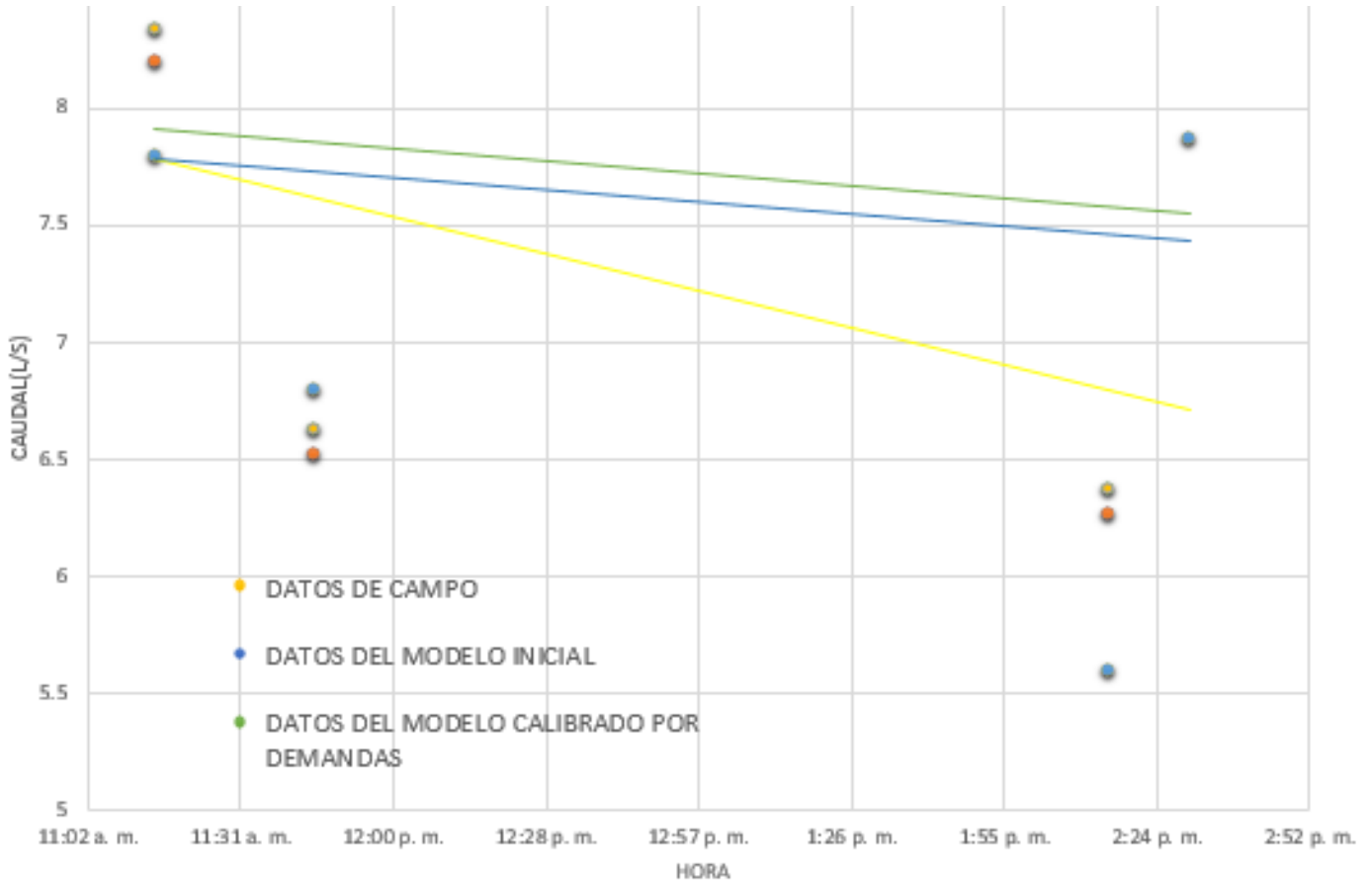


Ilustración 26 – Comparativo de escenarios Real Vs Modelo Inicial Vs Calibrado por Demandas desconocidas en punto Paticos

