



MODELACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL
ACUEDUCTO URBANO DEL MUNICIPIO DE MACHETA CUNDINAMARCA

OCTAVIO AUGUSTO DIAZ ROMERO

MAURI ANDREY GARAVITO ROMERO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS
BOGOTÁ D.C
2020

MODELACIÓN Y CALIBRACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL
ACUEDUCTO URBANO DEL MUNICIPIO DE MACHETA CUNDINAMARCA

OCTAVIO AUGUSTO DIAZ ROMERO

MAURI ANDREY GARAVITO ROMERO

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
ESPECIALISTA EN RECURSOS HÍDRICOS

DOCENTE

FELIPE SANTAMARIA ÁLZATE
INGENIERO SANITARIO

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE ESPECIALIZACIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS

BOGOTÁ D.C

2020



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.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
Introducción	10
1. Generalidades	11
1.1. Línea de Investigación	11
1.2. Planteamiento del Problema	11
1.2.1. Antecedentes del problema	12
1.2.2. Pregunta de investigación	14
1.3. Justificación	14
1.4. Hipótesis	15
1.5. Objetivos	15
1.5.1. Objetivo general	15
1.5.2. Objetivos específicos	15
2. Marcos de referencia	16
2.1. Marco conceptual	16
2.2. Marco teórico	17
2.2.1. Ley de conservación de la energía.	18
2.2.2. Formulación Darcy – Weisbach.	19
2.2.3. Formulación Hazen Williams.	21
2.2.4. Pérdidas Menores.	23
2.2.5. Elementos de modelación en redes	24
2.2.5.1. Conexiones	24
2.2.5.2. Nodos	25
2.2.5.3. Embalses	25
2.2.5.4. Tanques de almacenamiento	25
2.2.5.5. Bombas	25
2.2.5.6. Válvulas de control.	26
2.2.6. Calibración de modelos	27
2.3. Marco jurídico	27
2.4. Marco geográfico	28
2.4.1. Generalidades del Municipio.	28
2.4.2. Diagnostico general del Municipio.	29

2.4.2.1	Clima	29
2.4.3.	Hidrología	30
2.5.	Estado del arte	32
3.	Metodología	34
3.1.	Fases del trabajo de grado	34
3.1.1.	Escenarios de modelación.	40
3.2.	Instrumentos y herramientas utilizadas	41
3.3.	Alcances y limitaciones	42
4.	Productos a entregar	43
5.	Resultados esperados e impactos	44
6.	Catastro de la red de distribución del municipio de Macheta	45
7.	Metodología de modelación y optimización hidráulica de la red de acueducto urbano.	47
7.1.	Depuración de la información en AutoCAD	47
7.2.	Desarrollo del modelo digital	48
7.2.1.	Asignación de las demandas iniciales de los nodos	50
7.2.2.	Patrón de consumo	54
8.	Calibración del Modelo Digital	58
8.1.	Configuración del estudio de calibración.	58
8.2.	Análisis de la Sensibilidad por Demandas.	61
8.3.	Análisis de la Sensibilidad por Rugosidad	67
8.4.	calibración final.	69
8.5.	análisis de resultados de la calibración	72
8.5.1.	Análisis de velocidad del sistema.	73
9.	Procedimiento diagnóstico red proyectada.	74
9.1.	Proyección de usuarios del sistema.	74
9.2.	Cálculo de Caudales.	76
9.2.1.	Dotación Neta.	76
9.2.2.	Dotación neta actual 2020.	77
9.2.3.	Dotación Bruta	78
9.2.4.	Caudal medio diario	78
9.2.5.	Caudal máximo diario y caudal máximo horario	78
9.3.	Asignación de las demandas.	79
9.4.	Análisis de resultados escenario 2045.	79
9.4.1.	Análisis de velocidad en el sistema.	81

9.5. escenario de mejoramiento.	82
9.5.1. Escenario de optimización 1.	82
9.5.2. Escenario de optimización 2.	85
9.6. Escenario de Incendio.	87
10. Conclusiones	90
11. Recomendaciones	91
12. Anexos	92
13. Bibliografía	94

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1 ZONIFICACIÓN DEL ÁREA DE EXPANSIÓN URBANA MACHETA	13
FIGURA 2 BALANCE DE ENERGÍA PARA DOS PUNTOS DE UN FLUIDO.	18
FIGURA 3 ECUACIÓN CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	19
FIGURA 4 DIAGRAMA DE MOODY	21
FIGURA 5 COMPARACIÓN ECUACIONES DE FRICCIÓN	23
FIGURA 6 LOCALIZACIÓN DEL MUNICIPIO	29
FIGURA 7 DIAGRAMA DEL FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO	38
FIGURA 8 PUNTOS DE MUESTREO	40
FIGURA 9 ACTUALIZACIÓN DE DATOS DE LA RED.	45
FIGURA 10 PLANO CATASTRAL DE TUBERÍAS	46
FIGURA 11 CLASIFICACIÓN DE TUBERÍA POR DIÁMETROS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN.	46
FIGURA 12 CARACTERIZACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA RED	47
FIGURA 13 CURVAS DE NIVEL CASCO URBANO MACHETA	48
FIGURA 14 VENTANAS DE CONFIGURACIÓN UNIDADES Y OPCIONES DE CALCULO	49
FIGURA 15 CONFIGURACIÓN COMANDO TREX.	50
FIGURA 16 POLÍGONOS DE THIESSEN	52
FIGURA 17 HERRAMIENTA LOAD BUILDER	54
FIGURA 18 TANQUE DE ALMACENAMIENTO Y MACROMEDIDOR	55
FIGURA 19 CURVA DE MODULACIÓN DE LA DEMANDA	56
FIGURA 20 CONFIGURACIÓN PATRONES DE DEMANDA HORARIA.	57
FIGURA 21 GRUPO DE RUGOSIDADES	58
FIGURA 22 PUNTOS DE MUESTREO	59
FIGURA 23 TOMA DE DATOS DE PRESIÓN EN LOS PUNTOS DE MUESTREO	59
FIGURA 24 INGRESO DE DATOS OBSERVADOS	60
FIGURA 25 GRUPOS DE DEMANDAS	61
FIGURA 26 MODELO INICIAL - DATOS MEDIDOS CANCHA DE FUTBOL	62
FIGURA 27 MODELO INICIAL - DATOS MEDIDOS ALCALDÍA	63
FIGURA 28 MODELO INICIAL - DATOS MEDIDOS FUNERARIA	64
FIGURA 29 MODELO INICIAL - DATOS MEDIDOS FUENTE PARQUE	64
FIGURA 30 MODELOS SOLUCIÓN 1 Y SOLUCIÓN 5 - DATOS MEDIDOS CANCHA DE FUTBOL.	65
FIGURA 31 MODELOS SOLUCIÓN 1 Y SOLUCIÓN 5 - DATOS MEDIDOS FUNERARIA	66
FIGURA 32 MODELOS SOLUCIÓN 1 Y SOLUCIÓN 5 - DATOS MEDIDOS FUENTE PARQUE.	66

FIGURA 33 MODELOS SOLUCIÓN 1 Y SOLUCIÓN 5 - DATOS MEDIDOS ALCALDÍA.	66
FIGURA 34 MODELOS SOLUCIÓN R1 Y SOLUCIÓN R4 - DATOS MEDIDOS CANCHA DE FUTBOL	68
FIGURA 35 <i>MODELOS SOLUCIÓN R1 Y SOLUCIÓN R4 - DATOS MEDIDOS FUNERARIA.</i>	68
FIGURA 36 <i>MODELOS SOLUCIÓN R1 Y SOLUCIÓN R4 - DATOS MEDIDOS FUENTE PARQUE.</i>	69
FIGURA 37 MODELOS SOLUCIÓN R1 Y SOLUCIÓN R4 - DATOS MEDIDOS ALCALDÍA	69
FIGURA 38 CORRELACIÓN DE GRADIENTE HIDRÁULICO	70
<i>FIGURA 39 CORRELACIÓN DE GRADIENTE HIDRÁULICO SIN DATOS 1 PM.</i>	70
FIGURA 40 RANGO DE PRESIONES	72
FIGURA 41 PRESIONES EN LOS NODOS DE LA RED	72
FIGURA 42 BAJAS VELOCIDADES EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN	73
FIGURA 43 TENDENCIA DIFERENTES MÉTODOS	76
FIGURA 44 ZONA DE EXPANSIÓN URBANA	79
FIGURA 45 PRESIONES MÁXIMAS ESTÁTICAS	80
FIGURA 46 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES	80
FIGURA 47 PRESIONES MÍNIMAS DINÁMICAS.	81
FIGURA 48 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES	81
FIGURA 49 VELOCIDADES EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN.	82
FIGURA 50 OPTIMIZACIÓN DIÁMETROS	84
FIGURA 51 REGULACIÓN DE PRESIONES.	85
FIGURA 52 DISTRIBUCIÓN DE PRESIONES CON LAS VRP	85
FIGURA 53 DIÁMETROS ESCENARIO 2	86
FIGURA 54 ESCENARIO 2 PRESIONES MÁXIMAS CON VRP.	87
FIGURA 55 ESCENARIO EVENTOS INCENDIO.	88

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1 VALORES DE RUGOSIDADES	20
TABLA 2 VALORES COEFICIENTE DE RUGOSIDAD HAZEN WILLIAMS	22
TABLA 3 SIMBOLOGÍA ELEMENTOS WATERCAD	26
<i>TABLA 4 RED HÍDRICA Y MICROCUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LA CUENTA DEL RÍO GUATANFUR</i>	31
TABLA 5 MÉTODOS DE CALIBRACIÓN DE MODELOS.	36
TABLA 6 INSTRUMENTOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS	41
TABLA 7 ÁREAS AFERENTES A CADA NODO	51
TABLA 8 <i>CAUDAL PROMEDIO A LA SALIDA DEL TANQUE.</i>	53
TABLA 9 CAUDALES HORARIOS Y VARIACIÓN HORARIA.	56
TABLA 10 VALORES DE PRESIONES MEDIDAS EN PUNTOS DE MUESTREO.	60
TABLA 11 CORRELACIÓN DE DATOS	62
TABLA 12 ADAPTABILIDAD DE LOS MODELOS	65
TABLA 13 ADAPTABILIDAD DE LOS MODELOS GENERADOS POR RUGOSIDAD	67
TABLA 14 EVOLUCIÓN CORRELACIÓN DE DATOS	71
TABLA 15 ADAPTABILIDAD DE LOS MODELO GENERADO FINAL	71
TABLA 16 CENSOS REPORTADOS POR EL DANE	74
TABLA 17 PROYECCIÓN MÉTODO ARITMÉTICO	74
TABLA 18 PROYECCIÓN MÉTODO GEOMÉTRICO	75
TABLA 19 PROYECCIÓN MÉTODO EXPONENCIAL	75
TABLA 20 DOTACIÓN NETA MÁXIMA POR HABITANTE SEGÚN LA ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR DE LA ZONA ATENDIDA.	77
TABLA 21 PROYECCIÓN MÉTODO EXPONENCIAL	77
TABLA 22 <i>CALCULO DOTACIÓN BRUTA</i>	78
TABLA 23 DOTACIÓN MEDIA DIARIA	78
TABLA 24 CALCULO QMH	79
TABLA 25 REPORTE DE CAMBIO DE DIÁMETROS	83
TABLA 26 <i>REPORTE VÁLVULAS REGULADORAS DE PRESIÓN</i>	86

INTRODUCCIÓN

El municipio de Machetá cuenta con un sistema de acueducto, el cual a través del paso del tiempo ha venido presentando indicios de limitación a la prestación de un servicio que cumpla con la normatividad a la totalidad de la población del área urbana. Mediante el presente proyecto se plantea la modelación y calibración del sistema existente, desarrollándose mediante una recolección del catastro de la red actual, para a partir de esto realizar una modelación de diferentes escenarios que permitan observar la principal o principales falencias a las que se está dando lugar y brindar una alternativa de solución; adicional a esto, conociendo en campo las áreas de expansión urbana que se vienen dando en el municipio con previa aprobación del esquema de ordenamiento territorial, se pretende realizar una ampliación de la red, de manera que se incluyan las zonas donde se proyectan construcciones a un mediano plazo, dichas redes en términos de relatividad de tamaño respecto a la malla existente, no representan cambios altamente significativos, pero si brindan soluciones importantes, por lo que no se plantea la realización de un nuevo diseño, sino que se contemplan las ampliaciones como un conjunto respecto al sistema existente.

Si bien el presente proyecto se aplica específicamente para el municipio de Machetá, genera gran expectativa dado que en muchos municipios y grandes ciudades se evidencia visualmente la expansión urbana, y la información como resultados aquí consignados en el presente estudio, pueden ser aplicables en otros lugares con problemáticas similares, así como pueden servir de base para futuras investigaciones. Otro pilar de gran importancia es la aplicabilidad de los conceptos, fórmulas matemáticas, metodologías de modelación y capacidad de análisis de información para la toma de decisiones como aporte al conocimiento ya adquirido como a lo largo de la profesión.

1. GENERALIDADES

1.1. LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Gestión y tecnología para la sustentabilidad de las comunidades.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Colombia es un país con un alto índice de oferta hídrica en la mayor parte de su extensión¹, no obstante muchos centros poblados en los que se cuenta con la disponibilidad del recurso hídrico, no poseen sistemas de acueducto óptimos, según la organización mundial de la salud (OMS) De aquí a 2025, la mitad de la población mundial vivirá en zonas con escasez de agua² razón por la cual se establecen indicadores a partir de metas que buscan reducir esta proyección mediante proyectos que incluyan cada vez más personas dentro de la prestación del servicio; para Espinosa, la importancia de la vigilancia del agua es primordial, esta debería contribuir a la protección de la salud pública al fomentar calidad, cantidad, accesibilidad, cobertura, asequibilidad y continuidad de los sistemas de abastecimiento de agua³ en este orden de ideas, se evidencia la importancia de que los entes prestadores de servicios relacionado con el suministro del agua, estén a la vanguardia de las problemáticas que se visibilizan en un orden mundial. Afirma Sisa, que las empresas del sector de agua potable están siendo sometidas a una fuerte regulación que exige la puesta en marcha de procesos que mejoren la operación y gestión de éstas en aspectos como el control de agua no contabilizada, calidad de agua y cobertura⁴, bajo esta situación es necesario que las empresas del sector dispongan de modelos hidráulicos de las redes de distribución lo suficientemente confiables como para poder tomar decisiones a partir de las simulaciones de estas, los cuales permitan una buena prestación del servicio.

Como consecuencia de estas falencias se presentan problemáticas en la prestación del servicio, tanto en cobertura como en calidad, viéndose reflejado en ampliación a sistemas sin ningún análisis computacional que permita garantizar cada una de las actividades realizadas por los entes territoriales, trayendo posteriormente

¹ IDEAM. Estudio Nacional del agua [en línea]. Bogotá D.C. 2015 P64.[Consultado 13 Septiembre 2019] disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf

² ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS) [en línea] [Consultado Noviembre de 2019] <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

³ ESPINOSA, Adriana. El agua, un reto para la salud publica la calidad del agua y las oportunidades para la vigilancia en salud ambiental. [en línea]. Bogotá D.C. 2018, P09 Universidad Nacional De Colombia. Facultad de medicina. [Consultado Noviembre de 2019] disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/63280/1/PhD%20Adriana%20J%20EspinosaRamirez.pdf>

⁴ SISA, Augusto. Análisis de Parámetros para la Calibración de Redes de Tuberías con Algoritmos Geneticos. [en línea]. Bogotá D.C. 2003 P02. Universidad de los Andes.[Consultado Noviembre de 2019] disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/9133>

sobrepresiones o presiones extremadamente bajas, igualmente con parámetros como la velocidad, generando desgaste temprano de la tubería y baja cobertura en sectores con características particulares de elevación entre otros.

El municipio de Machetá Cundinamarca ubicado en la provincia de Almeidas, se caracteriza por poseer una gran oferta hídrica, la cual se desprende de las dos cordilleras que conforman el municipio, en las que se incluyen zonas de paramo y áreas de tratamiento especial para el cuidado del medio ambiente.

El área urbana que se encuentra a una altura media respecto a su distribución de cotas según su geografía ha venido presentando algunas falencias respecto a la prestación del servicio de abastecimiento de agua potable.

Si bien es cierto que la mayor parte de poblaciones en el país se encuentran en fase de expansión, se debe pensar en la cobertura total de la prestación de los servicios públicos, es este el caso del municipio de Macheta, en el cual se han realizado nuevas zonificaciones en las actualizaciones del esquema de ordenamiento territorial, por medio de la cual se permiten construcciones de baja densidad en áreas limítrofes al área urbana, en las cuales según se muestra en el anexo 1, la oficina de servicios públicos ha tenido que negar la viabilidad para la prestación del servicio la cual se ve altamente limitada, y según lo manifiestan los servidores de la oficina, el brindar esta viabilidad genera que otros sectores presenten problemáticas tal como manifiestan se han venido presentando hasta ahora, es de resaltar que con el paso del tiempo, la red se ha ido ampliando, y si bien se encuentra una red principal que abastece a las primeras construcciones legalizadas, los lotes que aún se encuentran en construcción no podrán acceder al servicio en las condiciones actuales del sistema, de llegar a conectarse a la red, contribuirán con el colapso paulatino de las misma, generando molestias y mala calidad a los demás usuarios.

Los esquemas de ordenamiento territorial como política de regulación de la expansión desordenada muchas veces se ve enfocado en el buen ejercicio de su actividad principal, pero es necesario analizar las limitaciones a las que se puede enfrentar sus habitantes, no para verla como un problema, pero si para crear una oportunidad al desarrollo de nuevas obras que den vía libre a la habitabilidad; el municipio de macheta por sus condiciones topográficas, ha venido presentando una expansión de su área urbana hacia la parte baja, es decir que existe una diferencia de cotas entre el inicio del área urbana, y el final del área proyectada como área de expansión de aproximadamente 100 metros, esto en una longitud horizontal de 600 metros, lo que indica que se encuentran altas pendientes, y por consecuencia un mayor efecto de la gravedad sobre la masa de agua, tendiendo siempre a quedar sin el servicio las partes donde están las cotas mayores, por lo que la oficina de servicios públicos se está limitando la certificación de disponibilidad de prestación del servicio para tramites de licencia de construcción, parcelación y división.

1.2.1. Antecedentes del problema

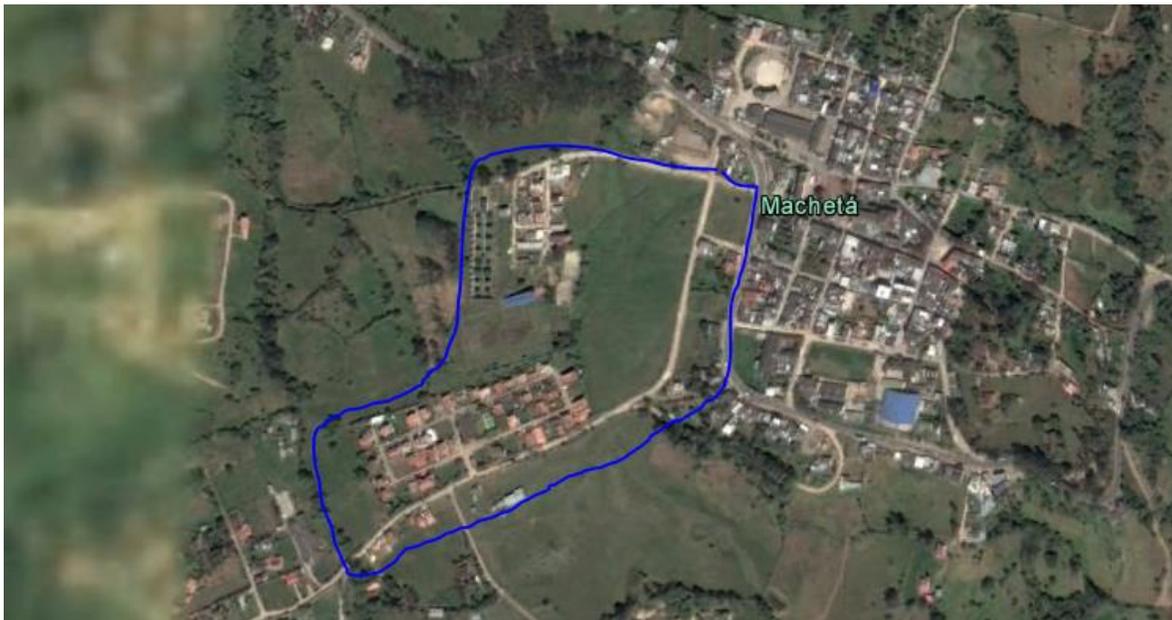
Mediante visitas al municipio de Machetá y realizando una revisión del esquema de ordenamiento territorial, el cual con su último ajuste realizado en el mes de

Junio de 2016 se encuentran algunos puntos importantes que son claves para la realización del presente estudio, dado que se realiza una expansión de áreas con la facultad para subdividir y parcelar predios, generando una incorporación de área rural a área urbana.

Si bien lo dice el Artículo 365 de la constitución de 1991 “Los servicios públicos son inherentes a la finalidad social del Estado. Es deber del Estado asegurar su prestación eficiente a todos los habitantes del territorio nacional. Los servicios públicos estarán sometidos al régimen jurídico que fije la ley, podrán ser prestados por el Estado, directa o indirectamente, por comunidades organizadas, o por particulares. En todo caso, el Estado mantendrá la regulación, el control y la vigilancia de dichos servicios”⁵ el municipio de Machetá ha venido generando espacios territoriales destinados a la ampliación del área urbana, que, si bien pertenecen a áreas de baja densidad poblacional, implican una demanda de servicios públicos, los cuales requieren una constante ampliación con el fin de cubrir todas las necesidades de la población.

Los costados noroccidentales y surorientales del municipio han experimentado un crecimiento exponencial en los proyectos de parcelación, subdivisión y construcción de predios, los cuales requieren la prestación de servicios públicos de una manera integral; en la siguiente imagen, se relacionan los polígonos que actualmente se encuentran dentro del sector de incorporación al área urbana, según el último ajuste al esquema de ordenamiento territorial.

Figura 1 zonificación del área de expansión Urbana Macheta



Fuente: Google earth.

⁵ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA, constitución de 1991 (4 Julio de 1991. Bogotá, D.C., 1991.

En la figura 1 se muestra área urbana del municipio de Machetá, a la cual se le incluyen las áreas de expansión estipuladas en el esquema de ordenamiento territorial, y que actualmente y según lo evidenciado en campo, son las que se encuentran en un alto desarrollo urbanístico.