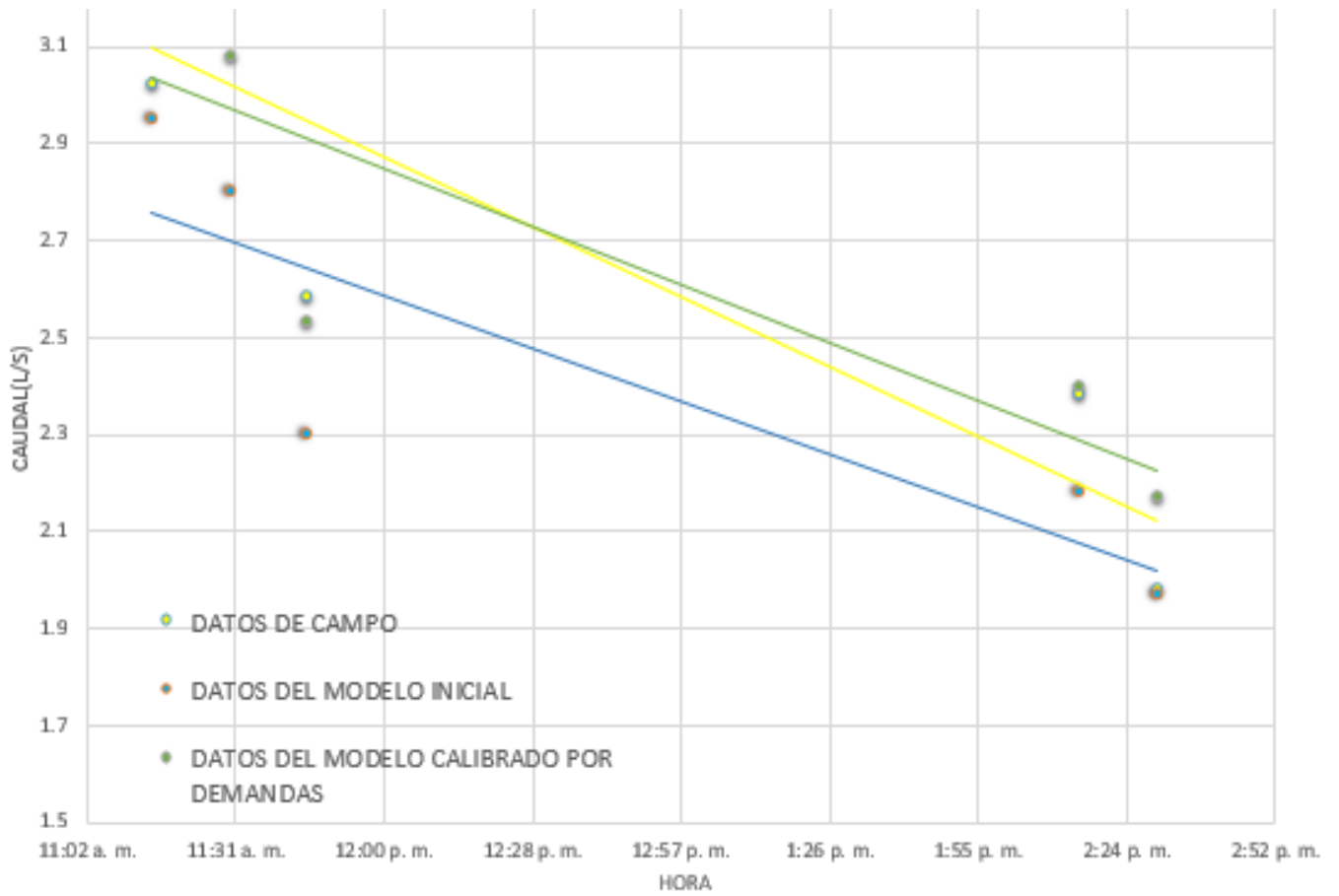


Ilustración 27 - Comparativo de escenarios Real Vs Modelo Inicial Vs Calibrado por Demandas desconocidas en punto Esmeralda

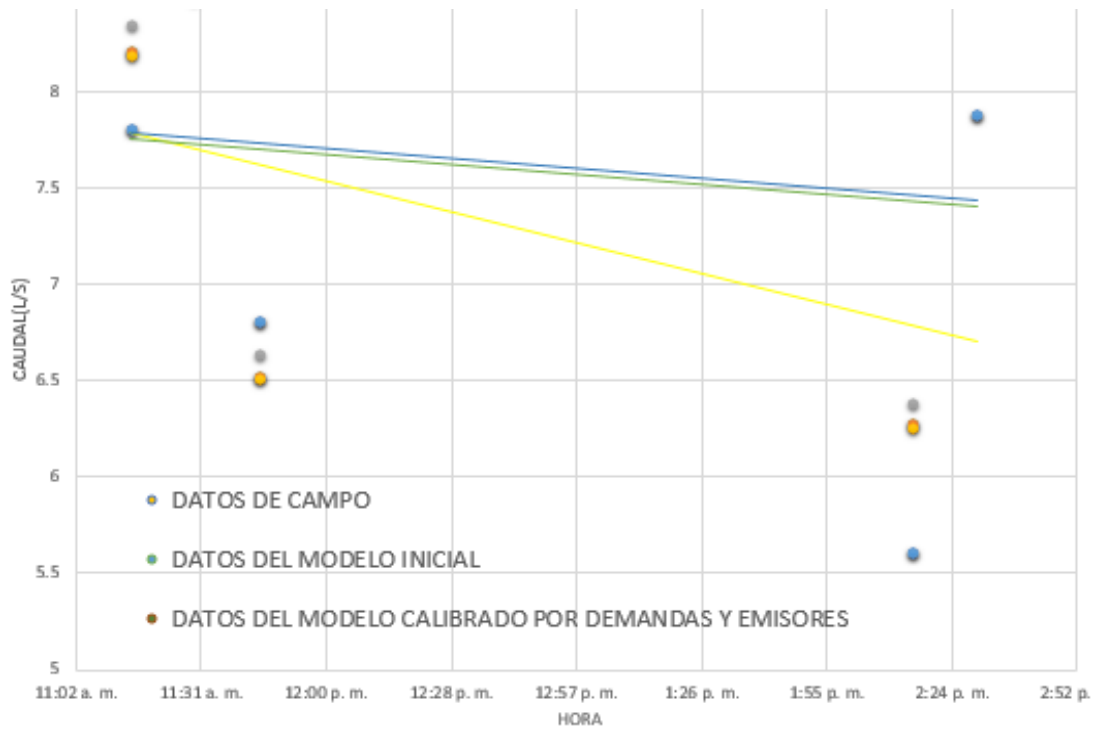


Ilustración 28 - Comparativo de escenarios Real Vs Modelo Inicial Vs Calibrado por Demandas desconocidas y Emisores en punto Paticos

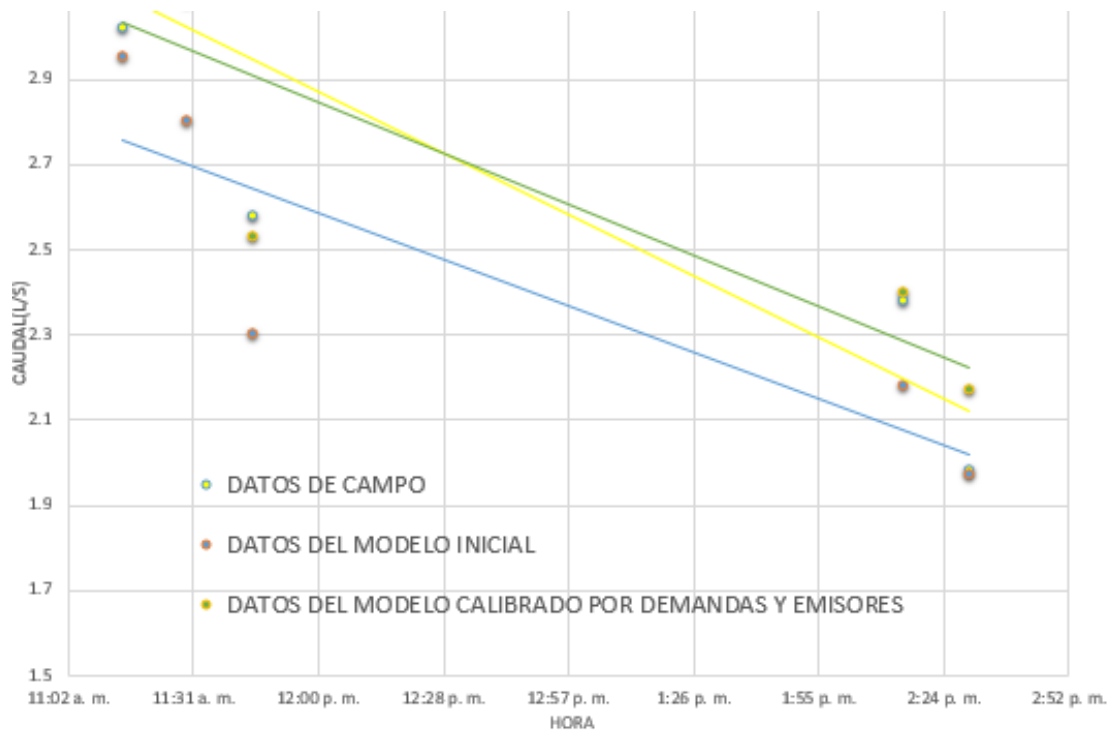


Ilustración 29 - Comparativo de escenarios Real Vs Modelo Inicial Vs Calibrado por Demandas desconocidas y Emisores en punto Esmeralda

15.4 ANALISIS DE RESULTADOS DE LA CALIBRACION

De acuerdo con la información recopilada en la entrevista con los operarios y la junta del acueducto AUCTACT, uno de los principales problemas que se está presentando son las elevadas presiones en varios puntos de la red, lo que se constata en el modelo hidráulico calibrado, en este sentido de acuerdo con el Artículo 62 del RAS hay que tener en cuenta que *“La presión dinámica mínima en la red de distribución debe ser de 10 m.c.a. en sistemas con poblaciones de diseño de hasta 12.500 habitantes”*