Las zonas delimitadas de color azul actualmente presentan un déficit en la oferta del servicio, las cuales se evidencian en la negación de algunas viabilidades de prestación del servicio de acueducto, emitidas por la oficina de servicios públicos, (anexo A) así como en otras zonas, no se encuentra la instalación de la red.

La parte superior del polígono delimitado posee sectores que corresponden a las zonas excluidas de cualquier tipo de construcción, pues dentro de esta se encuentran fajas de retiro obligatorio estipuladas en la ley 1228 de 2008 por la cual se determinan las fajas mínimas de retiro obligatorio o áreas de exclusión, para las carreteras del sistema vial nacional, se crea el Sistema Integral Nacional de Información de Carreteras y se dictan otras disposiciones, así como áreas de retiro obligatorio para construcciones por corresponder a una fuente hídrica.

1.2.2. Pregunta de investigación

¿Cómo mejorar la accesibilidad y cobertura de la prestación de agua potable en el área urbana del municipio de Machetá?

1.3. JUSTIFICACIÓN

El área urbana del municipio de Machetá, así como sus sectores limítrofes han venido presentando una expansión de su área urbanizable urbanizada y no urbanizada mediante la actualización y los últimos ajustes al esquema de ordenamiento territorial, lo que implica una mayor demanda de la prestación del servicio de acueducto la cual se pretende prestar con diámetros y tuberías que se instalaron con proyecciones menores de población, como consecuencia de esto, se encuentra que actualmente se ha complicado dar viabilidad de prestación de servicio de acueducto a las nuevas urbanizaciones y o construcciones, lo que ha llevado a que dentro de las nuevas licencias de parcelación del municipio y dando alcance a los requisitos para otorgar las respectivas licencias, sea necesario requerir una modelación con su debida calibración con el fin de obtener un diseño, de manera que se brinde cobertura y continuidad a la prestación del servicio a los nuevos proyectos de vivienda.

1.4. HIPÓTESIS

- Los horarios de máxima demanda implican reducciones de presión en la red de distribución.
- Los diámetros con que cuenta la red generan una pérdida de presión que se ve reflejada en el abastecimiento de agua.
- Un aumento progresivo de la demanda en las zonas de expansión genera problemas de sub-presión en las zonas de mayor elevación.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo general

- Generar una alternativa de mejora a la prestación del servicio de agua potable del municipio de Machetá Cundinamarca, mediante una modelación y calibración en el software Watercad.

1.5.2. Objetivos específicos

- Levantar el catastro de la red de distribución de agua potable del municipio de Machetá.
- Calibrar el modelo de la red de distribución de agua potable del Municipio de Machetá con el fin de obtener un modelo que refleje las condiciones reales del sistema hidráulico.
- Proponer una alternativa de solución a las problemáticas encontradas en el modelo calibrado.

2. MARCOS DE REFERENCIA

2.1. MARCO CONCEPTUAL

La prestación del servicio de acueducto, así como el alcantarillado y aseo son un derecho fundamental de las poblaciones, es por esto que las administraciones municipales se encuentran en la obligación de garantizar que la totalidad de las áreas pertenecientes al municipio, gocen de un servicio digno y óptimo.

Es a través de Empresas Públicas de Cundinamarca (EPC) la cual es una empresa cuyo mayor accionista es la gobernación de Cundinamarca, que los municipios gestionan recursos mediante la presentación de proyectos relacionados con el agua potable y el saneamiento básico, en los que se contemplan estudios, diseños y proyectos de construcción.

Uno de los pilares para la fundamentación de un proyecto se basa en el conocimiento de las condiciones actuales del mismo, ya que a partir de esta información se plantearán las diferentes alternativas a que podría tener lugar una solución a cierta problemática, es en este sentido que se resalta la importancia de realizar la calibración y el diagnóstico a los proyectos objeto de estudio. Es el resultado de este el que permite emitir un concepto de viabilización para continuar con ampliaciones o demás trabajos que se deseen realizar, y son un apoyo eficaz para la toma de decisiones.

Las redes de acueducto se caracterizan por ser sistemas que trabajan a presión, lo que implica que sobre estos actúan algunas leyes de la física, las cuales describen matemáticamente su comportamiento y permiten predecir su funcionamiento en diferentes escenarios y con diferentes parámetros y/o variables, entre las que se puede resaltar el material, la edad, entre otros; a continuación se realiza la descripción de algunos términos que permiten una conceptualización más precisa del presente proyecto.

- **Acometida de acueducto:** “derivación de la red de distribución que se conecta al registro de corte en el inmueble”⁶
- **Calibración:** “consiste en la modificación de parámetros del modelo matemático de la red. Esta modificación se realiza con el fin de mejorar la semejanza entre el modelo hidráulico y la red existente en campo”⁷.
- **Capacidad hidráulica:** “capacidad que puede manejar un componente o

⁶ COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 0330 (8, junio, 2017). Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS. Bogotá, D.C., 2017. p.155.

⁷ Ibid., p. 159.

- estructura hidráulica conservando sus condiciones normales de operación”⁸
- **Modelo hidráulico:** “Formulación idealizada que representa la respuesta de un sistema hidráulico a estímulos externos”⁹
 - **Pérdida por velocidad de flujo:** Carmona¹⁰ la define como la disminución de velocidad de un líquido debido a la fricción generada con las paredes de un tubo o también conocida como pérdida de carga por fricción o rozamiento.
 - **Pérdidas técnicas en la red de distribución:**” corresponde a las fugas tanto detectables como no detectables”¹¹
 - **Presión estática:**” es la ejercida en la base de un tubo vertical de descarga cuando el agua se encuentra en reposo”¹²
 - **Presión:**” es el efecto que se produce cuando se aplica una fuerza a una superficie. Se acostumbra a expresarse en varios sistemas de unidades: kilogramo por centímetro cuadrado(kg/cm²), libras por pie cuadrado (psf), libras por pulgada cuadrada (psi), el sistema internacional utiliza el pascal (Pa).¹³
 - **Sistema de acueducto:**” conjunto de elementos y estructuras cuya función es de captación de agua, el tratamiento, el transporte, almacenamiento y entrega al usuario final, de agua potable con unos requerimientos mínimos de calidad, cantidad, y presión”¹⁴

2.2. MARCO TEÓRICO

La teoría de este proyecto se encuentra enfocada a los conceptos técnicos usados para proyectos que funcionan a presión, así como la metodología y fórmulas matemáticas con las que el software de análisis estudia los sistemas. Teniendo en cuenta que se ha aprobado recientemente una nueva resolución en Colombia, mediante la cual se reglamenta todo lo relacionado con los sistemas de abastecimiento y saneamiento básico, muchos de los conceptos que a continuación se mencionan tienen que ver con la misma.

⁸COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 0330 (8, junio,2017). Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS. Bogotá, D.C., 2017. P.159.

⁹ Ibid., p. 170

¹⁰ PÉREZ, Rafael. Instalaciones hidrosanitarias y de gas para edificaciones [base de datos en línea].6ª Edición. Bogotá. Ecoe ediciones. 2010, p 4.[consultado: 8 de Octubre 2019]. Disponible en: base de datos ProQuest Ebook Central

¹¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 0330 (8, junio,2017). Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS. Bogotá, D.C., 2017. P.172

¹² PÉREZ, Rafael. Instalaciones hidrosanitarias y de gas para edificaciones [base de datos en línea].6ª Edición. Bogotá. Ecoe ediciones. 2010, p 3.[consultado: 8 de Octubre 2019]. Disponible en: base de datos ProQuest Ebook Central

¹³ Ibid., p. 3

¹⁴ COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 0330 (8, junio,2017). Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS. Bogotá, D.C., 2017. P.177.

2.2.1. Ley de conservación de la energía.

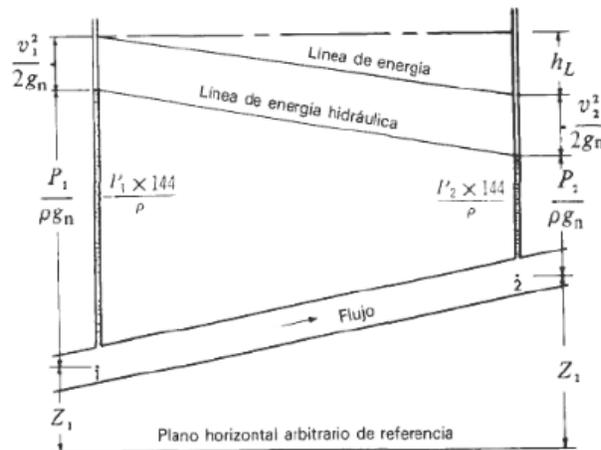
La conservación de la energía es la base teórica para el diseño de redes, el teorema de Bernoulli aplica fielmente este principio en fluidos conducidos por tuberías, “la cual plantea que la diferencia de energía entre dos puntos es la misma sin importar el camino tomado.”¹⁵

La energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal arbitrario fijado como referencia, es igual a la suma de la altura geométrica, la altura debida a la presión y la altura debida a la velocidad, es decir:

$$Z + \frac{P}{\rho g n} + \frac{v^2}{2 g n} = H \quad (1)$$

Si las pérdidas por rozamiento se desprecian y no se aporta o se toma ninguna energía del sistema de tuberías (bombas o turbinas) la altura total H en la ecuación anterior permanecerá constante para cualquier punto del fluido. Sin embargo, en la realidad existen pérdidas o incrementos de energía que deben incluirse en la ecuación de Bernoulli. Por lo tanto, el balance de energía puede escribirse para dos puntos del fluido.¹⁶

Figura 2 Balance de Energía para dos puntos de un fluido.



Fuente: CRANE, ed. Flujo de fluidos: en válvulas, accesorios y tuberías. [base de datos en línea]. McGraw-Hill Interamericana, p 19.[consultado: 19 de Octubre 2019]. Disponible en: base de datos ProQuest E-book Central

¹⁵ BENTLEY, Modelación y diseño de sistemas de distribución de agua [en línea].Pensilvania:[consultado:19 de octubre de 2019]. Disponible en: <http://academia.edu/>

¹⁶ CRANE, ed. Flujo de fluidos: en válvulas, accesorios y tuberías. [base de datos en línea]. McGraw-Hill Interamericana, p 19.[consultado: 19 de Octubre 2019]. Disponible en: base de datos ProQuest Ebook Central

En la figura 2 se puede identificar en el balance de energía la variable (hl), la cual corresponde a las pérdidas por rozamiento en la tubería, la cual se expresa como pérdida de altura en metros de fluido, complementando la ecuación de la siguiente forma:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + hl \quad (2)$$

Todas las fórmulas prácticas para el flujo de fluidos se derivan del teorema de Bernoulli, con modificaciones para tener en cuenta las pérdidas debidas al rozamiento; para el modelamiento el software Watercad, realiza sus cálculos utilizando otras variables como: la carga agregada por bombas y pérdidas menores. Ver figura 3.

Figura 3 Ecuación Conservación de la energía

Ec. Conservación de Energía

La diferencia de energía entre dos puntos es la misma sin importar el camino tomado.

$$z_1 + p_1/\gamma + V_1^2/2g + \Sigma h_p = z_2 + p_2/\gamma + V_2^2/2g + \Sigma h_L + \Sigma h_M$$

Donde,

- z = Elevación
- p = Presión
- γ = Peso específico
- V = Velocidad
- h_p = Carga agregada por Bombas
- h_L = Pérdidas por fricción
- h_M = Pérdidas menores



Fuente: BENTLEY, Modelación y diseño de sistemas de distribución de agua [en línea]. Pensilvania: [consultado: 19 de octubre de 2019]. Disponible en: <http://academia.edu/>

2.2.2. Formulación Darcy – Weisbach.

“Los primeros experimentos referentes al flujo de agua en tubos rectos y largos indicaron que la pérdida de cargas variaba directamente con respecto a la altura equivalente, a la velocidad (aproximadamente) y a la longitud del tubo, inversamente con respecto al diámetro del tubo. Utilizando un coeficiente de proporcionalidad f, denominado factor de rozamiento, Darcy y Weisbach y otros autores propusieron la ecuación siguiente:”¹⁷.

¹⁷ ZACARIAS, Santiago GONZALES, Justino, et al. Mecánica de fluidos: teoría con aplicaciones y modelado

$$hl = f \left(\frac{L}{D} \right) * \left(\frac{v^2}{D2g} \right) \quad (3)$$

donde:

hl: pérdida de energía debido a la fricción

L: Longitud de tubería

D: Diámetro de la tubería

v: velocidad promedio del flujo

f: factor de fricción

El factor de rozamiento mencionado anteriormente se ve influenciado por distintas variables como: el tipo de material de la tubería, puesto que, cada material tiene un tipo de rugosidad característico, de igual forma la velocidad y viscosidad de los fluidos son factores determinantes del factor de rozamiento. De igual forma el factor de fricción en la ecuación de Darcy está supeditado también al tipo de flujo, puede de ser este de tipo laminar $Re < 2000$ o flujo turbulento $RE > 3000$, para el caso del análisis con el software Watercad el factor de fricción es calculado teniendo en cuenta todas las variables, pero cuando se requiere determinar de manera más práctica dicho valor es útil el diagrama de Moody, (ver figura 4) para lo cual es necesario conocer el número de Reynolds y la rugosidad relativa. La tabla 1 muestra la rugosidad para algunos materiales.

Tabla 1 Valores de Rugosidades

Material	Rugosidad (m)	Rugosidad (pies)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	$3.0 \cdot 10^{-7}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$
Tubo extruido: cobre, Latón y acero	$1.5 \cdot 10^{-6}$	$5.0 \cdot 10^{-6}$
Acero, comercial o soldado.	$4.6 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-4}$
Hierro Galvanizado	$1.5 \cdot 10^{-4}$	$5.0 \cdot 10^{-4}$
Hierro dúctil, recubierto	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$4.0 \cdot 10^{-4}$
Hierro dúctil, no recubierto	$2.4 \cdot 10^{-4}$	$8.0 \cdot 10^{-4}$
Concreto, bien fabricado	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$4.0 \cdot 10^{-4}$
Acero remachado	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$6.0 \cdot 10^{-3}$

Fuente: ZACARIAS, Santiago GONZALES, Justino, et al. Mecánica de fluidos: teoría con aplicaciones y modelado [base de datos en línea]. 1ª Edición. Ciudad de México. Grupo Editorial Patria. 2017, p 209. [consultado: 19 de Octubre 2019]. Disponible en: base de datos ProQuest E-book Central

[base de datos en línea]. 1ª Edición. Ciudad de México. Grupo Editorial Patria. 2017, p 207. [consultado: 19 de Octubre 2019]. Disponible en: base de datos ProQuest Ebook Central

Figura 4 Diagrama de Moody

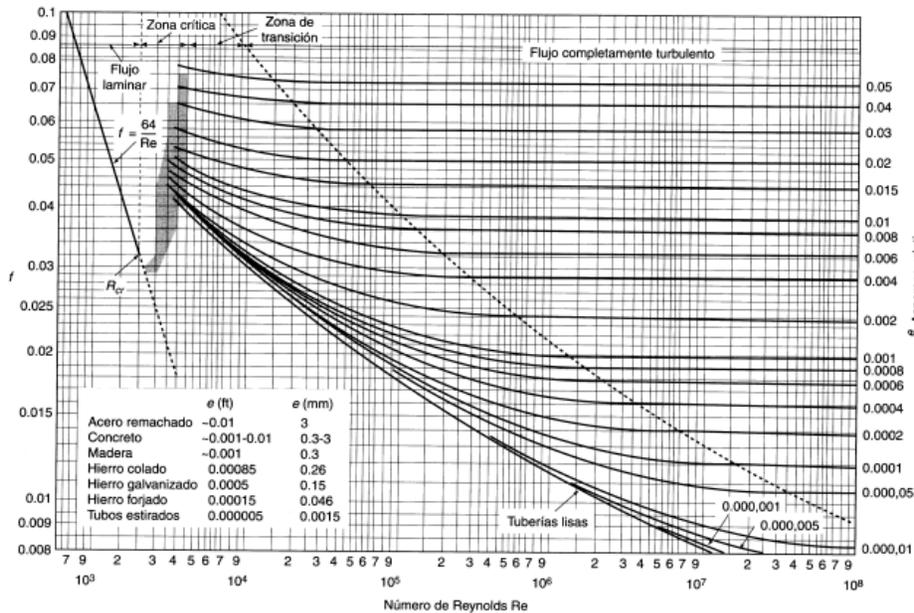


Diagrama de Moody. (De L.F. Moody, *Trans. ASME*, vol. 66, 1944.)

Fuente: Moody L. Friction factors for pipe Flow. Transaction of the ASME, Vol 66. (1944).

2.2.3. Formulación Hazen Williams.

Los cálculos desarrollados por Hazen Williams para determinar el factor de fricción en los sistemas de tuberías fueron obtenidos de manera empírica y experimental, fórmulas que se han derivado principalmente en condiciones de flujo turbulento específicamente para el agua, y por ello en otro tipo de fluidos no se obtienen resultados favorables.

La fórmula de Hazen Williams en el sistema inglés de unidades (US) adopta la forma:

$$v = 1.32ChR^{0,63}S^{0,54} \quad (4)$$

Donde:

V: Velocidad promedio del flujo, pie/s

Ch: Coeficiente de Hazen Williams.

R: Radio hidráulico del conducto, pie.

La relación de pérdida o pedida de energía S, se determina como:

$$S = \frac{hl}{L} \quad (4.1)$$

El uso del radio hidráulico en la fórmula permite su aplicación tanto para secciones circulares como para secciones no circulares.

El Coeficiente Ch depende de la condición de la superficie de la tubería o conducto. En este aspecto, las tuberías lisas presentan valores más elevados de Ch, en tanto que las tuberías rugosas presentan valores más bajos.¹⁸

En la siguiente tabla se presentan los valores del coeficiente de rugosidad de Hazen Williams más comunes según el tipo de material.

Tabla 2 Valores Coeficiente de Rugosidad Hazen Williams

Material de Tubería	c
Cemento Asbestos	140
Bronce	130-140
Alcantarillado de Ladrillo	100
Hierro Fundido	
Nueva, sin recubrimiento	130
10 Años	107-113
20 Años	89-100
30 Años	75-90
40 Años	64-83
Concreto con recubrimiento	140
Molde de acero Girado Centrifugadamente	135
Cobre	130-140
Hierro Galvanizado	120
Vidrio	140
Plomo	130-140
Plástico	140-150
Acero	
Esmalte de alquitran de carbon	145-150
Ribeteado	110
Hojalata	130
Ceramica vitrificada (cond. Buena)	110-140

Fuente: BENTLEY, Modelación y diseño de sistemas de distribución de agua [en línea]. Pensilvania: [consultado: 31 de octubre de 2019]. Disponible en: <http://academia.edu/>.

Como se ha podido observar son varios autores los cuales han desarrollado sus formulaciones para deducir el factor de rozamiento, es por ello imprescindible en el momento de emplear alguna de las ecuaciones propuestas, saber su aplicabilidad a el tipo de fluido y el tipo de flujo (ver figura 5).

¹⁸ ZACARIAS, Santiago GONZALES, Justino, et al. Mecánica de fluidos: teoría con aplicaciones y modelado [base de datos en línea]. 1ª Edición. Ciudad de México. Grupo Editorial Patria. 2017, p 218. [consultado: 31 de Octubre 2019]. Disponible en: base de datos ProQuest Ebook Central.

Figura 5 Comparación Ecuaciones de Fricción

Darcy-Weisbach	Manning	Hanzen-Williams
Todos los Fluidos	Agua Solamente	Agua solamente
Difícil de obtener F	Facil de obtener n	Facil de obtener C
Paratodos los regimenes	Flujo turbulento	Flujo turbulento/V<3.05m/s
No es usada comunmente en USA	Usada comunmente para Alcantarillado	Usada Comunmente es USA
$h \propto LV^2/D$	$LV^2/D^{1.33}$	$LV^{1.85}/D^{1.16}$

Fuente: BENTLEY, Modelación y diseño de sistemas de distribución de agua [en línea]. Pensilvania: [consultado: 31 de octubre de 2019]. Disponible en: <http://academia.edu/>.

2.2.4. Pérdidas Menores.

Las pérdidas menores o secundarias, en un sistema de tuberías son ocasionadas por los diferentes accesorios de conexión, cambios de dirección, válvulas, contracciones, ensanchamientos y otros más, los cuales alteran el suave flujo del fluido, dichas pérdidas en comparación con las ocasionadas por la fricción son menores, aunque dependiendo del sistema, la cantidad de accesorios, pueden ser mucho mayores.

Coeficiente de Pérdida

El comportamiento del flujo a través de los accesorios no se comporta de manera predecible mediante teorías, por ello, usualmente algunos fabricantes de accesorios determinan las pérdidas menores de manera experimental.

Las pérdidas menores se expresan en términos del coeficiente de pérdida K_l y se define de la siguiente manera:

$$K_l = \frac{h_l}{V^2/2g} \quad (5)$$

Donde:

H_l : pérdida menor

K_l : coeficiente de resistencia

V : velocidad promedio

En general, el coeficiente de pérdida depende de la geometría del accesorio y el número de Reynolds, tal como el factor de fricción. Sin embargo, usualmente se supone que es independiente del número de Reynolds. Esta

es una solución razonable porque, en la práctica, la mayoría de los flujos tienen números Reynolds grandes y los coeficientes tienden a ser independientes.

Las pérdidas menores también se expresan en términos de longitud equivalente se define como:

$$l_{equiv} = \frac{D}{f} * Kl$$

Donde f es el factor de fricción y D es el diámetro de la tubería que contiene el accesorio. La pérdida de carga que provoca el accesorio equivale a la pérdida de carga causada por un tramo de tubería cuya longitud es L_{equiv} . Por lo tanto, la aportación de un accesorio a la pérdida de carga se puede explicar simplemente con añadir L_{equiv} a la longitud de tubería total.¹⁹

2.2.5. Elementos de modelación en redes

Los sistemas de distribución de agua están conformados por la unión de varios elementos, que interactúan entre sí, transportando el preciado líquido de manera adecuada a la totalidad de los usuarios. Para conseguir que un modelo digital represente adecuadamente el comportamiento del sistema de acueducto existente según Billings la validez de los modelos depende en gran medida de la precisión de los datos de entrada²⁰, de igual manera para Hirrel “hacer un ajuste a los datos de entrada puede ser el método más apropiado para resolver una discrepancia entre los resultados del modelo y los datos de campo”²¹. A continuación, se presentan la forma en la cual el software Watercad representa en el modelo hidráulico digital las diferentes partes de una red de distribución.

2.2.5.1. Conexiones

las conexiones corresponden a los tubos, a través de los cuales se desplaza en fluido a lo largo de la red, por lo cual su presencia es indispensable en todo modelo, las principales propiedades asociadas a los tubos son:

- Diámetro.