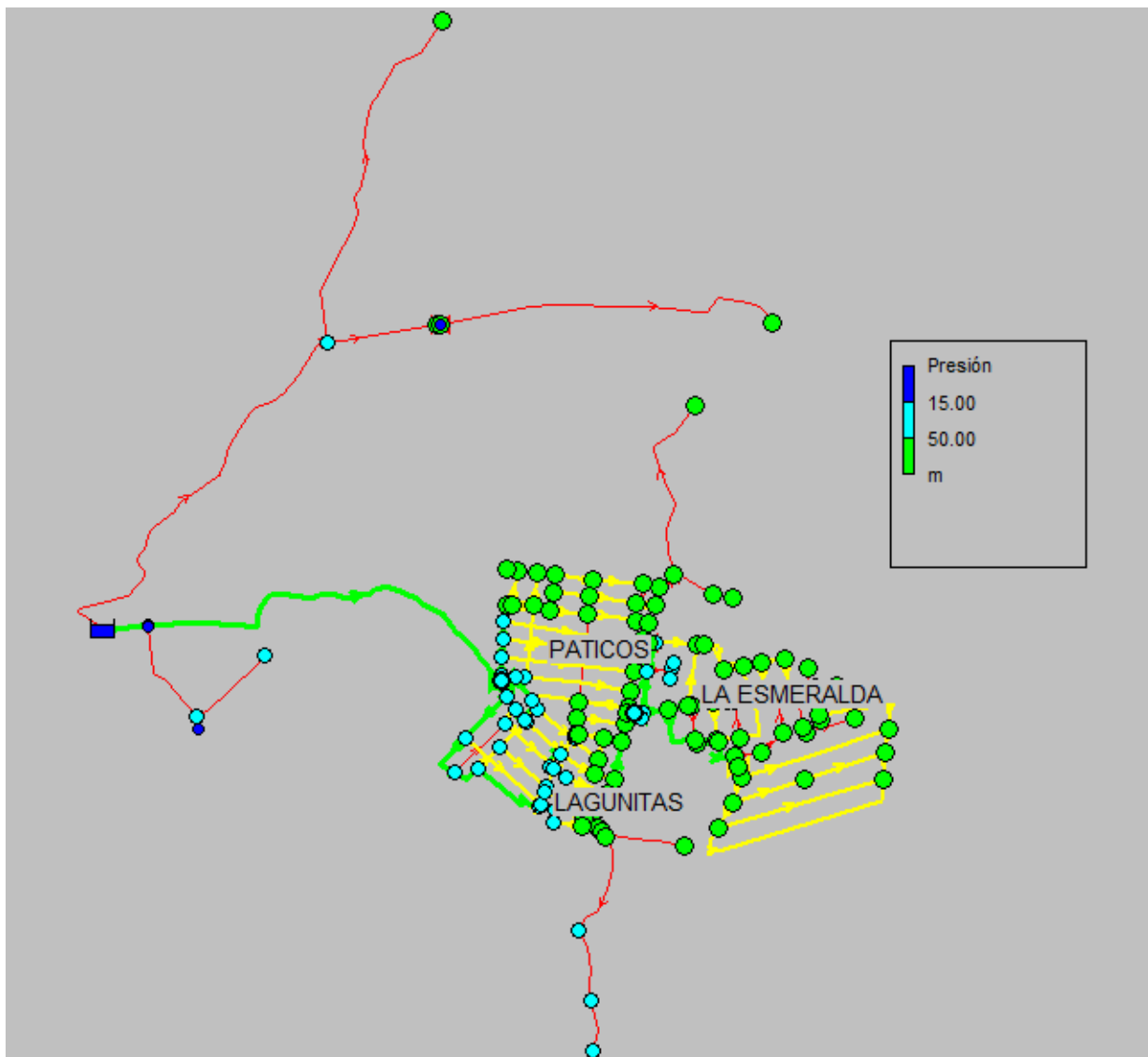


Ilustración 30 – Altas presiones en distintos puntos de la red actual

“La presión estática máxima debe ser de 50 m.c.a. Se pueden presentar presiones estáticas mayores a la máxima definida; en este caso, el área a abastecer con una presión estática superior puede corresponder al 10% del área de la zona de presión, desde que no se sobrepase una presión de 55 m.c.a. y hasta el 5% del área de la zona de presión, desde que no sobrepase una presión de 60 m.c.a.” Parágrafo 1 – Artículo 62 del RAS (Ministerio de vivienda, 2017).

En la ilustración 30 se puede observar que la mayoría de nodos presentan presiones superiores a 50 mca (puntos de color verde) tanto en la Zona de Patiscos, como en las zonas de Esmeralda, Barranquitos y Lagunitas, los cuales hacen parte del sector urbano, de igual forma se presenta el mismo diagnostico en la zona rural.

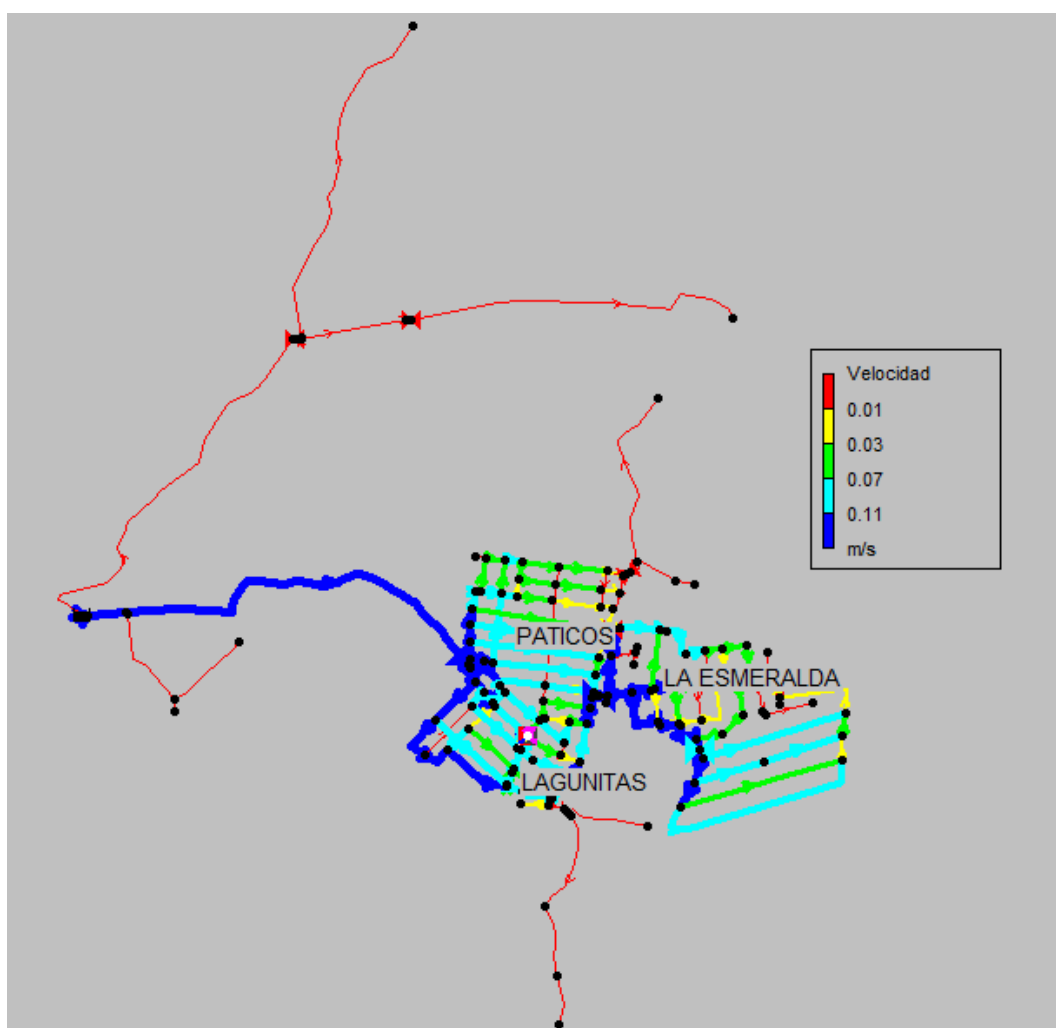


Ilustración 31 – Bajas velocidades de flujo en las tuberías

Otro de los problemas que presenta el acueducto, evidenciado en la modelación calibrada, son las bajas velocidades de flujo en las tuberías las cuales están por debajo de la mínima establecida en el RAS. El análisis de este resultado esta soportado por lo siguiente “*Para el diseño de una aducción o conducción por gravedad o impulsión por bombeo se tendrán en cuenta los siguientes requisitos: La velocidad mínima debe ser de 0.5 m/s, mientras que la velocidad máxima no deberá sobrepasar los límites de velocidad recomendados para el material del dueto a emplear y/o los accesorios correspondientes.*” (Ministerio de vivienda, 2017).

En la ilustración 31 se puede observar que el 100% de las tuberías presentan bajas velocidades de flujo por debajo de 0,5m/s en todas las zonas del acueducto.

15.5 MEJORAMIENTO DEL MODELO CALIBRADO – ESCENARIOS CREADOS

Una vez culminado el proceso de calibración del modelo de simulación hidráulico donde las condiciones reales son representadas lo más fielmente posible en el modelo de EPANET, el objetivo principal es plantear mejoras en la red de distribución de agua potable del sistema AUACACT, para lo cual se crearán diferentes escenarios con una serie de recomendaciones y cambios en el sistema que obedecerán a los lineamientos y medidas indicados en el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS - Resolución 0330 del 2017).

Para resolver los problemas de elevadas presiones, cumplir la normatividad y mejorar la prestación del servicio en el sistema de acueducto AUACACT, se hizo necesario modificar la consignas (presión de salida) de las válvulas reguladoras de presión, ajustándolas de tal forma que se garantice las presiones máxima y mínima, adicionalmente se propone la instalación de válvulas reguladoras de presión adicionales en algunos sectores, donde finalmente se generaron los siguientes 8 escenarios:

1. La válvula reguladora de presión principal #1, ubicada en la entrada del sector denominado Paticos se le modifica la consigna del modelo inicial de 40 mca a 21 mca, cabe anotar que no se puede bajar de este valor, puesto que se generarían presiones bajas (< 8 mca) en algunos nodos de observación. Esta modificación permite garantizar un máximo 50 mca en el sector (Ver ilustración 22).
2. La válvula reguladora de presión #2, ubicada en la entrada al sector denominado Esmeralda se le modifica la consigna del modelo inicial de 42 mca a 15 mca, cabe anotar que no se puede bajar de este valor, puesto que se generarían presiones bajas (< 8 mca) en algunos nodos de observación. Esta modificación permite garantizar un máximo 50 mca en el sector (Ver ilustración 22)
3. La válvula reguladora de presión #3, ubicada en la vía secundaria de acceso al barrio Esmeralda se mantiene cerrada como en el modelo inicial.
4. En el caso de la válvula reguladora de presión #4, ubicada en la entrada al sector denominado Barranquitos se le modifica la consigna del modelo inicial de 25 mca a

20 mca, cabe anotar que no se puede bajar de este valor, puesto que se generarían presiones bajas (< 8 mca) en algunos nodos de observación. Esta modificación permite garantizar un máximo 50 mca en el sector (Ver ilustración 22)