¹⁹ CENGEI, yunus CIMBALA, jhon. Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones [base de datos en línea]. New York. The McGrawhill companies. 2006, p 349. [consultado: 03 de Noviembre 2019]. Disponible en: base de datos ProQuest Ebook Central.

²⁰ BILLINGS, Clayton. How to Calibrate Water Distribution Network Models.[base de datos en línea]. United States. Hanley-Wood LLC.1997, p 1.[consultado: 2 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://search-proquest-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/docview/218857617?accountid=45660>.

²¹ HIRREL, Timothy. How not to calibrate a hydraulic network model.(base de datos en línea).United States. American Water Works Association. 2008, p 6. . [consultado: 2 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://search-proquest-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/docview/221587456/abstract/F1618208A8364790PQ/1?accountid=45660>.

- Material.
- Rugosidad.
- Longitud.

2.2.5.2. *Nodos*

Representan las uniones entre los tubos que conforman la red, además de encargarse de reportar la presión disponible en distintas zonas. Las propiedades principales asociadas a los nodos en una red de distribución son:

- Coordenadas.
- Elevación topográfica.
- Demanda.

2.2.5.3. *Embalses*

Representan la fuente de agua a través de la cual se alimenta la red. Las principales propiedades de los embalses son:

- Coordenadas.
- Elevación topográfica.

2.2.5.4. *Tanques de almacenamiento*

Estos elementos se encargan de garantizar la presencia del líquido en el sistema en todo momento, aprovechando las horas de bajo consumo para acumular un volumen de agua, el cual es consumido posteriormente durante las horas de bajo consumo. Para simular un tanque es necesario:

- Coordenadas.
- Sección.
- Volumen.
- Cota de fondo.
- Nivel inicial, máximo y mínimo.

2.2.5.5. *Bombas*

Encargadas de suministrar energía a las redes, los sistemas de bombeo se emplean específicamente en aquellos casos en los cuales las diferencias topográficas no son suficientes para abastecer un parte o la totalidad de los usuarios. Para representar una bomba se requiere.

- Cabeza de presión.
- Caudal
- Curva característica de la bomba.
- Nodo inicial, nodo final de conexión

2.2.5.6. Válvulas de control.

Distribuidas a lo largo y ancho de la red, las válvulas de control se encargan de controlar la energía o la masa disponible en algún sector específico. Para representar una válvula de control se necesita:

- Nodo inicial y final de conexión.
- Diámetro
- Tipo: establecer el tipo de comportamiento, ya sea de regulación de caudal o presión o corte.

La siguiente tabla representa los símbolos de los principales elementos que conforman un sistema de distribución de agua, usados por el software Watercad.

Tabla 3 Simbología Elementos Watercad

ELEMENTOS	SÍMBOLO
Tubo	
Nodos	
Embalses	
Tanques	
Bombas	
válvulas	

2.2.6. Calibración de modelos

La calibración es el proceso de comparar los resultados calculados por el modelo con las presiones y flujos medidos en la red real. Para el autor Roger la calibración de un modelo matemático mal construido puede ser largo y engorroso, porque implica pruebas de ensayo y error para identificar la causa probable de una anomalía y confirmar su existencia en el campo, es decir las variables son abundantes, el método más frecuente para la mayoría de estos procesos funciona sobre la base de modificar los valores de fricción o redistribuir la demanda para que coincida con los datos grabados. Pero se necesita mucho cuidado al aplicar un método tan generalizado por que se parte de que el modelo inicial quedo bien construido²².

2.3. MARCO JURÍDICO

La Resolución 0330 de 2017 “Por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS y se derogan las resoluciones 1096 de 2000, 0424 de 2001, 0668 de 2003, 1459 de 2005, 1447 de 2005 y 2320 de 2009” presenta la normatividad con la que se debe tratar cualquier sistema de abastecimiento y saneamiento en Colombia.

Este reglamento tiene por objetivo normalizar los requisitos que se deben cumplir en infraestructuras relacionadas con los servicios públicos domiciliarios de acueducto, alcantarillado y aseo, mediante lineamientos en las etapas de planeación, diseño, construcción, puesta en marcha, operación, mantenimiento y rehabilitación.

Esta normativa aplica para prestadores de servicios públicos relacionados con el sector de agua potable y saneamiento básico, así como para entidades territoriales, de vigilancia y control relacionadas con esta área, de igual forma aplica para diseñadores, constructores, interventores o personas contratantes que adelanten diseños, obras y mantenimiento de instalaciones o sistemas de agua potable y saneamiento básico.

A continuación, se enumeran los principios orientadores de las etapas de planeación, diseño, construcción, operación y manteniendo según el artículo 3 de la Res 0330 del 2017.

- Garantizar la calidad de la prestación de servicios.

²² ROGERS, Dm. Network analysis models - the secret for success.[base de datos en línea]. United Kingdom. IWA Publishing. 2005, p 5. [consultado: 03 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://search-proquestcom.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/central/docview/1943129662/abstract/991D6CD D133F4CCAPQ/1?accountid=45660>

- Lograr atención prioritaria de las necesidades básicas insatisfechas en materia de agua potable y saneamiento básico
- Buscar ampliación permanente de las coberturas de los servicios
- Garantizar la prestación continua e interrumpida de los servicios.
- Garantizar la seguridad, durabilidad, funcionamiento adecuado, calidad, eficiencia y redundancia de la infraestructura requerida para la prestación de servicios públicos de agua y saneamiento.

Los acuerdos N.º 010 de Junio de 2011, por medio del cual se adopta la revisión y ajuste al Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Machetá, y se modifica parcialmente el acuerdo N° 026 de 2001, y el acuerdo N° 010 DE Agosto de 2016, Por el Cual se Adopta la revisión excepcional de norma Urbanística del Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Machetá.

Decreto 849 de 2002, "Por el cual se reglamenta el artículo 78 de la Ley 715 de 2001", determinan la destinación de los recursos de propósito general y establece un porcentaje de destinación específica para el sector de agua potable y saneamiento básico. Que dichos recursos se destinarán al desarrollo y ejecución de las competencias asignadas a los municipios y distritos en agua potable y saneamiento básico. Los recursos para el sector de agua potable y saneamiento básico se destinarán a la financiación de inversiones en infraestructura, así como a cubrir los subsidios que se otorguen a los estratos subsidiables de acuerdo con lo dispuesto en los artículos 99 y 100 de la Ley 142 de 1994 y en el artículo 78 de la Ley 715 de 2001.

Artículo 1 Decreto 849 de 2002 El objeto del presente decreto reglamentario es definir los requisitos que deben cumplir los municipios y distritos en materia de agua potable y saneamiento básico, y los procedimientos que deben seguir dichos entes y la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, SSPD, para la expedición de la certificación que permita el cambio de la destinación de los recursos que la Ley 715 de 2001 ha estipulado inicialmente para el desarrollo y ejecución de las competencias asignadas en agua potable y saneamiento básico, así como la definición de las obras elegibles a ser financiadas con dichos recursos.

2.4. MARCO GEOGRÁFICO

2.4.1. Generalidades del Municipio.

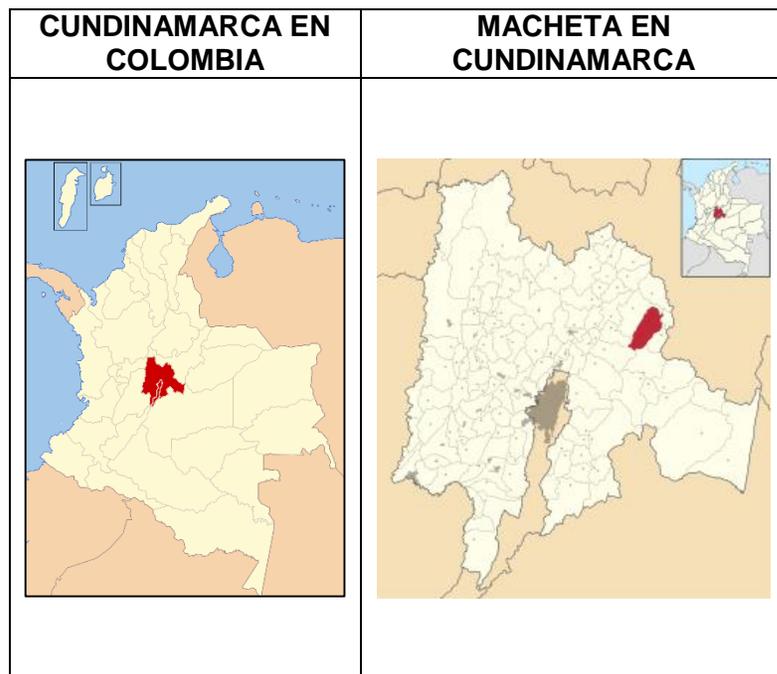
El municipio de Macheta se encuentra al nororiente del departamento de Cundinamarca a tan solo 101 km de Bogotá, con una población de 6.229 habitantes, y perteneciente a la provincia de Almeidas, con una temperatura promedio de 18°C.

La cabecera Municipal de Machetá se localiza en las siguientes coordenadas

geográficas, respecto al Meridiano de Greenwich: 73° 37' Longitud Oeste y de la línea del Ecuador 5° 05' Latitud Norte.

Limita por el oriente con los municipios de Tibirita y Manta, por el occidente con los municipios de Chocontá y Sesquilé; por el oriente con el municipio de Chocontá y por el sur con los municipios de Guatavita y Gachetá. En la siguiente imagen se puede observar la localización del departamento y municipio.²³

Figura 6 Localización del Municipio



Fuente: ALCALDÍA DE MACHETA CUNDINAMARCA. Plan de contingencia contra incendios. Machetá. 2018. p 4.

2.4.2. Diagnostico general del Municipio.

2.4.2.1 Clima

Precipitación

Registra un promedio anual de 1.061,4 mm. Perteneciendo a la provincia de humedad húmedo, entre los 1.900 y 2.200 m.s.n.m. con variaciones de acuerdo con las condiciones locales. En general, se presentan dos periodos

²³ ALCALDÍA DE MACHETA CUNDINAMARCA. Plan de contingencia contra incendios. Machetá. 2018. p 4.

lluviosos entre Abril a Junio y de Septiembre a Noviembre y dos periodos secos en los meses restantes. El número de días al año con precipitaciones es de 214

Temperatura

Se registra una temperatura media aproximada entre los 8 y 23°C, debido a las diferentes altitudes de la zona, encontrándose microclimas en pequeños lugares incrustados en la alta montaña que impiden el paso directo de los vientos, con régimen climático único, isotérmico.²⁴

Vientos

La zona se encuentra bajo una influencia de los vientos procedentes de los Llanos Orientales, los cuales contribuyen a la formación de microclimas especialmente en las partes montañosas. La velocidad del viento tomada en la granja experimental del municipio a los 1800 m.s.n.m. es de 2 m/s. (INAT 1993). Presenta vientos frío procedentes de las Represas Chivor, Guavio y Sisga, afectando las condiciones agroclimáticas de la zona, afectando de cierta forma la cultura agrícola.

Las características climáticas de la zona corresponden a la franja ecuatorial de la tierra, donde los ecosistemas son muy dinámicos, o sea que continuamente están tomando y suministrando energía y elementos al medio circundante, lo cual explica su fácil deterioro como también su recuperación cuando son manejados adecuadamente. Del Territorio 168 km² son de clima frío, equivalente al 74%, páramo 40 km², equivalente al 18% y clima medio 16 km², son el 8% restante. (IGAC 1973).

2.4.3. Hidrología

Una de las principales características del municipio a nivel regional es que prácticamente se convierte en divisoria de aguas ya que permite hacia el costado oriental llevar los cauces que llevan las aguas al embalse de la esmeralda, hacia el costado occidental llevar las aguas al río Bogotá y por el costado sur las aguas que llevan al embalse del Guavio.

Como principal cuenca hidrográfica dentro del municipio se encuentra la Cuenca del río Mchetá, que presenta una extensión de 39028.82 ha., la longitud de su cauce principal es de 37.5 km, y tiene su nacimiento en el Alto

²⁴ ALCALDÍA DE MACHETA CUNDINAMARCA. Plan de contingencia contra incendios. Mchetá. 2018. p 12.

de Pan de Azúcar a los 3450 m.s.n.m. dentro de la vereda de

Casadillas Alto. El río Machetá y sus afluentes muestran un historial de torrencialidad abundante, con formación de terrazas y barras cuaternarias formadas posiblemente en el glacial Tardío, cuando las condiciones climáticas fueron muy húmedas.

Por otro lado, se encuentra el Río Guatanfur, el cual es considerado en algunos estudios como subcuenca del Río Machetá, este río presenta un fuerte control estructural orientado paralelamente a los bancos gruesos de areniscas. La subcuenca del río Guatanfur representa uno de los cauces importantes desde el punto de vista del aporte al embalse de Chivor, no posee flujos de tierra y escombros que aporte sedimentos al embalse, pero presenta depósitos torrenciales importantes que conforman varios niveles de terrazas.²⁵

Las microcuencas que integran la subcuenca del río Guatanfur se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4 Red hídrica y microcuencas hidrográficas de la cuenta del río Guatanfur

MICROCUCNCA	ÁREA (ha)	LONG RIO PPAL (km)	LONG RED (km)
Q. Las Juntas	2.540,45	9,13	52,25
Q. Los Arrayanes	1.279,76	,463	26,50
Q. El Chirme	926,82	6,50	27,50
Q. EL Guamo	706,98	5,63	19,75
Q. El Molino	5.926,67	13,75	135,25
Q. Don Alonso	2.160,00	9,75	74,00
Q. Agua Blanca	1.850,49	8,00	69,00
Q. Tocola	7.707,00	17,50	123,00
Q. Carbonera	610,47	4,50	9,87
Q. Esmeralda	798,06	5,75	11,00
Q. Negrecia	871,19	5,38	22,25
Q. Corralillos	1.091,96	5,50	8,50
Q. Solana	790,11	7,00	20,75
Q. Laguna	807,60	10,00	21,75
Q. Las Lajas	1.508,37	6,63	39,00
TOTAL	32.999,75	127,25	725,37

²⁵ ALCALDÍA DE MACHETA CUNDINAMARCA. Plan de contingencia contra incendios. Machetá. 2018. p

Fuente: Esquema de Ordenamiento Territorial 2000 - 2010: Aspectos físico espaciales. Machetá, Cundinamarca

2.5. ESTADO DEL ARTE

Durante los últimos años los programas informáticos para la modelación en la ingeniería han jugado un papel muy importante, pues es mediante estos que se pueden predecir de manera ágil práctica y segura las respuestas que se podrían dar a un evento específico, siendo así las cosas, se relacionaron algunos proyectos cuyo objeto tanto en su categoría o variable, guarda relación con el objeto general de esta investigación. A continuación, se relacionan los aspectos más relevantes de algunas consultas realizadas en bases de datos investigativas.

Una de las investigaciones consultadas corresponde a un proyecto realizado para el municipio de Tarqui Huila, el cual se denominó **“Comprobación en campo, de una modelación asistida por computador para una red hidráulica, caso distrito de riego El Vergel, Mpio Tarqui, Dpto Huila-Colombia”**²⁶ donde el objeto se enfocó en Determinar el nivel de confianza mediante la diferencia entre la modelación hidráulica de construcción realizada con EPANET y los datos obtenidos mediante la comprobación en campo, para el desarrollo de este se usaron algunos mecanismos de recolección de información tales como planos hidráulicos de diseño y topografía del área de influencia, así como la calibración en campo de los valores obtenidos teóricamente para realizar el respectivo contraste, donde se obtuvo como resultado un nivel de confiabilidad superior al 95 % el cual se debe a la exactitud en datos de entrada tales como topografía y demandas, que a su vez son un indicador de la efectividad de las modelaciones computacionales de este tipo de sistemas.

Para el municipio de Madrid Cundinamarca se encuentra un proyecto de modelación, denominado **“Diagnóstico del estado actual y proyectado a un periodo de diseño para la red de acueducto de la zona urbana del municipio de Madrid Cundinamarca”**²⁷ en la cual su objeto estuvo enfocado a Evaluar el comportamiento actual de la red de distribución urbano del municipio de Madrid Cundinamarca y plantear un diagnóstico de la red proyectado a un periodo de diseño teniendo en cuenta la normatividad vigente. Los mecanismos de recolección de información se basaron en la Información suministrada por la empresa de acueducto, alcantarillado y aseo del municipio de Madrid Cundinamarca. Los resultados obtenidos fueron los siguientes, que, al realizar la obtención de los resultados emitidos por el software se encontró que el 96.133% del total de los nodos cumple con el rango de presiones establecido por la normatividad vigente para la fecha de la realización del estudio, adicional a esto se encuentran que el

²⁶ PERDOMO, Álvaro y GUTIÉRREZ, Oscar. Comprobación en campo, de una modelación asistida por computador para una red hidráulica, caso distrito de riego El Vergel, Mpio Tarqui, Dpto Huila-Colombia. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. 2015

²⁷ MARTÍNEZ, Andrés y MUÑOS, Diego. Diagnóstico del estado actual y proyectado a un periodo de diseño para la red de acueducto de la zona urbana del municipio de Madrid Cundinamarca. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

97.8 de los tramos de tuberías no cumplen con la velocidad mínima de 1.8 m/s establecida por el RAS 2000.

En medio de la investigación se encuentra una nueva modelación hidráulica, está realizada para el municipio de La Palma Cundinamarca, denominado **“Propuesta de mejoramiento para la óptima operación del sistema de acueducto del municipio de la Palma Cundinamarca. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. 2018”**²⁸ en este proyecto, el objetivo estuvo enfocado en realizar una propuesta de optimización para la operación del sistema de acueducto del municipio de La Palma Cundinamarca, los instrumentos de recolección de información se basaron en recolección de información en visitas de campo y análisis poblacional, así como la información suministrada por la oficina de planeación. Las conclusiones y resultados obtenidos mediante esta fueron que la cantidad de agua que impulsa las bombas no es suficiente para mantener la demanda que exige la población, lo que se asocia con fugas y conexiones ilegales (IANC)

Finalmente se consulta la investigación relacionada con la **“Modelación y evaluación hidráulica del alcantarillado del municipio de Chocontá Cundinamarca, mediante el uso del software EPA SWMM”**²⁹ cuyo objetivo corresponde a “Modelar y evaluar hidráulicamente el alcantarillado existente del municipio de Chocontá Cundinamarca. Mediante el uso del software EPA SWMM” para esta investigación se usaron instrumentos de recolección de información mediante visitas y trabajo de campo, para obtener así la calibración de los elementos existentes, de igual manera se trabajó mediante la obtención de información de bases de datos de la oficina del IDEAM, secretaria de planeación y obras públicas encontrándose como resultado mayormente significativo, que Las redes no se encuentran en un estado óptimo; los diámetros actuales no tienen la capacidad para suplir las necesidades del municipio.

A partir de lo anterior se ratifica la importancia y eficacia de la aplicación de los sistemas computacionales para la modelación de sistemas de distribución de agua potable para la solución de problemáticas que son numéricamente complejas de predecir, y a su vez brindan una perspectiva gráfica del comportamiento de estas para de esta manera brindar soluciones que sean eficaces para la solución de la problemática particular.

²⁸ PANTOJA, Juan y GUERRÓN, Jorge. Propuesta de mejoramiento para la óptima operación del sistema de acueducto del municipio de la Palma Cundinamarca. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. 2018

²⁹ RODRÍGUEZ, Masiel y RODRÍGUEZ, Jhon. Modelación y evaluación hidráulica del alcantarillado del municipio de Chocontá Cundinamarca, mediante el uso del software EPA SWMM. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. 2014.

3. METODOLOGÍA

3.1. FASES DEL TRABAJO DE GRADO

Diagnóstico y evaluación del sistema existente: se debe evaluar el sistema existente objeto del proyecto, buscando obtener información sobre su funcionamiento general, la capacidad máxima real, la condición tecnológica, la eficiencia y los criterios operacionales con el fin de hacer un diagnóstico sobre la posibilidad de mejorar los niveles de eficiencia del sistema; según la resolución 0330 de 2017 mediante la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS, en el capítulo 1 planeación de proyectos de infraestructura establece en el artículo 7, las etapas de planeación de proyectos de acueducto y alcantarillado algunos lineamientos base para realizar un diagnóstico a infraestructuras existentes, los cuales son los siguientes.

Fase 1. Recolección y análisis de información, se deberá recoger información de estudios existentes, registros de operación y mantenimiento reportes de construcción, registro de caudales, información sobre corrosión, información topográfica e hidrológica, etc. Una vez analizada la información, se define la inspección preliminar.

Se deberán documentar las actividades de diagnóstico de campo que incluyan la medición de variables, independientes o simultaneas, (según tipo de infraestructura a evaluar) en diferentes puntos de operación y comparada con lo que será su “estado inicial” para así evaluar la disminución de capacidad.

Se deben identificar las zonas críticas que pueden requerir la rehabilitación.³⁰

Para definir programas de rehabilitación de la infraestructura y equipos se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

Las causales frecuentes de reparación determinadas por señales tales como: quejas de los clientes, fugas y o daños en sistemas de acueducto problemas de infiltración y exfiltración en los sistemas de alcantarillado, fallas recurrentes en los vehículos de recolección de residuos afloramiento y o fugas de lixiviados en los rellenos sanitarios, alertas en los sistemas de monitoreo y seguimiento etc.

La toma de decisiones sobre la expansión y ampliación de capacidad de los sistemas que llevan a una rehabilitación proactiva.

La incidencia de factores externos que afecten la estrategia de rehabilitación, por ejemplo, por decisiones del agente regulador o los ministerios relacionados.³¹

³⁰ COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 0330 (8, junio,2017). Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS. Bogotá, D.C., 2017. P.5.

³¹ COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 0330 (8, junio,2017). Por

En este caso se procede a hacer un análisis tomando como punto de partida el tanque de almacenamiento, que se encuentra localizado a aproximadamente 150 metros del casco urbano, lo cual quiere decir que de ese punto hacia la aducción no será tema de estudio en el presente proyecto. Se procede a recolectar la información de la red en general, tal como son diámetros, longitudes y accesorios localizados a lo largo de la red, para Hirrel en su investigación plantea que, se deben separar los datos de entrada en dos categorías. Por una parte están los datos que describen la red de manera tangible, por consiguiente dentro del conjunto se puede encontrar la descripción de tubería, válvulas, tanques, características de bombas y demás elementos asociados, una característica importante para crear una buena categorización, es que sus condiciones no cambian en periodos cortos de tiempo como un día, por otra parte se encuentran los datos cuyas condiciones varían en intervalos de tiempo más cortos como por ejemplo un día, tales como demanda de agua, estado de bombas y válvulas de control entre otros³².