5. Para la válvula reguladora de presión #5, ubicada en el barrio Esmeralda, antes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), se mantienen las condiciones del modelo inicial, es decir una consigna de 15 mca.
6. La cámara de quiebre de presión, representada por la válvula de quiebre de presión #6, se mantiene con una consigna de 0 mca, Cabe anotar que de acuerdo con el Parágrafo 2 - Artículo 62 del RAS, *“El uso de cámaras de quiebre para la regulación de presiones está limitado exclusivamente a líneas en las cuales se transporte agua cruda”*. (Ministerio de vivienda, 2017), por tanto se debe cambiar esta estructura por una válvula reguladora de presión.
7. Adicional a lo anterior se propone la instalación de la válvula reguladora de presión #7, ubicada en la zona rural, parte inferior derecha del barrio Paticos, en este caso se proyecta con una consigna de 15 mca. Con esta modificación se permite garantizar un máximo 50 mca en el sector (Ver ilustración 22).
8. Teniendo en cuenta la alta presión en la zona de vereda, se proyecta la válvula reguladora de presión #8, ubicada en la zona de vereda, parte superior derecha del barrio paticos, cuyo ramal sale del tanque de almacenamiento principal. En este caso se proyecta con una consigna de 15 mca. Con esta modificación se permite garantizar un máximo 50 mca en el sector (Ver ilustración 22).

Con los cambios mencionados anteriormente, se presenta el modelo mejorado del sistema de abastecimiento de agua AUACACT, en el cual se puede observar que en alrededor del 90% de los nodos de observación, se logran presiones por debajo de 50 mca, el restante 10% de puntos de observación se encuentran cercanos a 55 mca. Mientras que los sitios con bajas presiones presentan valores superiores a 8 mca.