Fase 2. Análisis de los sistemas. Esta fase considera la calibración del sistema, la cual para Saldarriaga,³³ es el ajuste de un conjunto de variables, a través de la cual se busca que el modelo reproduzca de forma correcta las lecturas de campo con la que se procede a correr el modelo, según Rogers, es de gran importancia realizar un modelo preciso cuando de diseñar o ampliar una red de abastecimiento se trata, pues es de esta manera que se logra obtener unos resultados precisos, y afirma que un modelo no calibrado puede ser peor que no tener un modelo inicial³⁴. Es por esta razón que se evidencia la importancia de realizar una recolección de información, que genere altos niveles de confiabilidad de la nueva información a generar.

Centros de investigación a nivel nacional han desarrollado diferentes metodologías basadas en la inteligencia artificial que permiten la obtención de resultados óptimos en sistemas con múltiples soluciones posibles como lo es el caso de calibración de redes de distribución de agua potable; se muestran a continuación algunos de los métodos consultados así como una relación

la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS. Bogotá, D.C., 2017. P.7.

³² HIRREL, Timothy. How not to calibrate a hydraulic network model. (base de datos en línea). United States. American Water Works Association. 2008, p 2. . [consultado: 2 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://search-proquest-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/docview/221587456/abstract/F1618208A8364790PQ/1?accountid=45660>

³³ SALDARRIAGA, Juan. Metodología de calibración de redes de distribución de agua potable. En: XVIII SEMINARIO DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA, SOCIEDAD COLOMBIANA DE INGENIEROS. Bogotá, 2008 [consultado: 22 de Enero de 2020]. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/48829940/10-Metodologia-Calibracion-Redes-Distribucion-Agua-Potable>

³⁴ ROGERS, Dm. Network analysis models - the secret for success. [base de datos en línea]. United Kingdom. IWA Publishing. 2005, p 2. [consultado: 03 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://search-proquestcom.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/central/docview/1943129662/abstract/991D6CD133F4CCAPQ/1?accountid=45660>

con sus principales características.

Tabla 5 Métodos de Calibración de modelos.

Metodología	Descripción	Datos entrada	Datos salida
Redes Neuronales	Esta metodología es usada para calcular rugosidades a partir de datos de presión y caudal. Las cuales después de un entrenamiento se genera una fórmula para cada una de las variables de salida, esta fórmula esta predefinida y genera una serie de coeficientes que definen la fórmula para aproximarse al valor buscado.	Presiones y caudales que están normalizados en un rango de 0 a 1	Rugosidades que están normalizadas en un rango de 0 a 1
Lógica Difusa	Esta metodología es usada para la calibración de redes de acueducto, donde lo que busca es controlar las variables a partir de cada conjunto de ellas, por lo que pueden ser topológicas como hidráulicas, no obstante es muy difícil que esta metodología realice una calibración definitiva dadas las condiciones hidráulicas, esto teniendo en cuenta que la calibración manual no se hace de esta manera.	variables hidráulicas o topológicas	variables hidráulicas o topológicas
Algoritmos Genéticos	Cada individuo es un modelo hidráulico diferente, cuyo genotipo lo conforman todas las variables de la red y el fenotipo lo conforman las curvas de presión y caudal obtenidos al realizar el cálculo hidráulico en periodo extendido, todos los modelos hidráulicos producidos durante la ejecución del algoritmo genético tendrán la misma topología y los mismos valores para todas sus variables de entrada al cálculo hidráulico, excepto para aquella variable que se esté calibrando ³⁵	Presión y/o caudal	Presión y/o caudal
CIACUA	Esta metodología cuenta con tres fases principales, el modelo inicial, que es donde se asignan pérdidas por válvulas y uniones, así como la asignación de diámetros reales, una segunda fase donde se hace el análisis de demandas desconocidas y análisis por emisores (criterios hidráulicos y socioeconómicos, y pérdidas) y una tercera fase donde se tienen el análisis por pérdidas menores, análisis por rugosidades y el análisis por diámetros. Obteniéndose así el modelo unificado ³⁶	Presión y caudal (Modelo Inicial)	Diámetros y rugosidad

Fuente: Autores

Los algoritmos genéticos son una invención de Jhon Holland en la década de 1960 y han sido estudiados a través de los años creando enfoques más utilizados para la evolución computacional³⁷, dando diversas aplicaciones para la solución de cómo

³⁵ SALAS, Daniel. Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Bogotá, Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. 2003.

³⁶ SALDARRIAGA, op. cit. p.07

³⁷ MELANIE. M, Handbook of Genetic Algorithms, Van Nostrand Reinhold, New York . (1991). [en línea]. Bogotá:consultado:22 de Enero de 2020]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/82599838.pdf>

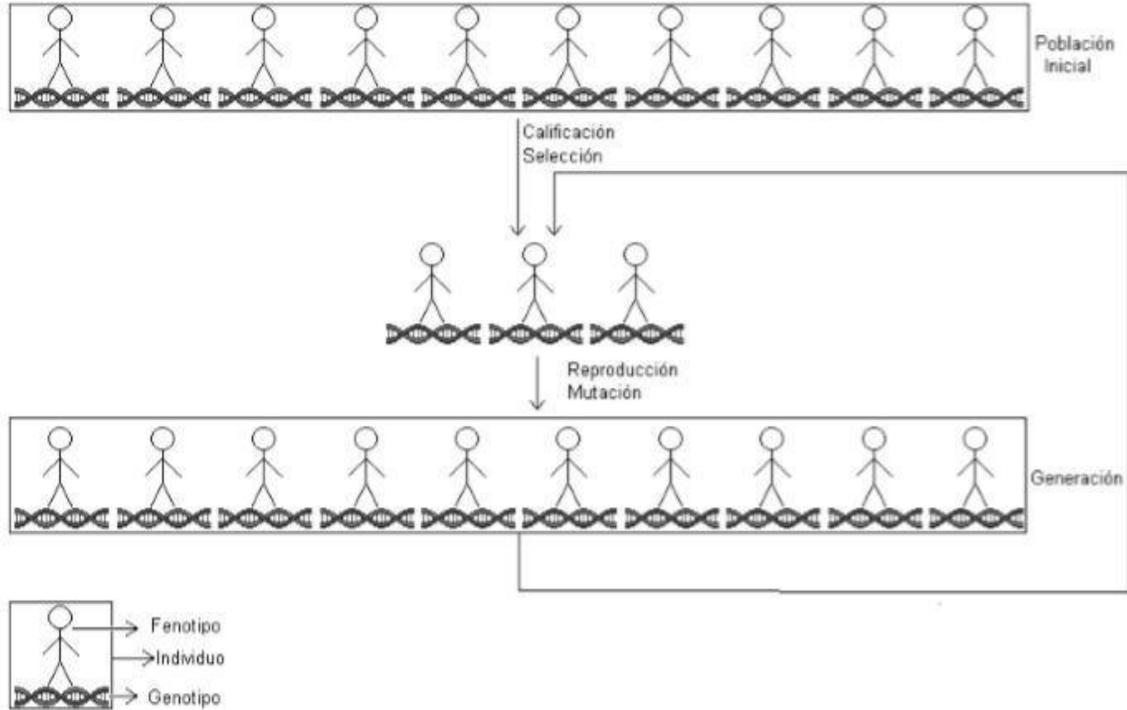
se pueden realizar modelaciones científicas de procesos evolutivos.

En el manual de algoritmos genéticos de Michelle se plantean tres aspectos esenciales para la aplicación de esta metodología, dentro de las que se encuentran inicialmente, representar soluciones candidatas asignando valores reales a estas; posteriormente se recomienda hibridar, es decir combinar características útiles del algoritmo actual con el algoritmo genético hasta que no se encuentren mejoras o ajustes a los datos, lo cual está muy relacionado con la aplicación de métodos numéricos e iteraciones para la solución de sistemas de ecuaciones complejas de tal manera que se generen múltiples soluciones y sea escogida la mejor, mediante una comparación de adaptabilidad, por último, con estos datos obtenidos se generan nuevos cruces con datos de otras variables de manera que se genera una tendencia a aumentar o disminuir aleatoriamente pesos particulares.

Los algoritmos genéticos, permiten tener una mayor eficiencia y ahorrar tiempo, tomando características topológicas de la red existente y determinar los cambios necesarios en rugosidades y demandas para de llegar a un valor objetivo, como lo son el comportamiento de energía y masas de la red de distribución;

El primer paso consiste en realizar un análisis de sensibilidad de las variables de calibración, como lo son las demandas, rugosidades, diámetros, etc. seguido el segundo paso el cual consiste en tomar el conjunto de generaciones con mejor adaptabilidad y generar un modelo calibrado final, lo cual demuestra ser una metodología que brinda buenos resultados que se verán reflejados en el modelo calibrado de la red.

Figura 7 Diagrama del funcionamiento de la aplicación del algoritmo genético



Fuente: VEGA, C, Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable con Métodos de Inteligencia Artificial. Bogotá (2007) [en línea]. Consultado: 24 de Enero de 2020. Disponible en:
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9718/u296088.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Una definición más aplicada a redes de distribución de agua potable la que asigna Vega³⁸ el cual define los algoritmos genéticos como un campo de la inteligencia artificial que abstrae las ideas de la evolución natural y la genética de los seres vivos para hacer búsquedas optimizadas en problemas donde el conjunto de posibles soluciones es extenso; es de esta manera que se realiza la aplicación a redes de distribución de agua potable, donde se tiene cierta información recolectada en campo y asignada a la topología de la red, para la que se requiere realizar su respectiva calibración, donde se pretende a partir de las variables de calibración y los datos recolectados en campo, minimizar el error con el fin de acercarse al máximo al modelo real.

Para la calibración del sistema de acueducto del Municipio de Mchetá, se realiza con el uso del software Watercad, el cual, mediante una herramienta integrada,

³⁸ VEGA, C, Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable con Métodos de Inteligencia Artificial. Bogotá Universidad De Los Andes (2007) P17. [en línea]. Consultado: 24 de Enero de 2020. Disponible en:
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9718/u296088.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

denominada Darwin Calibrator, se genera una calibración dadas las condiciones de entrada de la red, tales como topología, (diámetros, longitudes materiales) elevaciones, demandas, presiones y caudales. Por último se presentan múltiples candidatos de calibración para poder encontrar la mejor solución o la solución con mayor adaptabilidad posible para el sistema dado.

Darwin Calibrator permite al usuario calibrar un modelo de forma manual, o con algoritmos genéticos eficientes, de una manera más automatizada³⁹ lo cual trae grandes ventajas respecto al rendimiento en cuestión de tiempo, así como precisión y exactitud en los mismos. Esta herramienta permite encontrar valores óptimos para los parámetros que se desea calibrar, en este caso se debe hacer un ajuste a presiones y caudales dadas las condiciones topológicas y datos de campo levantados previamente, de igual manera es posible calibrar rugosidad de la tubería, válvulas y su parcialidad de funcionamiento buscando que los resultados del modelo tengan coincidencia con los valores reales medidos en el sistema.

El primer paso para lograr los objetivos propuestos consistió en realizar la solicitud de información topológica en la secretaría de servicios públicos del municipio, así como demás datos relevantes del funcionamiento de la red, entre los que se encuentran registros de caudal para periodos de veinticuatro horas y para un tiempo de sesenta días.

Posterior a esto se realiza una visita al municipio y con previa solicitud ante la oficina de servicios públicos se tiene acceso al tanque de almacenamiento, donde se toman medidas de las dimensiones, altura de la lámina de agua entre otros aspectos importantes, de igual manera se identifican los puntos de medición para la posterior toma de datos en campo correspondientes a presión y caudal, con el fin de realizar la calibración del modelo inicial.

En una segunda visita y con previa aprobación de la oficina así como el acompañamiento del fontanero, se realiza la toma de datos de presión en cuatro (4) puntos de muestreo distribuidos en el área de influencia del sistema, de igual manera se tomaron datos de caudal en el medidor que se encuentra ubicado en la red.

³⁹ DRINGOLI, Gesse. Usando el Calibrador Darwin. [en línea].[consultado:25 de Enero de 2020]. Disponible en: https://communities.bentley.com/products/hydraulics_hydrology/w/hydraulics_and_hydrology_wiki/40028/water-model-calibration-tips

Figura 8 puntos de Muestreo



Fuente: Los autores.

3.1.1. Escenarios de modelación.

La obtención de un buen resultado comprende el análisis de diferentes comportamientos que podría tener la red en las condiciones más críticas a que podría exponerse la misma.

Por esta razón se plantean diferentes escenarios donde a partir de los resultados de estos, se procederá a hacer el análisis respectivo que lleve a la elección de la mejor solución.

Escenario 1:

En este escenario se hace la simulación del sistema existente, en el cual se incluye toda la información topológica de la red y se asignan los diferentes materiales y elementos que conforman la red de distribución, este corresponde a un modelo en periodo extendido.

Escenario 2

En este escenario se realiza la calibración del modelo inicial y se analizan las condiciones reales en las que se está comportando la red, para posteriormente hacer los ajustes pertinentes con el fin de corregir las anomalías evidenciadas.

Escenario de optimización 1.

Este escenario contempla la ampliación de la red acorde a los usos de suelo, áreas para las cuales se calcularon las demandas que se deben garantizar en estos sectores, de igual manera se contempla mantener la red existente al máximo, generando la menor cantidad de cambios posibles y garantizando los parámetros de operación establecidos por la normatividad.

Escenario de optimización 2

En este escenario, el cual contempla áreas de expansión relacionadas en el escenario de optimización 1, se adiciona el cumplimiento a la norma en cuanto a diámetros mínimos, dado que esta solicita diámetro mínimo de 75 mm en áreas urbanas y 50 mm en áreas rurales, en la que un diagnóstico previo, implica que la posible elección de esta solución implica elevados costos que están relacionados con el retiro e instalación de nueva tubería en gran parte de la red.

3.2. INSTRUMENTOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS

Tabla 6 Instrumentos y Herramientas Utilizadas

INSTRUMENTO	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
MANÓMETRO	Instrumento de medición que permite evaluar la presión de la red en algún punto determinado.	
GPS	Instrumento denominado como sistema de posicionamiento global, que permite la localización de un elemento con una coordenada puntual sobre la superficie de la tierra.	
DECÁMETRO, FLEXÓMETRO	Instrumentos de medición para determinar unidades de longitud.	
CALIBRADOR VERNIER	Instrumentos de medición para determinar diámetros con alta precisión	

3.3. ALCANCES Y LIMITACIONES

Partiendo de los objetivos que conforman el presente proyecto, se determina el alcance establecido con el fin de obtener un resultado satisfactorio.

Se plantea realizar una calibración al modelo del sistema de distribución de agua potable, y a partir de los resultados obtenidos, ofrecer una alternativa de tal manera que se dé cumplimiento a la normatividad vigente respecto a los intervalos de presiones y velocidades exigidos.

Según el censo del DANE para el año 2005 y sus proyecciones, se muestra una disminución de la población urbana, contrario a lo que se evidencia visualmente, donde el municipio ha tenido una expansión significativa de su área urbana, evidenciada en la construcción de nuevas unidades de vivienda, parcelación y subdivisión de predios, se ha planteado calcular el consumo de agua mediante polígonos de demanda, ya que brindaran un valor más aproximado de la demanda de agua, y que se clasificaran respecto a la densidad poblacional establecida en el esquema de ordenamiento territorial.

En el desarrollo final del proyecto se obtiene un documento en el que se consigne el estado actual de la red, de igual manera se anexan reportes de watercad correspondientes a de nodos, tuberías y válvulas; el catastro de la red de los escenarios de optimización en formato dwg. Dentro de los resultados obtenidos no se incluyen ítems tales como cantidades de obra y presupuestos para la ejecución de los resultados obtenidos. Teniendo en cuenta que se debe realizar ampliación de algunas redes, se asumen los permisos de servidumbre en caso de llegar a ser necesarios, dado que algunos predios corresponden a áreas suburbanas y no se encuentran urbanizadas en su totalidad, no obstante, se plantean lineamientos de manera que se faciliten posibles ramificaciones futuras con el fin de brindar una cobertura total del servicio.

4. PRODUCTOS A ENTREGAR

Planos en formato dwg de las dos alternativas de optimización propuestas, donde se evidencie la longitud, diámetros y materiales de las tuberías modeladas en cada una de estas, así como la ubicación de los demás elementos que componen la red.

Reportes de los nodos, tuberías y válvulas, generados por el software Watercad donde se evidencia los parámetros hidráulicos de funcionamiento.

5. RESULTADOS ESPERADOS E IMPACTOS

La proyección que se tiene para el momento final de la etapa investigativa del proyecto es que se pueda de manera clara y concisa una vez identificadas, especificar las falencias que se encuentran en el sistema, y de igual manera plantear la alternativa de solución, la cual se desconoce hasta el momento en que se desarrolle la modelación de las alternativas optimización.

Una vez se culmine la etapa investigativa, los parámetros de diseño podrán estar disponibles para que desde la administración municipal y mediante la respectiva disponibilidad presupuestal se considere la posibilidad de realizar proyectos de inversión en los que se inicie el mejoramiento y ampliación de la red de acueducto, que a su vez tiene un alto impacto social ya que brinda la posibilidad de acceder a un servicio óptimo respecto a cobertura y continuidad a una importante población Cundinamarqués.

6. CATASTRO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL MUNICIPIO DE MACHETA

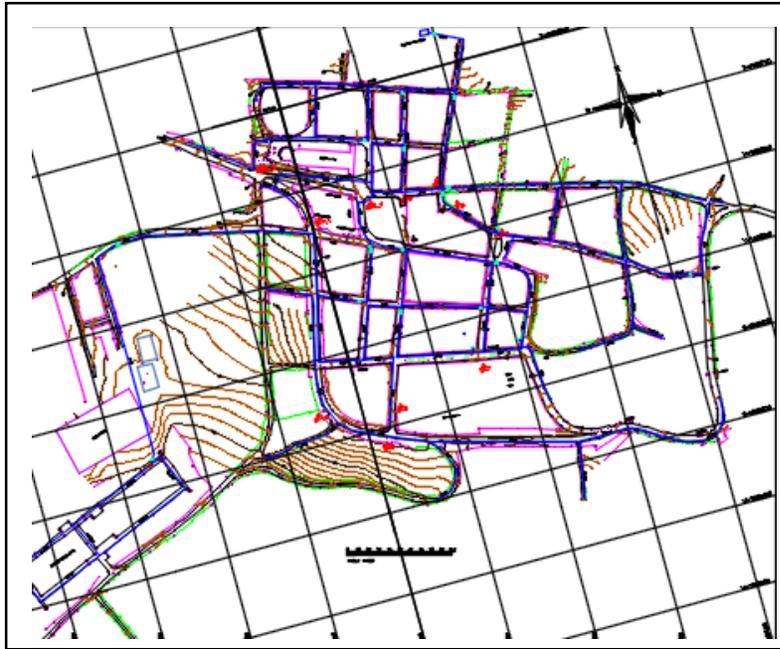
El catastro de la red fue suministrado en formato dwg por la oficina de servicios públicos del municipio de Machetá, donde se pueden observar los diámetros de las tuberías, el tipo de material, la ubicación de válvulas, hidrantes y el tanque de almacenamiento, de igual manera se actualizó el catastro de la red con ayuda de un fontanero funcionario de la oficina de servicios públicos, quien nos indicó cambios realizados en la red debido a reparaciones, construcción de nuevos trazados y cambio de materiales.

Figura 9 Actualización de datos de la red.



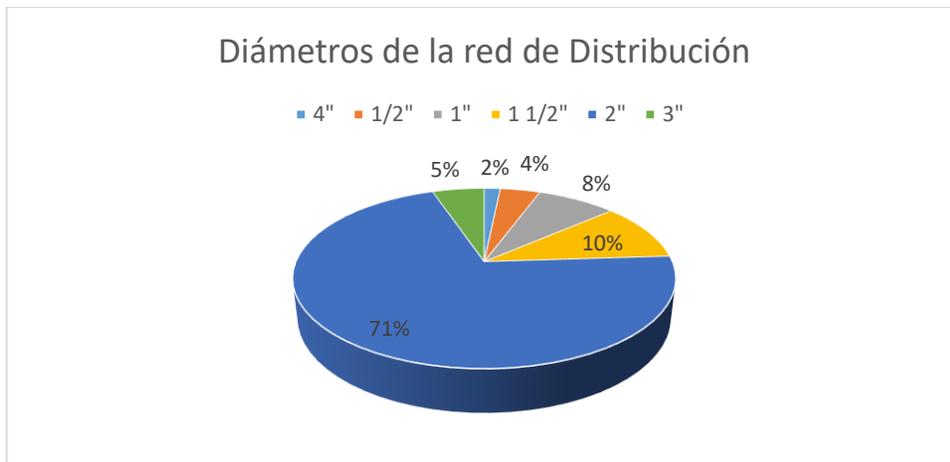
Fuente: Autores.

Figura 10 Plano catastral de tuberías



Fuente: Autores

Figura 11 Clasificación de tubería por diámetros en la red de distribución.



Fuente : Autores

La red de distribución está compuesta en un 98% por tubería en PVC, el 2% restante se encuentra instalada en la salida del tanque de almacenamiento en asbesto cemento, la red principal tiene un diámetro de 4" con una longitud de 110 metros ubicada en la carrera 6 entre la calle 8 y calle 9.

La figura 11 permite evidenciar el porcentaje de cómo está constituida la red de distribución según el diámetro, la mayoría de la red se encuentra en tubería de 2" con 71% seguido de tubería de 1 ½" con un 10%.

7. METODOLOGÍA DE MODELACIÓN Y OPTIMIZACIÓN HIDRÁULICA DE LA RED DE ACUEDUCTO URBANO.

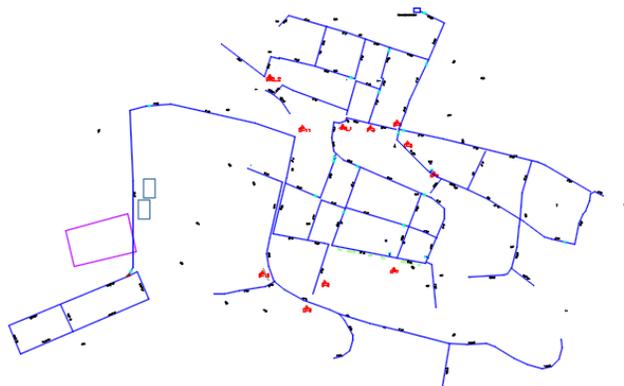
Para el proceso de modelación y posterior optimización del sistema de acueducto se empleó el software de análisis y modelación watercad, desarrollado por la compañía Bentley, por su ambiente multi plataforma y fácil interfaz, el cual con sus herramientas de construcción de modelos permite hacer una integración con software de dibujo tal como AutoCAD en formato dxf y software de sistemas de información geográfica específicamente QGIS.

7.1. DEPURACIÓN DE LA INFORMACIÓN EN AUTOCAD

La fase de depuración inicia con el catastro de la red del acueducto en formato dwg, donde se evidencia los diámetros, las longitudes y ubicación de válvulas en el sistema de distribución, para fácil exportación de dichos elementos en el software watercad fue necesario agrupar las tuberías y elementos tipo punto como válvulas e hidrantes en layers diferentes, así como, descomponer las polilíneas en líneas y eliminar capas que no son relevantes en la modelación, seguidamente de lo anterior se exporta en formato de interoperabilidad dxf formato compatible con el software Watercad.

Figura 12 Caracterización de los elementos de la red

]]Superior]]Estructura alámbrica 2D]

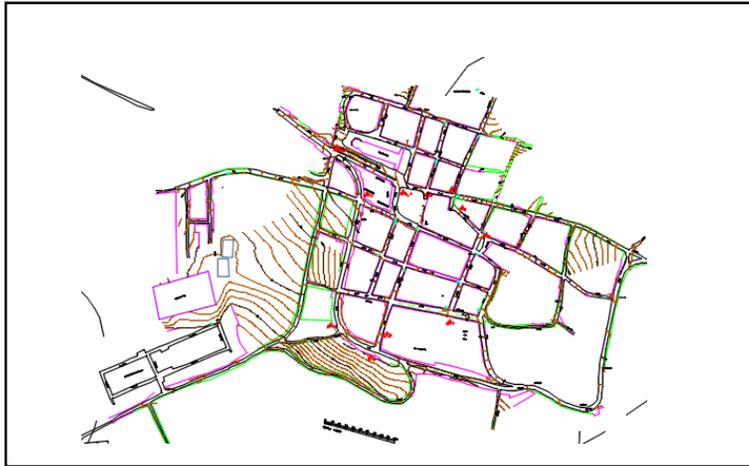


Y

Fuente: Autores.

De la misma manera se realizó una depuración del plano de las curvas de nivel correspondientes a las cotas rasantes del municipio para subsiguientemente determinar la elevación de cada uno de los nodos de la red.

Figura 13 Curvas de Nivel casco Urbano Macheta

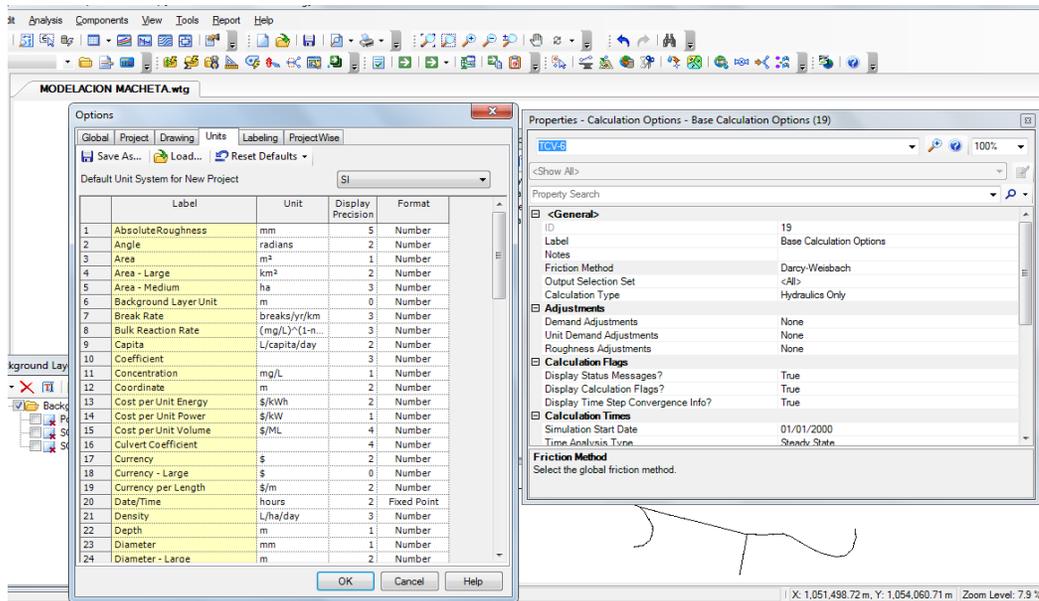


Fuente: Autores

7.2. DESARROLLO DEL MODELO DIGITAL

Para iniciar la modelación digital en el software Watercad se inicia con la configuración del sistema de unidades a utilizar, para la presente modelación se configura con el sistema internacional de unidades, en cuanto a las opciones de cálculo se utiliza la ecuación de Darcy – Weisbach.

Figura 14 Ventanas de Configuración unidades y opciones de calculo



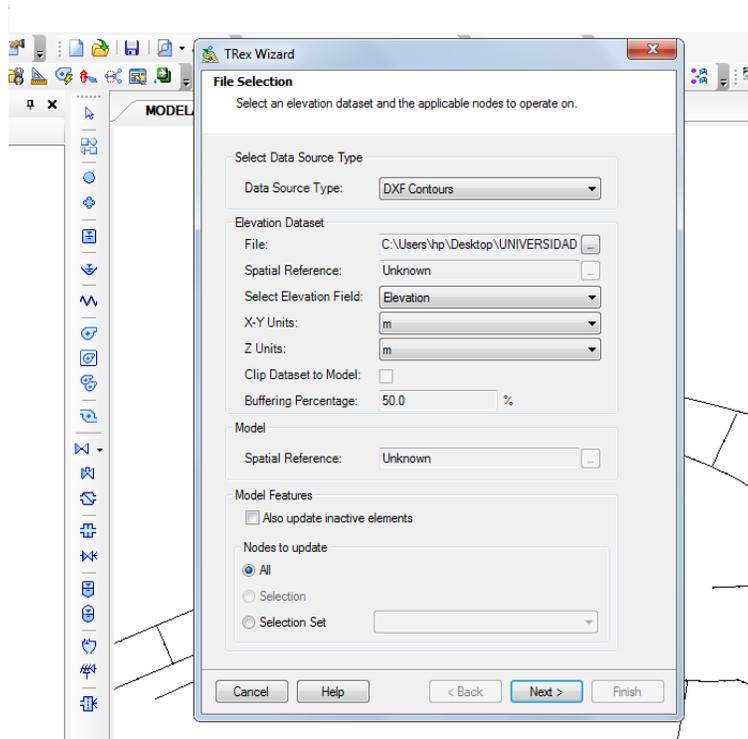
Fuente: Los autores

La exportación del catastro de la red en el software watercad se realiza con la herramienta model builder, con el archivo dxf previamente depurado, esta herramienta permite generar toda la red identificando los elementos tipo líneas como tuberías y elementos tipo punto como válvulas, de igual modo, genera automáticamente los nodos, para garantizar la exactitud es importante manejar la misma unidad de coordenadas.

Una vez exportada la red en el software Watercad, de forma manual se realiza corrección de errores encontrados por la validación del programa, tales como, elementos no conectados, nodos no construidos o sobrantes, tubería desalineadas entre otros.

Así mismo para determinar las cotas de cada uno de los elementos de la red, con el archivo depurado de las curvas de nivel se realiza una asignación automática de elevaciones con la asistencia de la herramienta T-rex, se ajusta el tipo de archivo en dxf contours, unidades y las propiedades a importar en este caso la elevación (ver figura 15).

Figura 15 Configuración Comando Trex.



Fuente: Autores.

7.2.1. Asignación de las demandas iniciales de los nodos

Para realizar la distribución de las demandas en la red, se efectúa con el método de las áreas aferentes, para esto se utiliza la herramienta de software Watercad llamado Thiessen Polygon Generator, el cual con un archivo de contorno que comprende el área urbana del municipio de Macheta y la ubicación de cada nodo genera un archivo con los polígonos de Thiessen en formato shp, para facilitar la visualización y procesamiento de los atributos de cada polígono se importa dicha capa en el software de sistema de información geográfico de código abierto llamado Q GIS.

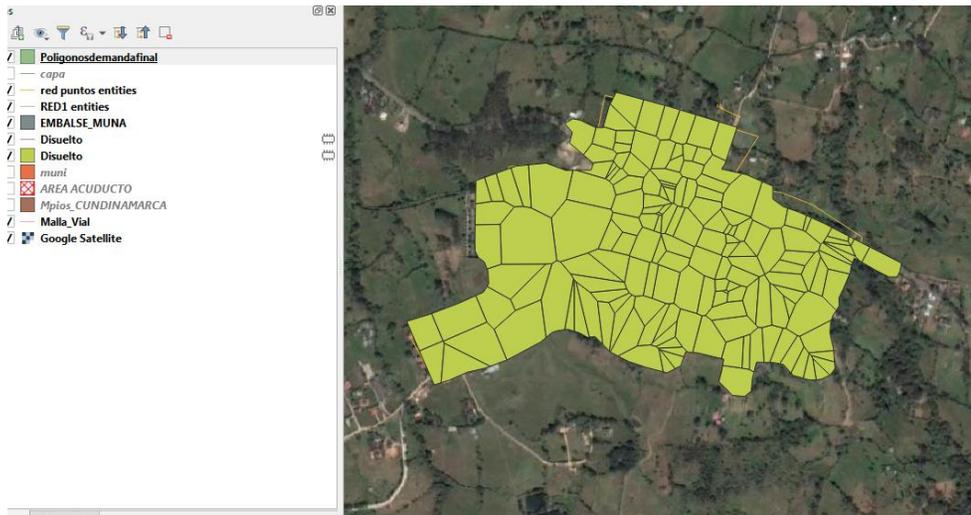
En la tabla Número 7 se puede evidenciar el área aferente correspondiente a cada nodo y el área total del sistema de acueducto de la zona urbana de 363026.451 m².

Tabla 7 Áreas Aferentes a cada nodo

ELEMENTO ID	AREA (M2)						
65	1098.32958	156	870.870488	252	2892.14051	477	1346.82453
66	403.124123	158	918.50108	254	3591.09313	491	50.526231
68	2976.8478	159	734.369818	256	3051.01576	496	2006.38683
69	2083.44974	161	3757.92303	259	2296.70153	501	852.269753
71	4240.71431	163	5674.70697	260	3540.7638	506	2963.63678
73	1047.78281	165	925.565436	262	1119.95916	508	4158.94257
74	696.051719	168	1878.91424	265	871.106113	509	7426.88253
76	895.581136	169	1234.76519	266	1491.76655	512	1390.85999
77	639.738098	171	2255.03939	268	7938.73927	514	1478.10264
79	213.617019	173	1632.07798	273	1916.91209	517	4542.79477
81	356.084632	175	1086.83378	278	6084.63632	519	3328.50094
83	4498.40491	176	2072.87135	280	3254.64758	528	1998.2284
85	899.375066	178	811.48456	285	800.947981	532	1229.73404
86	1113.89289	179	2433.27817	286	2180.57413	541	669.196137
89	537.842741	182	656.351595	289	6263.57119	TOTAL	363026.451
90	2632.36477	184	760.719987	290	6695.3927		
92	151.037393	185	1754.7206	292	3619.65998		
93	519.488461	188	2586.38526	293	2945.7158		
101	1445.42253	190	1534.86933	295	8439.44364		
104	1477.75223	191	242.245931	297	3500.0801		
105	218.096325	193	324.763344	298	4024.01494		
107	308.95804	196	565.055191	300	3278.78524		
108	1570.09762	197	1095.91579	304	1429.33557		
110	699.574574	199	2567.08996	307	12061.4686		
111	678.200582	200	1592.20516	308	1779.26157		
113	52.1148029	202	2553.08392	310	3325.7535		
114	1026.43317	203	1453.16581	312	3173.33477		
116	525.148401	205	1205.47744	313	1621.97263		
117	139.121086	207	2323.83065	316	2839.31511		
119	258.196911	209	2040.54377	319	3132.23722		
121	1561.1123	210	2958.54799	321	2068.2156		
122	1475.25145	212	3194.68319	322	3119.32821		
127	1384.16337	213	1068.59613	325	2484.9467		
128	215.429936	215	1819.84591	326	611.035445		
130	675.348752	217	1312.69944	328	4676.78145		
132	1144.99465	219	1807.72384	331	3259.31177		
134	1721.67937	221	3375.99537	334	5973.97324		
135	1722.36031	223	1809.82008	337	1072.84512		
137	1699.76438	226	3887.16344	338	3628.4816		
138	1096.82247	228	2672.85515	341	1263.49537		
140	310.552789	229	2456.44045	342	5124.55845		
141	1732.93061	232	656.256296	345	2233.01651		
143	1085.54229	236	1121.33997	349	2472.13529		
145	718.059124	237	407.486968	351	3067.44624		
146	3228.69556	239	2146.67314	353	696.042449		
148	746.996374	241	2372.59642	355	2977.04831		
149	3156.69366	243	2445.47566	362	3462.15085		
151	2232.63981	244	3385.37226	364	2431.3072		
152	2086.12817	246	2493.96628	366	12601.1729		
154	1821.76014	248	1891.75018	369	1151.24337		

Fuente: Autores

Figura 16 Polígonos de Thiessen



Fuente: Autores

El caudal inicial para determinar las demandas de cada nodo se determinó con ayuda del registro de lecturas del macromedidor ubicado a la salida del tanque de almacenamiento, estas lecturas fueron suministradas por la oficina de servicios públicos del municipio de Macheta, y corresponden al periodo comprendido entre el 1 de Enero del 2020 y el 29 de febrero 2020; obteniendo así un caudal promedio a la salida del tanque y reflejar el comportamiento de consumo promedio real del municipio.

Como se puede ver en la tabla 8 el caudal promedio diario durante los dos meses de lecturas corresponde a 5.96 l/s, este caudal inicial se asignó en las áreas aferentes previamente calculadas con la ayuda del software Q GIS, mediante la edición de los atributos de la capa de polígonos de Thiessen, con el fin de crear un nuevo campo llamado demandas y asignar con la calculadora de campos, la siguiente expresión:

$$Demanda\ nodo = \frac{Area\ Poligono}{Area\ TOTAL} * Caudal\ medio\ diario$$

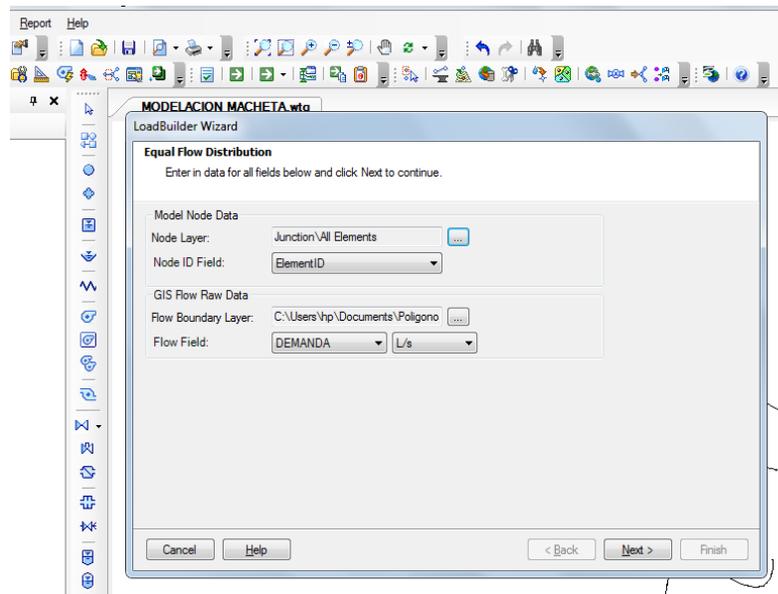
Tabla 8 Caudal Promedio a la Salida del tanque.

fecha	Hora	Lectura Macro Medidor	Consumo (m3)	Tiempo (hr)	Caudal Promedio Diario(l/s)
01/01/2020	09:30 a. m.	6120	-		
02/01/2020	07:50 a. m.	6612	492	22.33	6.1194030
03/01/2020	06:45 a. m.	7140	528	22.92	6.4000000
04/01/2020	07:00 a. m.	7664	524	24.25	6.0022910
05/01/2020	08:30 a. m.	8210	546	25.50	5.9477124
06/01/2020	07:56 a. m.	8870	660	23.43	7.8236131
07/01/2020	08:20 a. m.	9297	427	24.40	4.8611111
08/01/2020	08:05 a. m.	9923	626	23.75	7.3216374
09/01/2020	07:30 a. m.	10323	400	23.42	4.7449585
10/01/2020	06:45 a. m.	10816	493	23.25	5.8900836
11/01/2020	09:30 a. m.	11020	204	26.75	2.1183801
12/01/2020	06:30 a. m.	11590	570	21.00	7.5396825
13/01/2020	07:22 a. m.	12395	805	24.87	8.9924039
14/01/2020	07:45 a. m.	12995	600	24.38	6.8352700
15/01/2020	08:10 a. m.	13436	441	24.42	5.0170648
16/01/2020	08:00 a. m.	13912	476	23.83	5.5477855
17/01/2020	08:35 a. m.	14434	522	24.58	5.8983051
18/01/2020	07:50 a. m.	14990	556	23.25	6.6427718
19/01/2020	08:35 a. m.	15430	440	24.75	4.9382716
20/01/2020	08:05 a. m.	15970	540	23.50	6.3829787
21/01/2020	08:10 a. m.	16354	384	24.08	4.4290657
22/01/2020	07:45 a. m.	16837	483	23.58	5.6890459
23/01/2020	09:30 a. m.	17287	450	25.75	4.8543689
24/01/2020	08:20 a. m.	17782	495	22.83	6.0218978
25/01/2020	06:30 a. m.	18360	578	22.17	7.2431078
26/01/2020	07:50 a. m.	18790	430	25.33	4.7149123
27/01/2020	08:00 a. m.	19172	382	24.17	4.3908046
28/01/2020	07:50 a. m.	19667	495	23.83	5.7692308
29/01/2020	06:30 a. m.	20158	491	22.67	6.0171569
30/01/2020	07:35 a. m.	20622	464	25.08	5.1384275
31/01/2020	08:30 a. m.	21175	553	24.92	6.1649944
01/02/2020	06:45 a. m.	21625	450	22.25	5.6179775
02/02/2020	07:50 a. m.	22095	470	25.08	5.2048726
03/02/2020	08:10 a. m.	22496	401	24.33	4.5776256
04/02/2020	07:45 a. m.	22980	484	23.58	5.7008245
05/02/2020	07:50 a. m.	23468	488	24.08	5.6286044
06/02/2020	09:00 a. m.	23910	442	25.17	4.8785872
07/02/2020	08:40 a. m.	24390	480	23.67	5.6338028
08/02/2020	06:45 a. m.	24865	475	22.08	5.9748428
09/02/2020	07:10 a. m.	25240	375	24.42	4.2662116
10/02/2020	07:25 a. m.	25786	546	24.25	6.2542955
11/02/2020	08:30 a. m.	26020	234	25.08	2.5913621
12/02/2020	08:10 a. m.	26492	472	23.67	5.5399061
13/02/2020	07:45 a. m.	26940	448	23.58	5.2767962
14/02/2020	07:40 a. m.	27421	481	23.92	5.5865273
15/02/2020	06:50 a. m.	27984	563	23.17	6.7505995
16/02/2020	09:45 a. m.	28399	415	26.92	4.2827657
17/02/2020	08:30 a. m.	29860	1461	22.75	17.8388278
18/02/2020	09:50 a. m.	31049	1189	25.33	13.0372807
19/02/2020	07:55 a. m.	31507	458	22.08	5.7610063
20/02/2020	08:00 a. m.	32003	496	24.08	5.7208766
21/02/2020	07:10 a. m.	32590	587	23.17	7.0383693
22/02/2020	08:25 a. m.	32980	390	25.25	4.2904290
23/02/2020	06:30 a. m.	33582	602	22.08	7.5723270
24/02/2020	07:15 a. m.	33985	403	24.75	4.5230079
25/02/2020	08:30 a. m.	34457	472	25.25	5.1925193
26/02/2020	08:00 a. m.	34896	439	23.50	5.1891253
27/02/2020	08:10 a. m.	35344	448	24.17	5.1494253
28/02/2020	07:10 a. m.	35810	466	23.00	5.6280193
29/02/2020	08:10 a. m.	36321	511	25.00	5.6777778
		CAUDAL PROMEDIO TOTAL			5.9634124

Fuente: Autores

Finalmente, para establecer las demandas automáticamente en el modelo de cada nodo, se utiliza la herramienta del Watercad Load Builder, la cual permite importar propiedades de la capa polígonos de Thiessen, que se desarrolló en software de sistemas de información geográfica Qgis, escoger el campo con la expresión de cálculo de la demanda y seleccionar los elementos que deseamos asignar es decir los nodos.

Figura 17 Herramienta Load Builder



Fuente: Autores

7.2.2. Patrón de consumo

El patrón de consumo o curva de modulación de la demanda se elaboró con los registros de macro medición a la salida del tanque de almacenamiento durante un periodo de 24 horas, esta información fue recopilada con la ayuda de un funcionario de la oficina de servicios públicos quien apoyo con el registro, la medición se realizó cada hora el día 14 de marzo de 2020, permitiendo así modelar con las variaciones de consumo a lo largo del día, y evidenciar los picos de consumo, a continuación se ilustran el tanque de almacenamiento y el macromedidor donde se toman los datos, así como se muestran los caudales registrados y la curva de modulación.