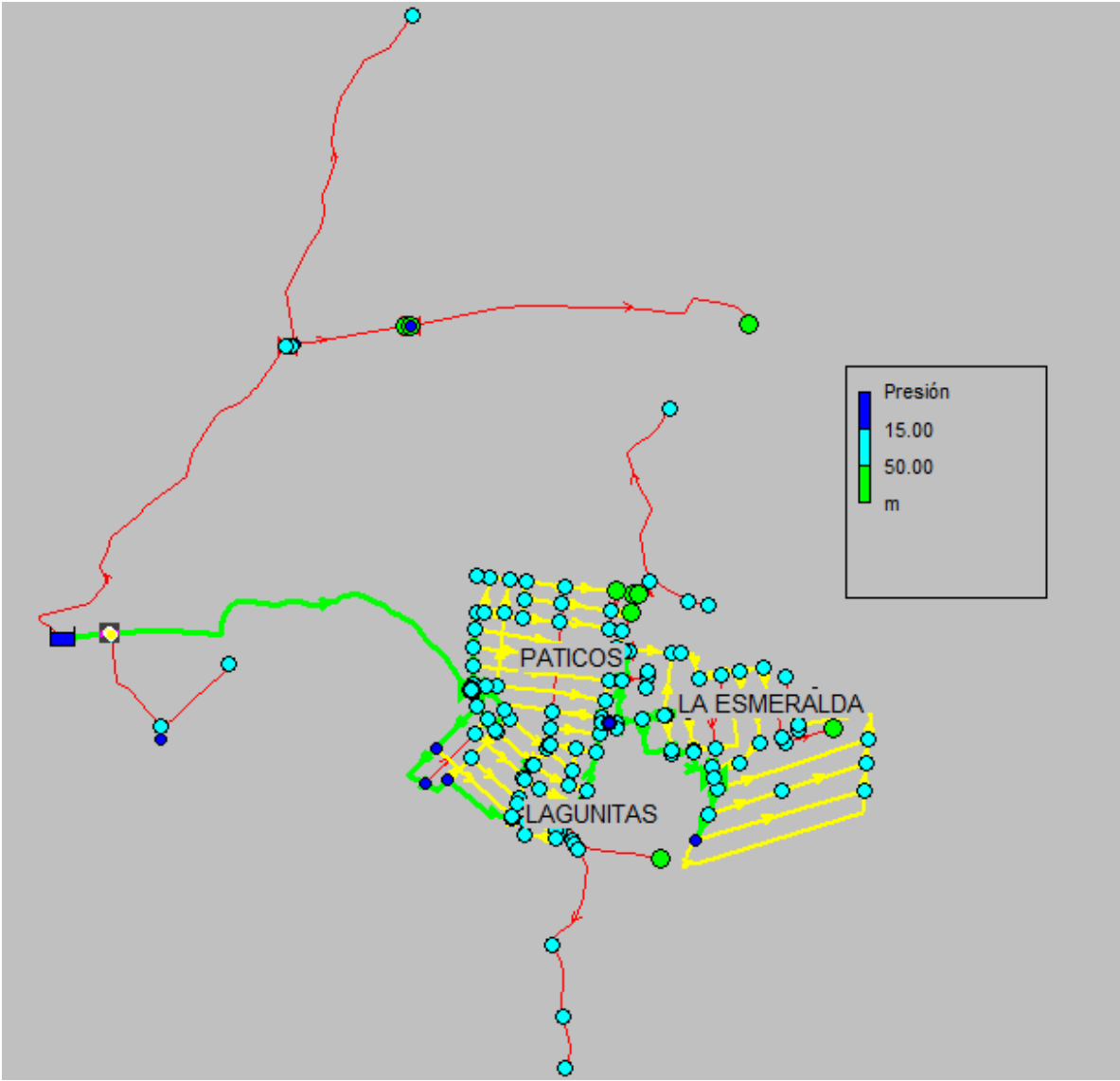


Ilustración 32 – Valores de presión mejoradas en el acueducto AUACACT

16 CONCLUSIONES

- La formulación y cargue del modelo hidráulico dio a conocer la falta de información y un catastro de las redes actualizado, así como la necesidad de realizar una medición y registro continuo de parámetros como el caudal y la presión en diferentes puntos de la red.
- Al contrastar los caudales de agua medidos en la salida del tanque de almacenamiento con los caudales medios estimados a partir de los consumos facturados a los usuarios, se puede concluir que el IANC es del 5%, siendo un valor muy bajo para una red de agua potable existente.
- De acuerdo con la calibración de masas por demandas propuesta en la metodología CIACUA, se puede determinar que al tener mayor peso de nodos de observación el sector urbano que el rural, este presenta una mayor sensibilidad para la calibración.
- Con la calibración de masas por emisores indicada en la metodología CIACUA se puede determinar que los valores de ajuste que presentan más sensibilidad y por consiguiente una mayor probabilidad de fugas, son los nodos que poseen rangos altos de presión.
- En el caso de la calibración de energía por rugosidades se puede concluir que presenta una sensibilidad nula frente al sistema, debido a las bajas velocidades en el flujo de agua por las tuberías. Este parámetro de ajuste no presentó variación en todos los escenarios modelados, por consiguiente la curva de calibración de presiones se mantuvo igual.
- Según los resultados obtenidos en la calibración de masas y energía se puede determinar que todos los valores se encuentran en el rango de evaluación aceptable

del +-5% y 10% para redes principales y secundarias respectivamente de diferencia entre los datos obtenidos en campo y los datos calculados en la modelación.

- El modelo hidráulico calibrado del sistema de acueducto AUCT permitió comprobar que el estado actual del acueducto NO CUMPLE con los lineamientos obligatorios de la Norma RAS – Resolución 0330 de 2017 ya que existen presiones en el sistema superiores a los valores máximos estipulados.
- El modelo hidráulico calibrado del sistema de acueducto AUCT permitió establecer que la red está sobredimensionada, comprobando que el estado actual del acueducto NO CUMPLE con los lineamientos obligatorios de la Norma RAS – Resolución 0330 de 2017 ya que en las tuberías se evidencian las bajas velocidades de flujo del agua por debajo del límite estipulado. Cabe resaltar que esta problemática puede generar en gran medida un cambio total de todo el mallado del acueducto, lo que equivale a un altísimo costo presupuestal con una baja probabilidad de ser viable y además su estudio y rediseño se encuentra por fuera del alcance de nuestro proyecto.
- Según las propuestas de mejoramiento del sistema recogidas en los 8 escenarios creados después del proceso de calibración se puede concluir que efectivamente con las condiciones finales implementadas SI SE CUMPLE con la normatividad obligatoria estipulada en el RAS.
- De acuerdo con los resultados del modelo hidráulico mejorado, se puede concluir que no se requiere una gran inversión para subsanar los problemas actuales del sistema, puesto que la mayoría de ajustes se realizan sobre la infraestructura de válvulas existente.

17 RECOMENDACIONES

- Mantener actualizado el catastro de redes del sistema de acueducto AUCACT para alimentar el modelo hidráulico calibrado de acuerdo con los cambios realizados.
- Realizar la medición y registro continuo de parámetros como el caudal y la presión en diferentes puntos de la red con el fin de evaluar la adecuada prestación del servicio.
- Llevar a cabo la macromedición de caudales en la salida del tanque para poder estimar de forma continua el IANC y conocer la evolución de las pérdidas del sistema.
- Ajustar las consignas de presiones a la salida de las válvulas reguladoras de acuerdo a las conclusiones del presente trabajo de grado con el fin de mejorar la prestación del servicio.
- Adicionalmente al punto anterior, se recomienda instalar las válvulas reguladoras de presión proyectadas en la ubicación indicada en el modelo hidráulico mejorado, con el fin de reducir las altas presiones en las zonas verdes.
- Teniendo en cuenta las bajas velocidades en el flujo de agua del sistema, se recomienda instalar válvulas de purga en puntos estratégicos con el propósito de evacuar los sólidos retenidos.
- Dadas las altas presiones del sistema se recomienda instalar válvulas de ventosa de triple efecto en los puntos altos para eliminar burbujas de aire que puedan afectar las tuberías.