*Figura 18 Tanque de Almacenamiento y
Macromedidor*

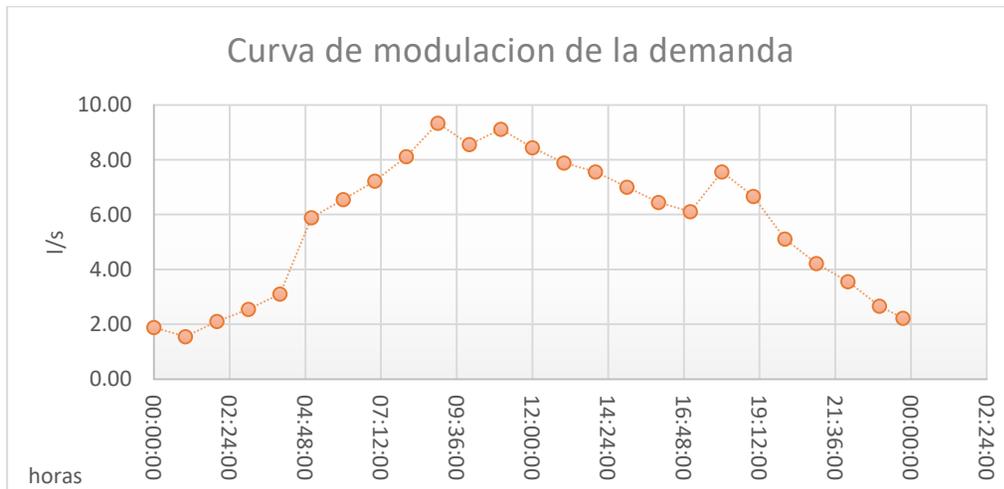


Fuente: Autores

Tabla 9 Caudales Horarios y Variación Horaria.

fecha	Hora	Q = l/s	Promedio	Variacion Hr
14/03/2020	12:00:00 a. m.	1.89	5.96	0.32
14/03/2020	01:00:00 a. m.	1.56	5.96	0.26
14/03/2020	02:00:00 a. m.	2.11	5.96	0.35
14/03/2020	03:00:00 a. m.	2.56	5.96	0.43
14/03/2020	04:00:00 a. m.	3.11	5.96	0.52
14/03/2020	05:00:00 a. m.	5.89	5.96	0.99
14/03/2020	06:00:00 a. m.	6.56	5.96	1.10
14/03/2020	07:00:00 a. m.	7.22	5.96	1.21
14/03/2020	08:00:00 a. m.	8.11	5.96	1.36
14/03/2020	09:00:00 a. m.	9.33	5.96	1.57
14/03/2020	10:00:00 a. m.	8.56	5.96	1.44
14/03/2020	11:00:00 a. m.	9.11	5.96	1.53
14/03/2020	12:00:00 p. m.	8.44	5.96	1.42
14/03/2020	01:00:00 p. m.	7.89	5.96	1.32
14/03/2020	02:00:00 p. m.	7.56	5.96	1.27
14/03/2020	03:00:00 p. m.	7.00	5.96	1.17
14/03/2020	04:00:00 p. m.	6.44	5.96	1.08
14/03/2020	05:00:00 p. m.	6.11	5.96	1.03
14/03/2020	06:00:00 p. m.	7.56	5.96	1.27
14/03/2020	07:00:00 p. m.	6.67	5.96	1.12
14/03/2020	08:00:00 p. m.	5.11	5.96	0.86
14/03/2020	09:00:00 p. m.	4.22	5.96	0.71
14/03/2020	10:00:00 p. m.	3.56	5.96	0.60
14/03/2020	11:00:00 p. m.	2.67	5.96	0.45
14/03/2020	11:45:00 p. m.	2.22	5.96	0.37

Figura 19 Curva de modulación de la demanda

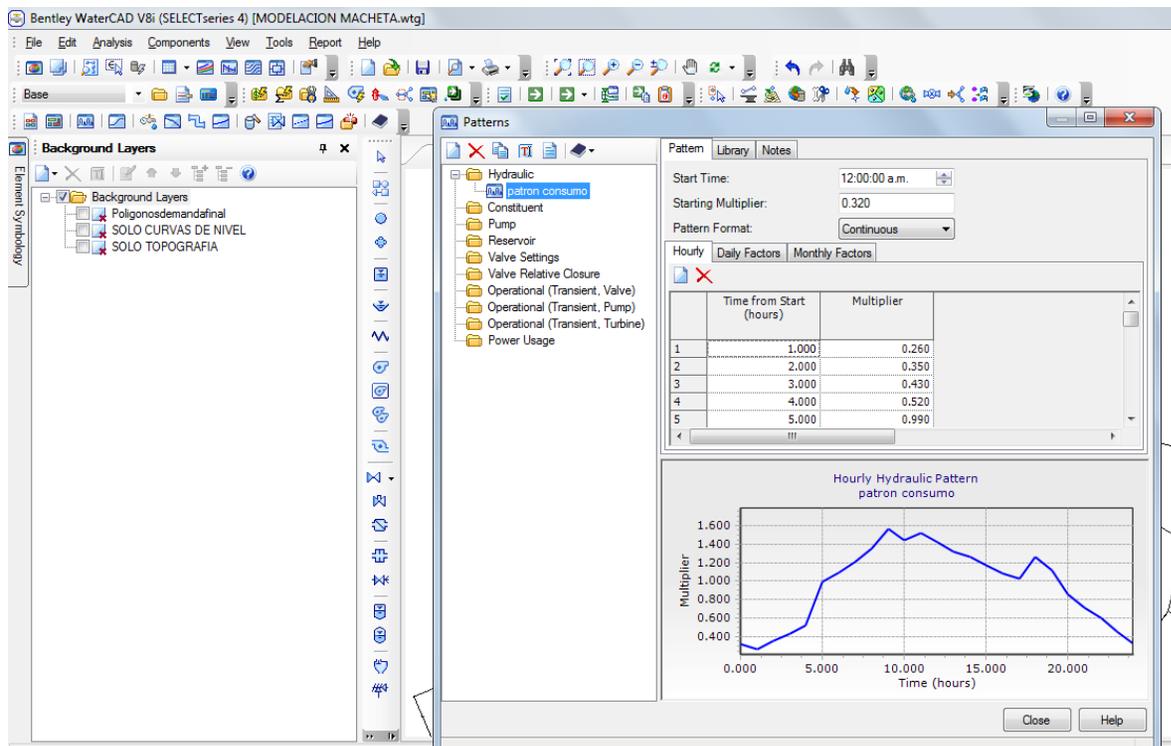


Fuente: Autores.

Para realizar una modelación en un periodo extendido en el software watercad es necesario determinar un patrón de la demanda, es decir calcular un factor multiplicador que modifique los caudales a lo largo del tiempo en proporción a la demanda real, que se consume en las mismas horas del día, para determinar la magnitud de dichas modificaciones se emplea la relación de los caudales horarios registrados en campo en el día de estudio, y el caudal promedio obtenido de los registros diarios durante los dos meses.(ver tabla 8).

Las variaciones horarias calculadas, se ingresan al modelo con la opción del software Watercad llamada Patterns, donde se configura la hora de inicio de modelación y el tipo de patrón hidráulico a emplear, la presente investigación es de formato continuo y horario.

Figura 20 Configuración Patrones de demanda horaria.



Fuente: Autores

8. CALIBRACIÓN DEL MODELO DIGITAL

La calibración del modelo digital se soporta en la inteligencia artificial, como lo son los algoritmos genéticos, los cuales permiten tener una mayor eficiencia y ahorrar tiempo, tomando características topológicas de la red existente y determinar los cambios necesarios en rugosidades y demandas para llegar a un valor objetivo, como lo son el comportamiento de energía y masas de la red de distribución.

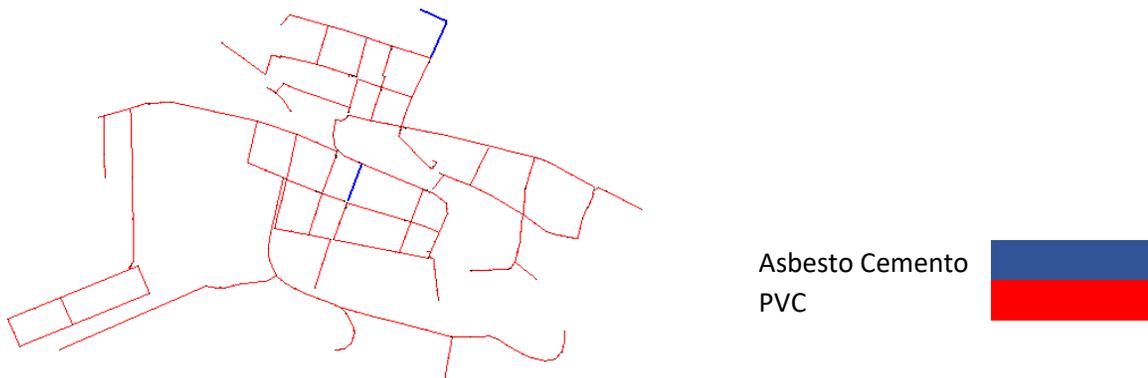
El primer paso consiste en realizar un análisis de sensibilidad de las variables calibración, como lo son las demandas, rugosidades, diámetros, etc. seguido del segundo paso el cual consiste en tomar el conjunto de generaciones con mejor adaptabilidad y generar un modelo calibrado final.

La Herramienta utilizada para realizar la calibración es el Darwin Calibrator, el cual es un software que se basa en los algoritmos genéticos permitiendo presentar múltiples candidatos de calibración para poder encontrar la mejor solución posible para un sistema dado.

8.1. CONFIGURACIÓN DEL ESTUDIO DE CALIBRACIÓN.

La configuración del estudio de la calibración en el Darwin Calibrator, inicia creando grupos de ajuste basados en los atributos en común, grupos de rugosidades basados en el tipo de material (PVC y Asbesto Cemento) y grupos de Demandas (uso Comercial y uso residencial).

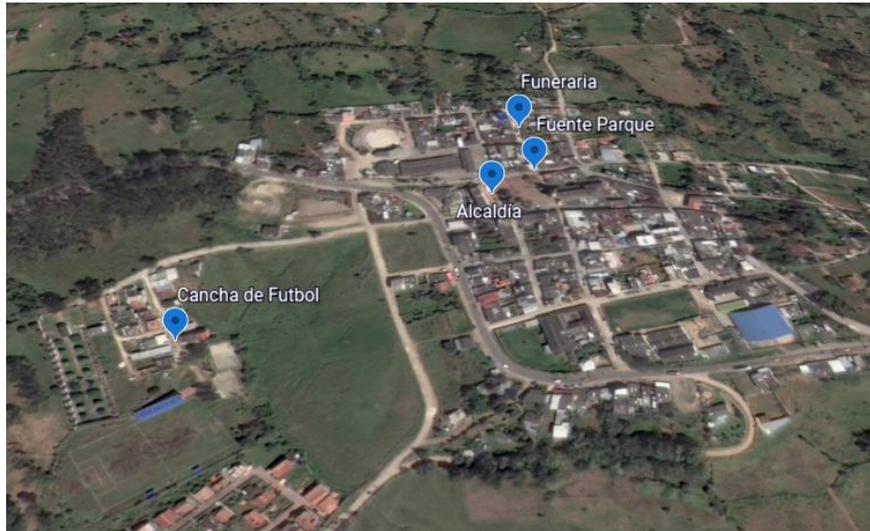
Figura 21 Grupo de Rugosidades



Fuente: Autores

De igual modo se configura las instantáneas de los datos de campo, que corresponden a los periodos de mediciones registrados a lo largo del día, los lugares escogidos corresponden a los habilitados por la oficina de servicios públicos del municipio, donde realizan el monitoreo de la red. En total se tomaron mediciones en cuatro lugares, llamados: Cancha de Fútbol, funeraria, fuente parque y alcaldía (ver tabla 10).

Figura 22 Puntos de Muestreo



Fuente: Los autores

Figura 23 toma de datos de presión en los puntos de muestreo



Fuente: Los autores

Tabla 10 Valores de presiones medidas en puntos de Muestreo.

Alcaldía		Fuente Parque	
Hora	Psi	Hora	Psi
07:09:00 a. m.	37	07:08:00 a. m.	32
09:04:00 a. m.	33	09:01:00 a. m.	28
10:08:00 a. m.	34	10:06:00 a. m.	29
01:12:00 p. m.	38	01:10:00 p. m.	34
02:08:00 p. m.	40	02:05:00 p. m.	35
04:07:00 p. m.	41	04:03:00 p. m.	37
05:08:00 p. m.	40	05:05:00 p. m.	35
07:11:00 p. m.	44	07:12:00 p. m.	38
08:13:00 p. m.	47	08:15:00 p. m.	41
09:06:00 p. m.	52	09:05:00 p. m.	47
Funeraria		Cancha de Futbol	
Hora	Psi	Hora	Psi
07:10:00 a. m.	26	07:05:00 a. m.	86
09:06:00 a. m.	23	09:12:00 a. m.	74
11:12:00 a. m.	24	11:30:00 a. m.	84
01:02:00 p. m.	26	01:07:00 p. m.	82
02:10:00 p. m.	27	02:35:00 p. m.	79
04:12:00 p. m.	29	04:09:00 p. m.	88
05:16:00 p. m.	27	05:10:00 p. m.	86
07:02:00 p. m.	28	07:01:00 p. m.	90
08:08:00 p. m.	30	08:02:00 p. m.	95
09:07:00 p. m.	32	09:11:00 p. m.	98

Para asignar a la herramienta de calibración Darwin Calibrator, todas las lecturas de los datos de campo se ingresan cada uno de ellos en la opción Observed Target, donde se selecciona el periodo de tiempo, o instantánea de medición para posteriormente asignar cada valor al nodo correspondiente de la red.

Figura 24 Ingreso de Datos Observados

Darwin Calibrator (MODELACION MACHETA Calibracion 2 -05-20.wtg)

Field Data Snapshots | Roughness Groups | Demand Groups | Status Elements | Calibration Criteria | Notes

sensibilidad Demandas

Label	Date	Time	Time From Start (hours)	Override Scenario Demand Alternative?	Demand Alter
1 Lectura 7 am	01/01/2000	07:00:00 a.m.	7,000	<input type="checkbox"/>	Base Demand
2 Lectura 9 am	01/01/2000	09:00:00 a.m.	9,000	<input type="checkbox"/>	Base Demand
3 Lectura 10 am	01/01/2000	10:00:00 a.m.	10,000	<input type="checkbox"/>	Base Demand
4 Lectura 11 am	01/01/2000	01:00:00 p.m.	13,000	<input type="checkbox"/>	Base Demand
5 Lectura 2 pm	01/01/2000	02:00:00 p.m.	14,000	<input type="checkbox"/>	Base Demand
6 lectura 4 pm	01/01/2000	04:00:00 p.m.	16,000	<input type="checkbox"/>	Base Demand
7 lectura 5 pm	01/01/2000	05:00:00 p.m.	17,000	<input type="checkbox"/>	Base Demand
8 Lectura 7 pm	01/01/2000	07:00:00 p.m.	19,000	<input type="checkbox"/>	Base Demand
9 Lectura 8 pm	01/01/2000	08:00:00 p.m.	20,000	<input type="checkbox"/>	Base Demand
10 Lectura 9 pm	01/01/2000	09:00:00 p.m.	21,000	<input type="checkbox"/>	Base Demand

Field Data Set	Element	Attribute	Value
2 Lectura 9 am	J-155	Pressure (psi)	74,000
3 Lectura 10 am	J-155	Pressure (psi)	84,000
4 Lectura 11 am	J-155	Pressure (psi)	82,000
5 Lectura 2 pm	J-155	Pressure (psi)	79,000
6 lectura 4 pm	J-155	Pressure (psi)	88,000
7 lectura 5 pm	J-155	Pressure (psi)	86,000
8 Lectura 7 pm	J-155	Pressure (psi)	90,000
9 Lectura 8 pm	J-155	Pressure (psi)	95,000

Fuente: Autores

8.2. ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD POR DEMANDAS.

El primer análisis de sensibilidad se realiza a la variable demandas, mediante los grupos creados según el consumo de agua, en el municipio se identificó una zona comercial, ubicada en la carrera Decima, vía principal que conduce a la ciudad de Bogotá, donde se encuentran ubicados diferentes restaurantes, negocios comerciales y una estación de servicio donde existe un lavadero de autos; el otro grupo de consumo se reduce a un uso residencial.

Figura 25 Grupos de Demandas



Uso Comercial
 Uso Residencial

Fuente: Autores

Con la agrupación de los nodos de la red, en los distintos tipos de uso del suelo, y los datos de campo, como variable objetivo, se corre el programa creando nuevas generaciones de individuos, debido a alto consumo computacional se determina solo analizar 8 posibles soluciones, calculadas mediante los algoritmos genéticos y para el análisis de comportamiento y cálculos de error graficar dos de ellas,

escogiendo la solución que tiene un factor de ajuste a la demanda en concordancia con la actividad económica identificada, es decir, coeficientes multiplicadores de ajuste, mayores en el uso comercial.

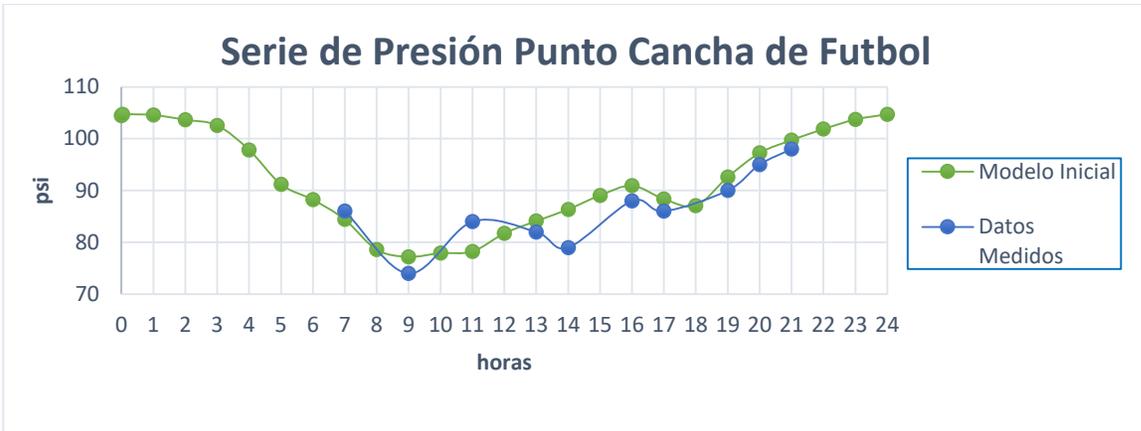
El Darwin Calibrator proyecta las mejores posibles soluciones, y como variable de selección de alternativas permite analizar un valor llamado "fitness" que corresponde a la correlación de los datos medidos con los calculados, aunque el menor valor no significa que sea la solución ideal, por lo que requiere un análisis de selección, las soluciones más acordes escogidas son la solución 1 y la solución 5, por su correlación con los factores de ajuste a la demanda, generando nuevos escenarios para ser analizados.

Tabla 11 Correlación de Datos

Solución	Fitness
Solución 1	159.276
Solución 2	159.705
Solución 3	160.642
Solución 4	161.427
Solución 5	163.03
Solución 6	168.297
Solución 7	176.03
Solución 8	187.636

Las Gráficas de las curvas de presión de los diferentes modelos o individuos generados, permiten analizar cuál es su adaptabilidad al comportamiento real de la red, el modelo inicial en los cuatro puntos de medición permite observar un comportamiento similar a lo largo de los periodos de tiempo medidos, no obstante, se puede mejorar los resultados mediante la calibración.

Figura 26 Modelo inicial - Datos Medidos Cancha de Futbol



Fuente: Autores

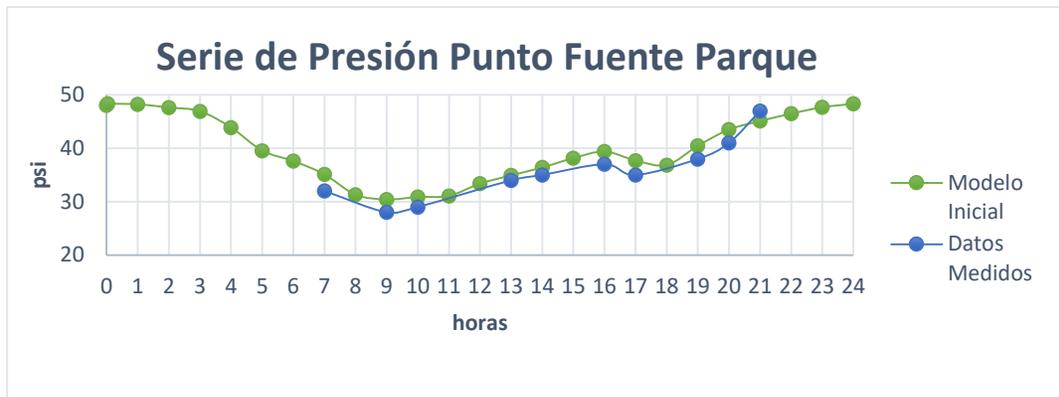
Figura 27 Modelo inicial - Datos Medidos Alcaldía



Figura 28 Modelo inicial - Datos Medidos Funeraria



Figura 29 Modelo inicial - Datos Medidos Fuente Parque



Fuente: Autores

De igual modo se grafica las series de presión de los datos medidos y los individuos generados, es decir la solución 1 y la solución 5, permitiéndose apreciar que existe una correlación mejor frente al modelo inicial, con el objetivo de identificar cuál de las soluciones tiene un grado de adaptabilidad se halla el error de del modelo mediante las siguientes expresiones:

Error de la serie:

$$E_{serie} = \frac{\sum_{i=1}^{NP} Abs(\frac{x_{medidos} - x_{calculados}}{x_{medidos}})}{NP}$$

Error Modelo:

$$E_{modelo} = \frac{\sum_{i=1}^{NS} E_{serie}}{NPNS}$$

Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 12 Adaptabilidad de los modelos

Individuo	Serie	Error serie
Modelo Inicial	Cancha de Futbol	0.038014047
Modelo Inicial	Funeraria	0.08292023
Modelo Inicial	Fuente Parque	0.062398175
Modelo Inicial	Alcaldía	0.070005545
Error Modelo Inicial		0.063334499
Solución 1	Cancha de Futbol	0.027623747
Solución 1	Funeraria	0.057568468
Solución 1	Fuente Parque	0.028749666
Solución 1	Alcaldía	0.030795541
Error Modelo S1		0.036184356
Solución 5	Cancha de Futbol	0.031183713
Solución 5	Funeraria	0.067846623
Solución 5	Fuente Parque	0.037444472
Solución 5	Alcaldía	0.046220969
Error Modelo S5		0.045673944

Fuente: Autores

En cuanto menor sea el error de cada modelo generado, mayor adaptabilidad tendrá el individuo generado, en la tabla 12 se concluye que la mejor opción es el modelo llamado solución 1, como también se puede apreciar en las gráficas de las series de presión.

Figura 30 Modelos Solución 1 y Solución 5 - Datos Medidos Cancha de Futbol.

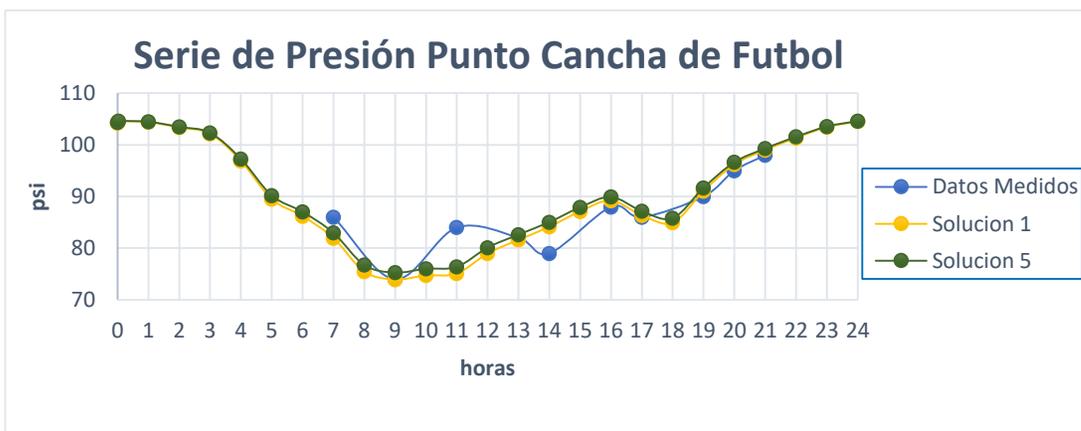


Figura 31 Modelos Solución 1 y Solución 5 - Datos Medidos Funeraria

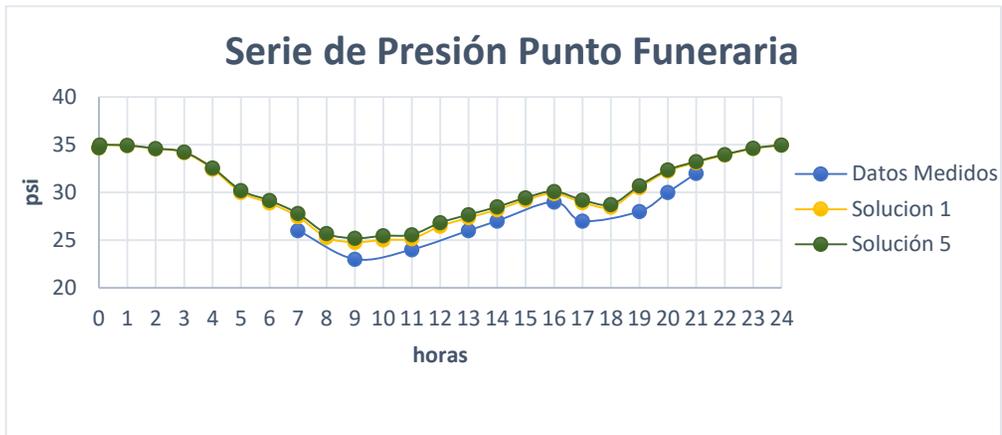


Figura 32 Modelos Solución 1 y Solución 5 - Datos Medidos Fuente Parque.



Fuente: Autores.

Figura 33 Modelos Solución 1 y Solución 5 - Datos Medidos Alcaldía.



Fuente: Autores

8.3. ANÁLISIS DE LA SENSIBILIDAD POR RUGOSIDAD

Continuando con la metodología de calibración mediante algoritmos genéticos, se realiza el mismo procedimiento anterior realizado con el genotipo demandas, ahora con variaciones en la rugosidad de la tubería y observar su comportamiento. Se generan los nuevos modelos con variación en la rugosidad del material, con la herramienta Darwin Calibrator construyendo 8 nuevos modelos, con diferentes rugosidades en base a los grupos anteriormente construidos, PVC y asbesto cemento, es importante analizar los valores porque el software determina la posible solución, pero no analiza si los resultados son coherentes, es decir descartar valores de rugosidad improbables.

De los 8 modelos construidos se analizan dos de ellos la solución llamada R1 Y Solución R4 los cuales tiene cambios de rugosidad entre 0.001mm y 0.003mm; mediante la ecuación de adaptabilidad encontrando los siguientes resultados

Tabla 13 Adaptabilidad de los Modelos generados por Rugosidad

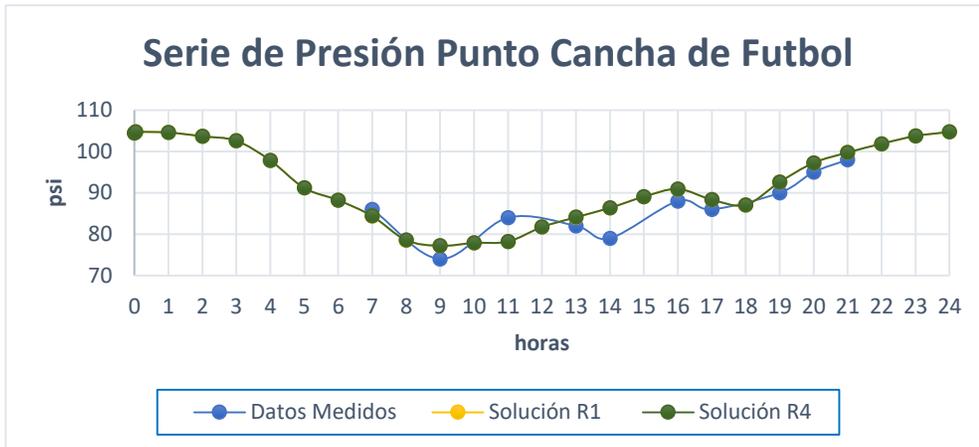
Individuo	Serie	Error serie
Modelo Inicial	Cancha de Futbol	0.038014047
Modelo Inicial	Funeraria	0.08292023
Modelo Inicial	Fuente Parque	0.062398175
Modelo Inicial	Alcaldía	0.070005545
Error Modelo Inicial		0.063334499
Solución R1	Cancha de Futbol	0.037860763
Solución R1	Funeraria	0.082585012
Solución R1	Fuente Parque	0.061741443
Solución R1	Alcaldía	0.069413606
Error Modelo R1		0.062900206
Solución R4	Cancha de Futbol	0.037918622
Solución R4	Funeraria	0.082691491
Solución R4	Fuente Parque	0.061992134
Solución R4	Alcaldía	0.069639894
Error Modelo R4		0.063060535

Fuente: Autores

Los resultados de la tabla 13 revelan que la rugosidad no es una variable sensible de calibración para el modelo, puesto que la diferencia entre el error del modelo inicial y los calibrados no son significantes, caso contrario a la variable demandas donde los modelos generados tienen una mayor adaptabilidad al tener un valor de

error menor (ver tabla 12). La graficas del comportamiento de presiones los modelos calibrados por rugosidad corroboran de igual modo lo anteriormente mencionado, donde los valores son tan similares que prácticamente las series se sobreponen.

Figura 34 Modelos Solución R1 y Solución R4 - Datos Medidos Cancha de Futbol



Fuente: Autores

Figura 35 Modelos Solución R1 y Solución R4 - Datos Medidos Funeraria.

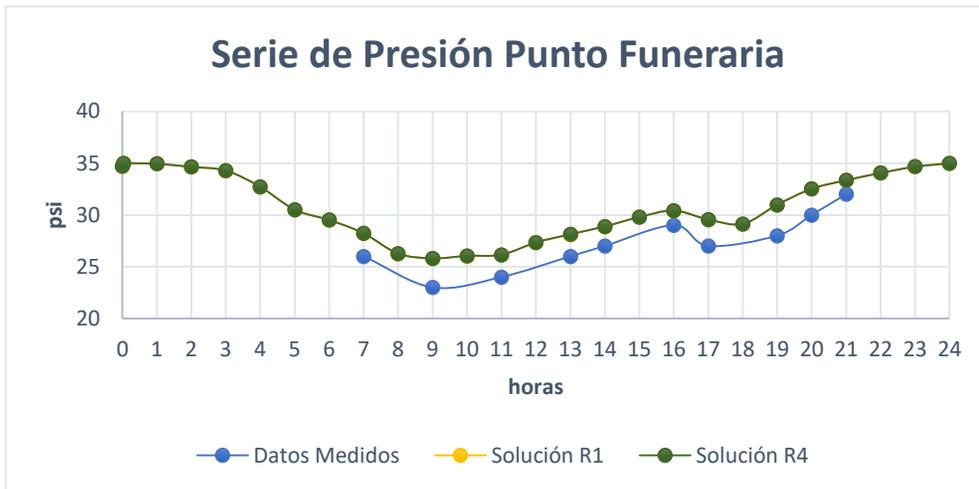


Figura 36 Modelos Solución R1 y Solución R4 - Datos Medidos Fuente Parque.

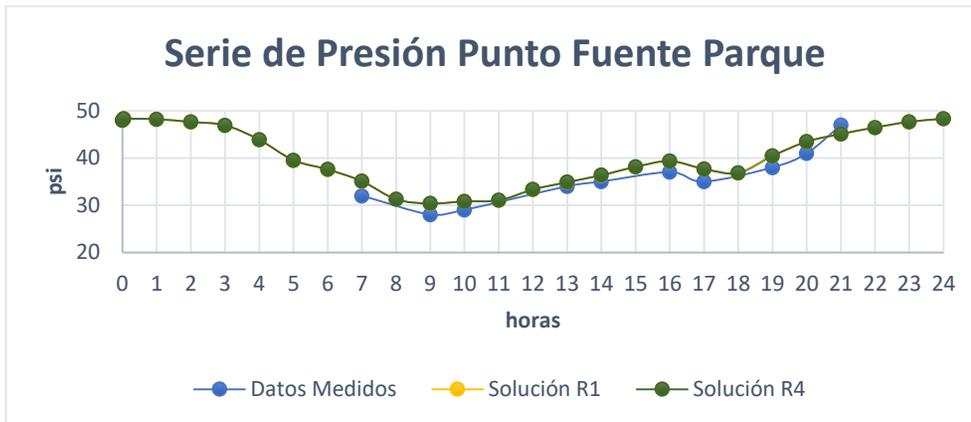
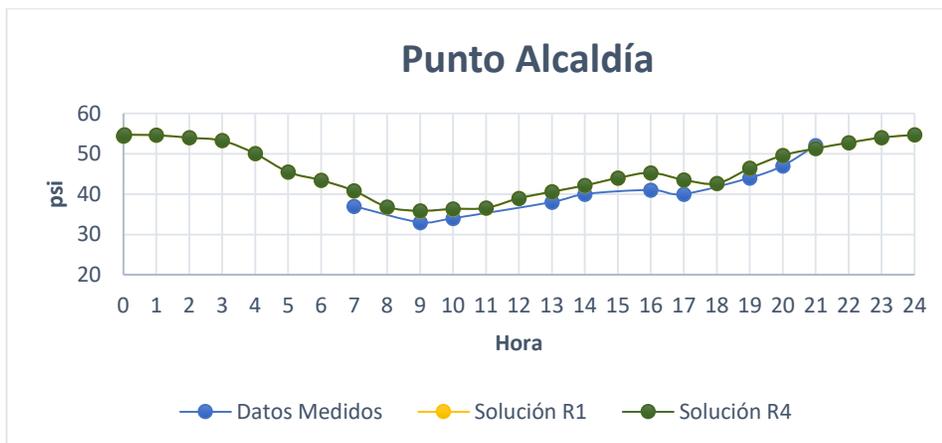


Figura 37 Modelos Solución R1 y Solución R4 - Datos Medidos Alcaldía



Fuente: Autores

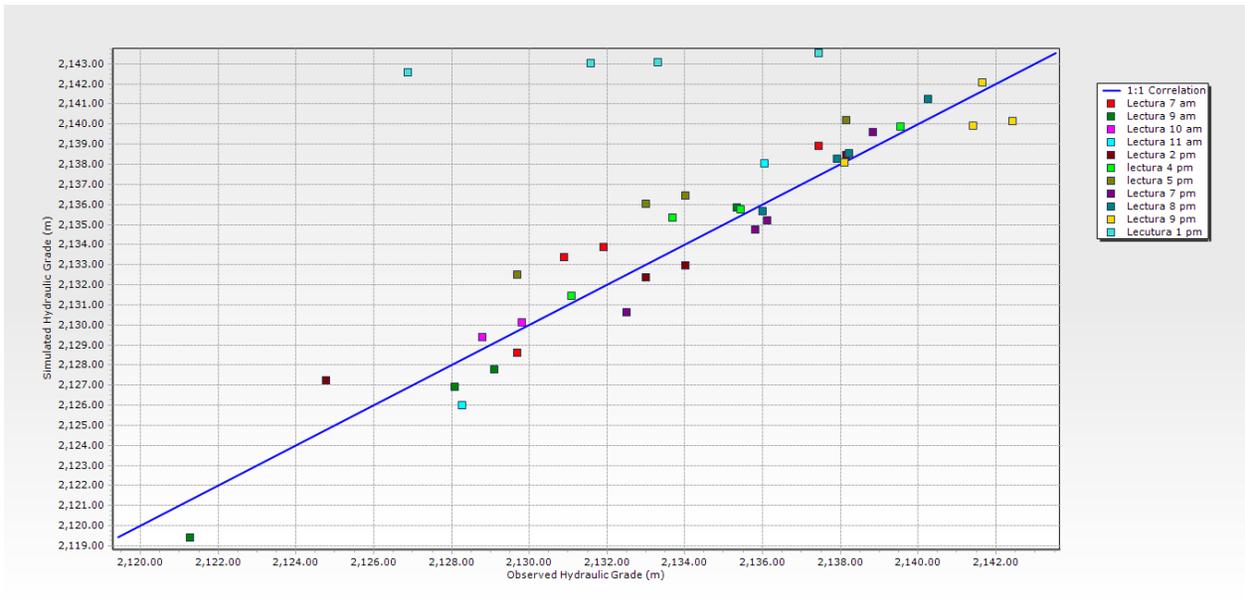
8.4. CALIBRACIÓN FINAL.

La calibración final es resultado de la selección de los escenarios con mayor capacidad de adaptabilidad a la realidad, debido a que la variable más sensible es la demanda se determina como línea base la solución 1, con el objetivo de heredar las características obtenidas mediante los algoritmos genéticos, donde el error se redujo en relación con el modelo inicial, se corre de nuevo el Darwin Calibrator con la nueva línea base y con los parámetros de ajuste a la rugosidad obtenidos anteriormente en la solución R1, creando una nueva generación del modelo llamada solución óptima.

Los valores de correlación del Darwin calibrator también permitiente identificar la correlación que hay entre los datos registrados y los modelados como también la evolución a lo largo de todo el proceso de selección de individuos, de igual modo la herramienta permite graficar la relación entre el gradiente hidráulico modelado y

observado y analizar el proceso de calibración.

Figura 38 Correlación de gradiente Hidráulico



Fuente: Autores

La figura 38 permite observar que el modelo final se correlaciona con los datos tomados en campo, sin embargo, se evidencia que algunas de las mediciones registradas a la 1pm presentan inconsistencias, atribuido a un posible error de medición haciendo conveniente generar una nueva generación del modelo pero esta vez no tener en cuenta las lecturas de este periodo de tiempo.

Figura 39 Correlación de gradiente Hidráulico sin datos 1 Pm.

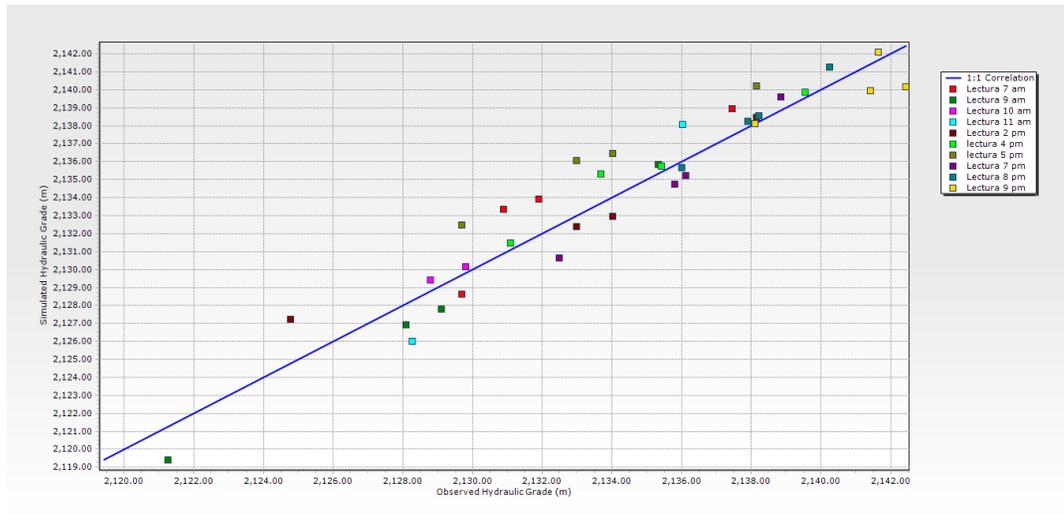


Tabla 14 Evolución correlación de Datos

Solución	Fitness
Solución 1	159.276
Solución R1	175.754
Solución opt.	152.269
Solución opt sin datos 1pm	24.795

Fuente: Autores

Finalmente se calcula el grado de adaptabilidad del modelo calibrado final.

Tabla 15 Adaptabilidad de los Modelo generado Final

Individuo	Serie	Error serie
Modelo Inicial	Cancha de Futbol	0.038014047
Modelo Inicial	Funeraria	0.08292023
Modelo Inicial	Fuente Parque	0.062398175
Modelo Inicial	Alcaldía	0.070005545
Error Modelo Inicial		0.063334499
Solución Final	Cancha de Futbol	0.027663982
Solución Final	Funeraria	0.057333166
Solución Final	Fuente Parque	0.028726302
Solución Final	Alcaldía	0.030557024
Error Modelo Final		0.036070118

Fuente: Autores

8.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

El análisis de las condiciones de servicio de la red de distribución se realiza con los lineamientos de la normatividad vigente, la resolución 0330 del 2017, en la cual en su artículo 62 establece que la presión máxima estática definida es 50 m.c.a para sistemas nuevos u optimizaciones, puede ser superior hasta 55 m.c.a siempre que no se supere el 10% de la zona de presión y máximo 60 m.c.a sin superar el 5% de la zona de presión.

La red de distribución tiene en el 60% de los nodos con problemas de sobrepresión, ubicados en las zonas más bajas del casco urbano del municipio, como se puede ver en la figura 41, (nodos de color rojo y morado) ,incumpliendo con la normatividad.

Figura 40 Rango de Presiones

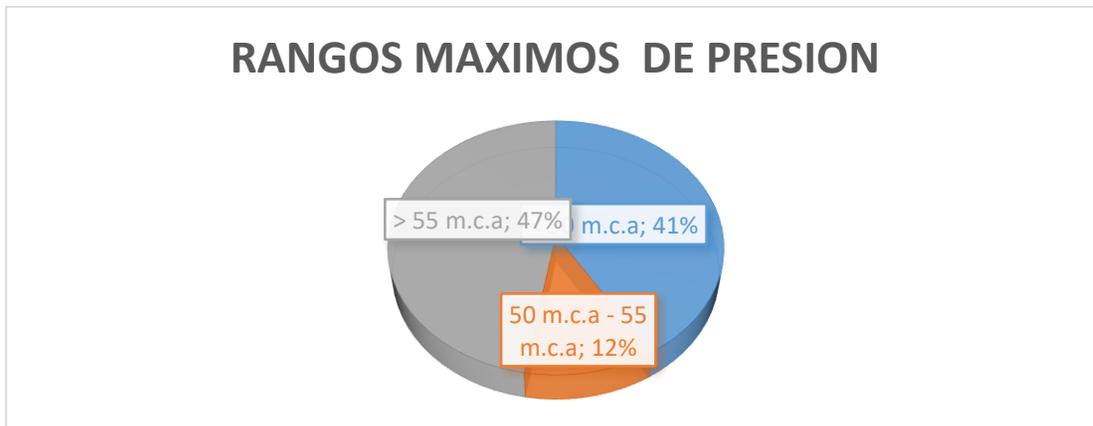
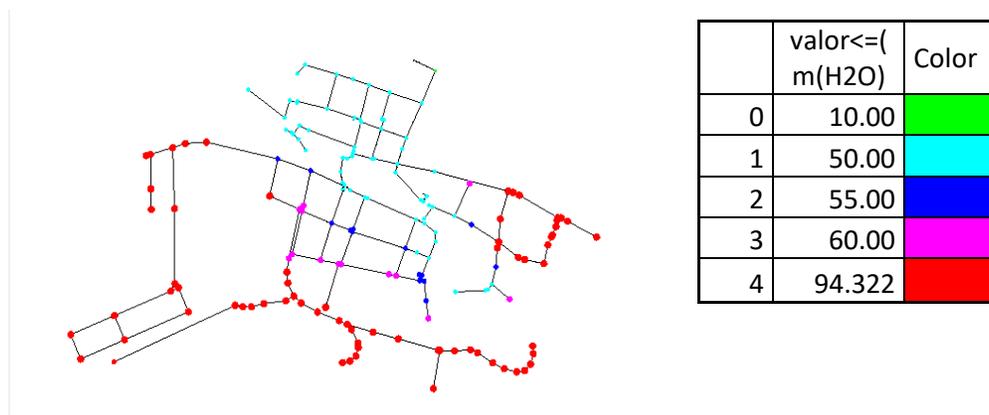


Figura 41 Presiones en los nodos de la Red



Fuente: Autores

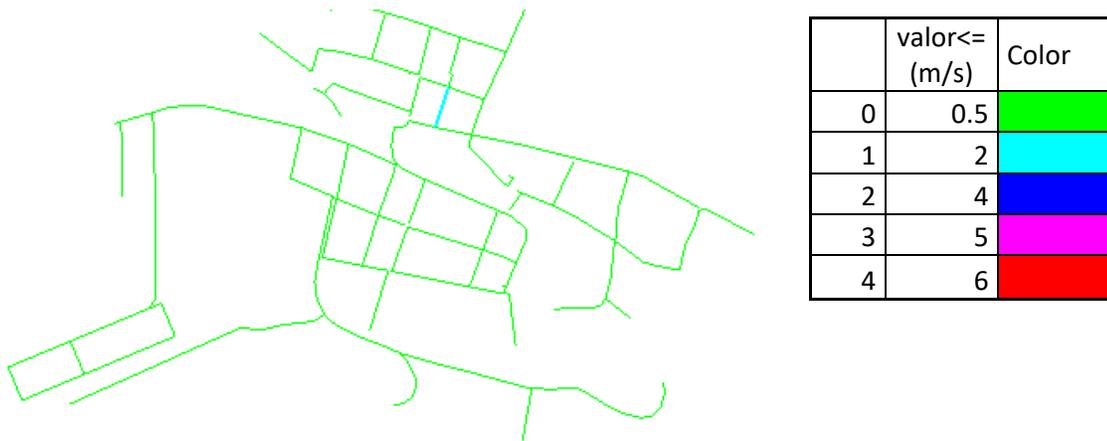
En cuanto a las presiones mínimas según el artículo 61 las presiones mínimas de

servicio de la red de distribución para poblaciones de hasta 12500 habitantes, debe ser 10 m.c.a

8.5.1. Análisis de velocidad del sistema.

La modelación calibrada evidencio problemas de bajas velocidades de flujo en las tuberías, las cuales están por debajo de la mínima establecida según la resolución 0330 la que en su artículo 56 establece que” “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.”⁴⁰

Figura 42 Bajas Velocidades en la red de Distribución



Fuente: Autores.