18 BIBLIOGRAFÍA

- ALZAMORA, F. M. (2017). *researchgate.net*. Obtenido de Calibración de un Sistema de Distribución de Agua Complejo a partir de variables SCADA:
https://www.researchgate.net/profile/Fernando_Martinez_Alzamora/publication/321020097_Calibracion_de_un_Sistema_de_Distribucion_de_Agua_Complejo_a_partir_de_variables_SCADA/links/5a08a3290f7e9b68229ccea8/Calibracion-de-un-Sistema-de-Distribucion-de-Agua-C
- AVILA, G. S. (2006). *HIDRAULICA GENERAL*. Obtenido de
<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/confinado/rugosidadabsoluta.html>
- BOGOTA, A. D. (2018). *CATASTRO BOGOTA*. Obtenido de <http://catastrobogota.gov.co>
- BOGOTA, A. M. (2018). *ALCALDIA MAYOR DE BOGOTA*. Obtenido de
<http://bogota.gov.co/localidades>
- BOLIVAR, P. A. (2016). *ambientebogota.gov.co*. Obtenido de SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE:
<http://www.ambientebogota.gov.co/documents/10157/2883179/PAL+CBol%C3%ADvar+2013-2016.pdf>
- DANE. (2009). *DANE.GOV.CO*. Obtenido de CENSO BOGOTA:
<http://www.ambientebogota.gov.co/documents/10157/2883179/PAL+CBol%C3%ADvar+2013-2016.pdf>
- FLORIAN, S. (2017). *repository.ucatolica.edu.co*. Obtenido de OPTIMIZACIÓN DEL SERVICIO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE EN MADRID CUNDINAMARCA:

<https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/14520/1/Documento%20de%20grado.pdf>

GALAN, E. R. (2016). *ESTADO DEL ARTE DE LA CALIBRACION DE MODELOS HIDRAULICOS*. SEVILLA.

GARCIA, M. D. (2006). *www.upct.es*. Obtenido de MODELACION DE REDES HIDRAULICAS A PRESION MEDIANTE HERRAMIENTAS INFORMATICAS:
https://www.upct.es/hidrom/publicaciones/Tesis_pfc/PFC_MMarGracia_2006.pdf

Jimenez, S. I. (2007). *HIDRAULICAFACIL.COM*. Obtenido de Pérdidas de carga localizadas o en accesorios:
<https://www.hidraulicafacil.com/2017/07/perdida-de-carga-localizada-o-en.html>

khanacademy. (2007). *es.khanacademy.org*. Obtenido de <https://es.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-bernoullis-equation>

LOPEZ, C. S. (2012). *MEXICHEN COLOMBIA SAS*. Obtenido de Recopilación, Análisis y Evaluación de las metodologías de calibracion de redesde distribucion:
<https://es.scribd.com/document/129124028/7-Recopilacion-Analisis-y-Evaluacion-de-las-metodologias-de-calibracion-de-modelos-de-RDAP-empleadas-en-algunas-ciudades-de-Colombia>

MARTINEZ, F. (2001). *EPANET MANUAL DE USUARIO*. VALENCIA.

Ministerio de vivienda, C. y. (8 de junio de 2017). *acodal.org.co*. Obtenido de <http://www.acodal.org.co/reglamento-tecnico-ras-nueva-resolucion-0330-de-2017/>

- PARRADO, S. (2016). <http://bdigital.unal.edu.co>. Obtenido de Aplicación de la herramienta PEST:
<http://bdigital.unal.edu.co/57568/2/52991302.2017.pdf>
- PILATI, T. Y. (1987). TEORIA DEL GRADIENTE HIDRAULICO. En T. Y. PILATI.
- PLAZA, J. S. (2017). *EJERCICIOS PRACTICOS EN EPANET*. BOGOTA.
- RAS, 2. (2000). *Dirección General de Agua Potable y Saneamiento Básico*. BOGOTA.
- REBOLLO, L. F. (2009). *UNIVERSIDAD DE ALCALA*. Obtenido de portal.uah.es:
https://portal.uah.es/portal/page/portal/GP_EPD/PG-MA-ASIG/PG-ASIG-67044/TAB42351/T4-Movimiento%20del%20agua%20en%20el%20subsuelo.pdf
- RIAÑO, A. Y. (2015). <https://es.slideshare.net/anyegori/estructuras-basicas-de-un-acueducto>.
Obtenido de UNIVERSIDAD PEDAGOGICA Y TECNOLOGICA DE COLOMBIA
TECNOLOGÍA EN OBRAS CIVILES INDUCCIÓN AL SECTOR DE LA
CONSTRUCCIÓN.
- ROSSMAN, L. (1993). *EPANET*.
- SALAS, D. (2001). *ALGORITMO GENETICO PARA CALIBRACION DE REDES*.
- SALDARRIAGA, J. (1998). *HIDRAULICA DE TUBERIAS*. MCGROW HILL.
- SALDARRIAGA, J. (2007). *HIDRAULICA DE TUBERIAS*.
- SALDARRIAGA, J. (2010). Obtenido de CALIBRACION DE REDES BAJO UN AMBIENTE DE
FUGAS: WWW.PAVCO.COM.CO

SOLANO, F. M. (2015). *WWW.UCO.ES*. Obtenido de Calibración de modelos de redes de distribución de agua dependiendo de la presión: <http://www.uco.es/jia2015/ponencias/c/c023.pdf>

TAKAHASHI, S. (2008). *PAVCO.COM.CO*. Obtenido de CALIBRACION DE REDES MEDIANTE INTELIGENCIA ARTIFICIAL: <https://pavco.com.co/acueducto-y-redes-de-distribucion>

VEGA, C. (s.f.). Obtenido de CALIBRACION DE REDES MEDIANTE METODOS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL.

WALSKY, T. (2015). *RESEARCHGATE.NET*. Obtenido de Technique for Calibrating Network Models: <https://www.researchgate.net/publication/243631101>