La figura 42 representa las velocidades de flujo en la red de distribución, donde las tuberías de color verde corresponden a velocidades inferiores a 0,5 m/s, reflejando que casi la totalidad del sistema no está acorde a la normativa en cuanto a este parámetro.

⁴⁰ COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 0330 (8, junio,2017). Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS. Bogotá, D.C., 2017. P.40.

9. PROCEDIMIENTO DIAGNÓSTICO RED PROYECTADA.

9.1. PROYECCIÓN DE USUARIOS DEL SISTEMA.

La proyección de usuarios se realiza para un periodo de 25 años siguiendo criterio de la resolución 0330 y los datos de los censos proporcionados por el DANE.

Tabla 16 Censos reportados por el DANE

Casco Urbano	
CENSO	Población (habitantes)
1985	960
1993	1049
2005	1415
2018	1548

Para la proyección de la población para el año 2045 se emplean las siguientes ecuaciones:

Método lineal o aritmético

$$Pf = Puc + r \times (Tf - Tuc)$$

$$r = \frac{Puc - Pci}{Tuc - Tci}$$

Donde:

Pf= población (habitantes) correspondiente al año en que se quiere proyectar la población.

Puc= población (habitantes) correspondiente al último año censado con información.

Pci= población (habitantes) correspondiente al Censo inicial con información.

Tuc= año correspondiente al último censo con información.

Tci= año correspondiente al censo inicial con información.

Tf = es el año al cual se quiere proyectar la información.

Tabla 17 Proyección Método Aritmético

Método Aritmético		Población 2045(Pf)
<i>r 1993-1985</i>	11.125	1848.37
<i>r 2005-1993</i>	30.5	2371.50
<i>r 2018-2005</i>	10.2307692	1824.23
<i>r promedio</i>	17.2852564	2014.70

Fuente: Autores

Método Geométrico

$$Pf = Pu * (1 + r)^{Tf - Tuc}$$

$$r = \left(\frac{Puc}{Pci} \right)^{\frac{1}{Tuc - Tci}} - 1$$

Tabla 18 Proyección Método Geométrico

Método Geométrico		Población 2045(Pf)
<i>r 1993-1985</i>	0.01114405	2087.96
<i>r 2005-1993</i>	0.02525465	3035.48
<i>r 2018-2005</i>	0.00693426	1865.52
<i>r promedio</i>	0.01444432	2279.98

Fuente: Autores

Método Exponencial:

$$Pf = Pci * e^{k*(Tf - Tci)}$$

$$k = \frac{\ln Pcp - \ln Pca}{Tcp - Tca}$$

Donde:

Pcp= población del censo posterior.

Pca= población del censo anterior

Tcp= año correspondiente al censo posterior

Tci= año correspondiente al censo anterior.

Ln = logaritmo natural

Tabla 19 Proyección Método Exponencial

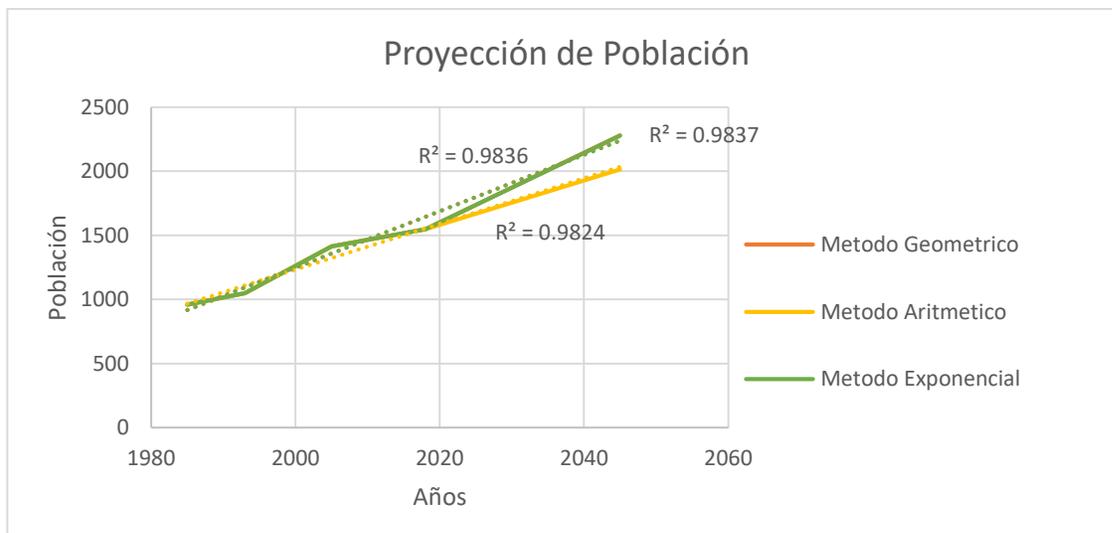
Método Exponencial		Población 2045(Pf)
<i>k 1993-1985</i>	0.01108242	2087.96
<i>k 2005-1993</i>	0.02494102	3035.49
<i>k 2018-2005</i>	0.00691033	1865.53
<i>k promedio</i>	0.01431125	2278.16

Fuente: Autores

Analizando las diferentes proyecciones de población con los diferentes métodos y teniendo en cuenta el promedio de la tasa de crecimiento poblacional para cascos urbanos del departamento de Cundinamarca según el DANE es del 2%, se establece que la población para el 2045 será de 2278 habitantes, calculada con la rata poblacional promedio de los censos registrados, correspondiente al método exponencial, por reflejar mejor correlación con el crecimiento, así mismo, se graficaron las proyecciones de los diferentes métodos con las tasa de crecimiento que presentan un mejor ajuste, permitiendo confirmar dicha selección.

Adicional a la población proyectada, teniendo en cuenta las características socioculturales de la población y la evidencia de la presencia de población flotante en el municipio, por fines comerciales y turísticos, se estimó, por ausencia de información exacta, un 8% de la población del casco urbano. Así pues, la población final de diseño es 2460 habitantes.

Figura 43 Tendencia diferentes Métodos



Fuente: Autores

9.2. CÁLCULO DE CAUDALES.

9.2.1. Dotación Neta.

Para el estimativo de la dotación neta como dato de diseño del sistema de acueducto se utiliza los valores indicados en la tabla 20, donde indica la dotación neta máxima según la altura sobre el nivel del mar; el casco urbano del municipio de Machetá tiene una altura media de 2094 m.s.n.m por lo que se determina usar una dotación de 120 L/HAB*DIA.

Tabla 20 Dotación neta máxima por habitante según la altura sobre el nivel del mar de la zona atendida.

ALTURA PROMEDIO SOBRE EL NIVEL DEL MAR DE LA ZONA ATENDIDA	DOTACIÓN NETA MÁXIMA (L/HAB*DIA)
>2000 m.s.n.n	120
1000 - 2000 m.s.n.m	130
< 1000 m.s.n.m	140

Fuente: Resolución 0330 del 08 junio de 2017.

9.2.2. Dotación neta actual 2020.

La estimación de la población actual se calculó mediante el método exponencial con la rata poblacional promedio de los censos registrados por el DANE, la cual tiene mayor correlación con la tendencia de crecimiento, determinado que la población actual es de 1593 habitantes.

Tabla 21 Proyección Método Exponencial

Método Exponencial		Población 2045(Pf)
<i>k</i> 1993-1985	0.01108242	1582.69
<i>k</i> 2005-1993	0.02494102	1627.18
<i>k</i> 2018-2005	0.00691033	1569.54
<i>k</i> promedio	0.01431125	1592.95

Fuente: Autores

Así mismo considerando las características socioculturales, comerciales y turísticas del casco urbano del municipio, se estima un 8% de población flotante por ausencia de información exacta, por lo tanto, la población final actual es de 1720 habitantes.

Teniendo en cuenta el caudal de consumo promedio registrado en el presente año de 5.96 l/s, y la población actual estimada, se determina que la dotación es de 299 L/HAB*DIA.

Al comparar la dotación actual anteriormente calculada (299 L/HAB*DIA) y la dotación máxima por habitante según la normatividad (120 L/HAB*DIA), se evidencia que la dotación calculada es mayor, debido que relaciona el caudal promedio y la población estimada para el 2020, lo que indica probablemente que los censos del DANE se encuentran subestimados.

9.2.3. Dotación Bruta

Para estimar la dotación bruta se decide utilizar la dotación neta calculada con los datos actuales ya que reflejan un comportamiento más aproximado del consumo en la red distribución del casco urbano del municipio.

La dotación bruta se calcula conforme a la siguiente ecuación:

$$Dbruta = dneta / (1 - \%p)$$

Donde,

Dbruta: Dotación Bruta

Dneta: Dotación Neta

%P: porcentaje de pérdidas técnicas máximas para diseño.

Tabla 22 *Calculo dotación Bruta*

Dneta	299	L/HAB/DIA
%P	25%	
Dbruta	398.67	L/HAB/DIA

Fuente: Autores

9.2.4. Caudal medio diario

El caudal medio diario corresponde a el promedio de consumos medios diarios para un periodo de uno año y se calcula con la siguiente ecuación.

$$Qmd = \frac{p * dbruta}{86400}$$

Tabla 23 *Dotación media diaria*

Dbruta	398.67	L/HAB/DIA
Población	2460	HAB
Qmd	11.35	L/s

Fuente. Autores

9.2.5. Caudal máximo diario y caudal máximo horario

El caudal máximo diario y el caudal máximo horario se calcularon mediante los coeficientes de mayoración K1 y K2, según la resolución 0330, que establece que para poblaciones menores a 12500 habitantes esto factores no pueden ser superior a 1.3 y 1.6 respectivamente, por lo que se determina utilizar esto valores máximos

en las siguientes expresiones de cálculo:

$$QMD = Qmd * k1$$

$$QMH = QMD * k2$$

Tabla 24 Calculo QMH

Dbruta	398.67	L/HAB/DIA
Población	2460	HAB
Qmd	11.35	L/s
K1	1.30	
QMD	14.75	L/s
K2	1.60	
QMH	23.6	L/s

Fuente: Autores

9.3. ASIGNACIÓN DE LAS DEMANDAS.

El caudal de diseño adoptado para el 2045 es de 11,35 l/s que corresponde al caudal medio diario y la asignación para cada nodo se realizó también mediante el método de las áreas aferentes, teniendo en cuenta el área adicional correspondiente a la zona de expansión urbana del municipio. Ver figura 44.

Figura 44 Zona de Expansión Urbana



Área de Expansión



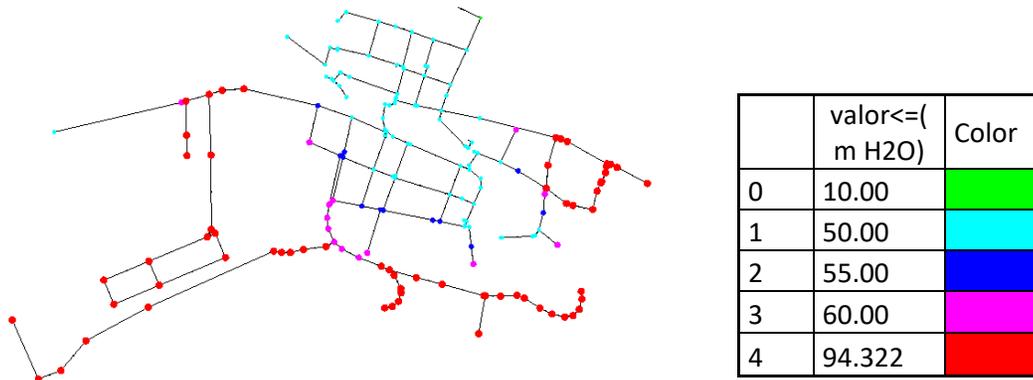
Área urbana



9.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS ESCENARIO 2045.

Este escenario permite evaluar las condiciones de la infraestructura actual de la red, frente demandas futuras del área de expansión para el periodo de diseño del 2045 y determinar la viabilidad de la prestación del servicio bajo las mismas condiciones.

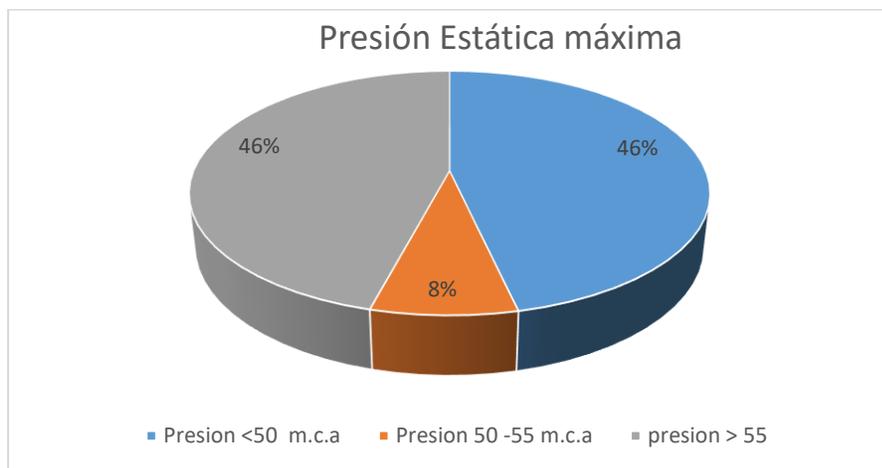
Figura 45 Presiones máximas Estáticas



Fuente: Autores

Analizando la red de distribución en condiciones estáticas, con los nodos adicionales correspondientes a las zonas de expansión, se evidencia que los cambios en esta situación no son considerables, la red tiende tener sobre presión en el 54 % de los nodos en las zonas sur de la cabecera municipal como se puede evidenciar la figura 45, en los nodos de color rojo.

Figura 46 Distribución de presiones



Fuente: Autores

Sin embargo, analizando el modelo con el nuevo caudal de diseño, en condiciones de máximo consumo, se evidencia presiones inferiores a la establecidas por la resolución 0330, la cual indica que la presión dinámica mínima, para poblaciones de diseño de hasta 12500 habitantes es de 10 m.c.a, el modelo incluso presentó presiones negativas en la zona sur del casco urbano y en mayor medida en el área de expansión como se puede ver en la figura 47, donde los nodos de color verde

son los que presentan presiones inferiores al 10 m.c.a.

Figura 47 Presiones mínimas dinámicas.

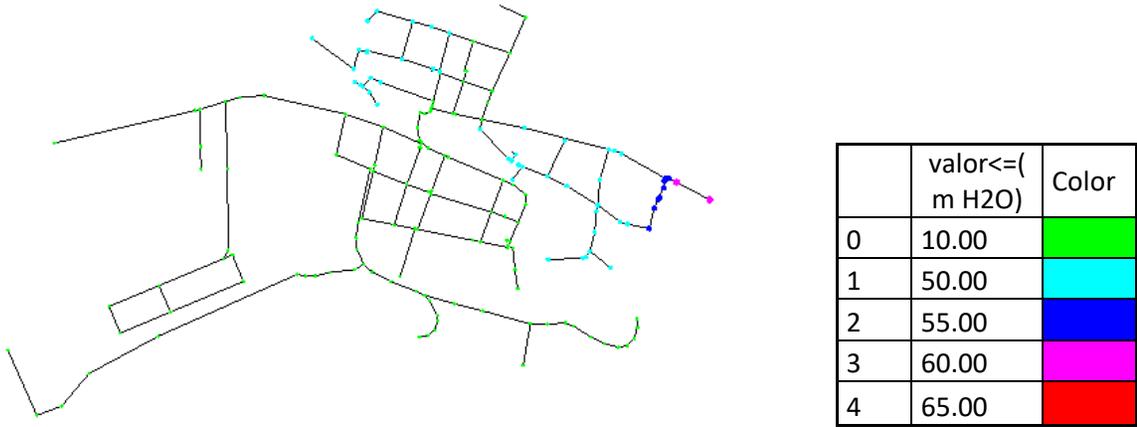
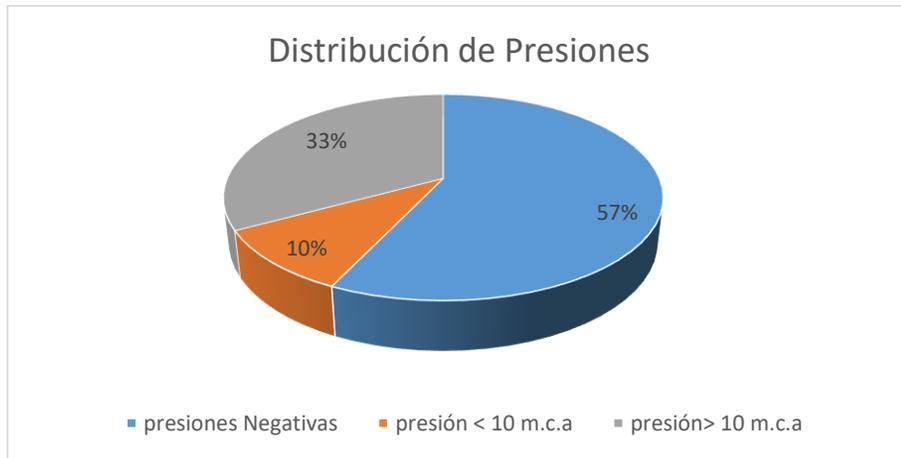


Figura 48 Distribución de presiones



Fuente: Autores

9.4.1. Análisis de velocidad en el sistema.

El modelo presenta en el 61% de los tramos de tuberías velocidades inferiores a las establecidas por la normatividad, la cual insta que la velocidad mínima para redes de distribución debe ser superior a 0.5 m/s, en la figura 49 se puede ver los tramos en color verde los cuales corresponden a tuberías con velocidades inferiores a este parámetro.

Figura 49 Velocidades en la red de distribución.



	valor<=(m/s)	Color
0	0.5	Verde
1	2.00	Cian
2	3.00	Azul
3	5.00	Magenta
4	7.00	Rojo

Fuente: Autores

9.5. ESCENARIO DE MEJORAMIENTO.

9.5.1. Escenario de optimización 1.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en la modelación del periodo de diseño 2045, el cual prevé un área de expansión urbana y caudales mayores, se plantean cambios físicos en la red, con el objetivo de dar solución a la problemática de viabilidad de prestación del servicio de agua, en condiciones acordes con el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS, resolución 0330 del 2017.

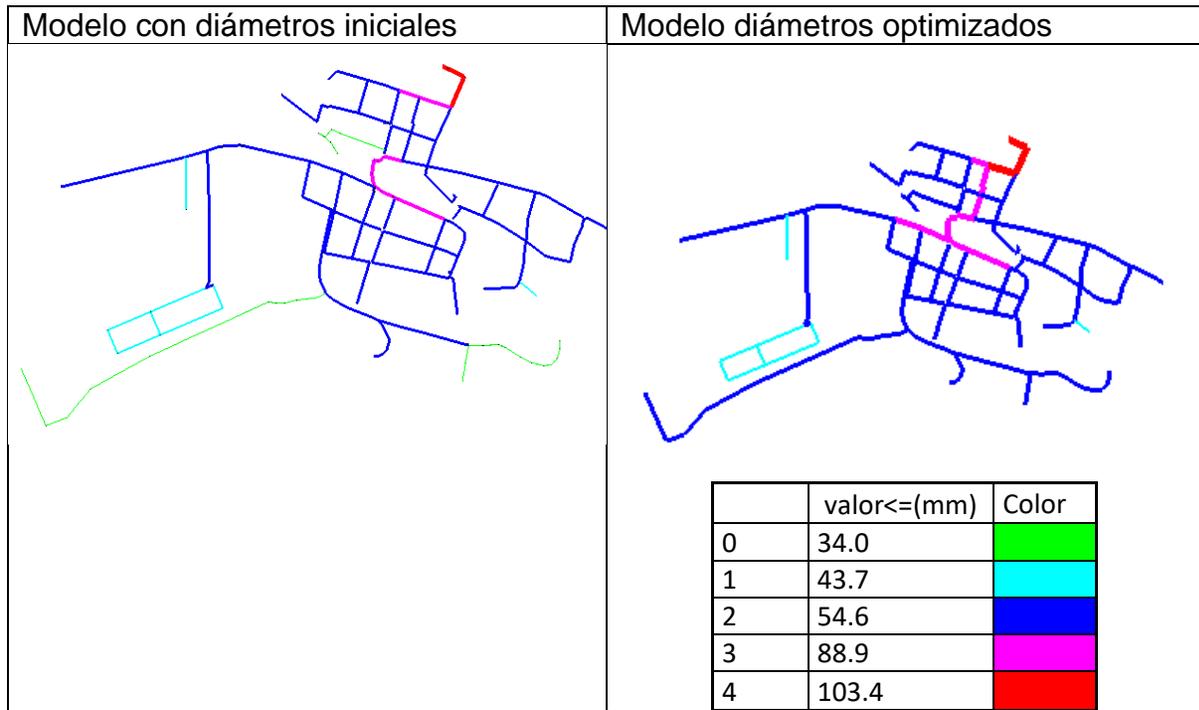
Para dar solución a la presión mínima de servicio y disponibilidad del servicio en las zonas de expansión se propone optimizar los diámetros con un diámetro inferior a 43.68 mm por uno de 54.58 mm es decir un diámetro nominal de 2" en toda la red, adicional se sugiere cambiar los tramos de tubería p8 y p 123, p127 y p128, que se encuentran instalados en 2"por 3", máxime cuando se confirmó que estos tramos se encontraban en este diámetro pero en una intervención resiente se redujo el diámetro, perdiendo continuidad, entre otros cambios; Adicionalmente se genera un reporte con los elementos que fueron cambiados con el objetivo de solucionar problemas de baja o presión negativa en condiciones dinámicas.

Tabla 25 Reporte de cambio de diámetros

ID	Etiqueta	Longitud(Escala) (m)	Nodo de inicio	Nodo de llegada	Diámetro inicial (mm)	Diámetro Propuesto (mm)	Material
336	P-105	69	J-144	J-145	16.6	54.6	PVC
147	P-27	14	J-47	J-48	16.6	54.6	PVC
150	P-28	14	J-49	J-50	16.6	54.6	PVC
157	P-31	15	J-53	J-54	16.6	54.6	PVC
164	P-33	16	J-54	J-57	16.6	54.6	PVC
194	P-44	19	J-57	J-47	16.6	54.6	PVC
216	P-53	24	J-87	J-53	16.6	54.6	PVC
218	P-54	24	J-88	J-87	16.6	54.6	PVC
238	P-64	30	J-97	J-49	16.6	54.6	PVC
249	P-69	34	J-50	J-88	16.6	54.6	PVC
487	P-75	28	J-144	J-97	16.6	54.6	PVC
358	P-113	92	J-21	J-68	28.5	54.6	PVC
626	P-121	128	J-188	J-200	28.5	54.6	PVC
415	P-134	14	J-66	J-73	28.5	54.6	PVC
126	P-19	11	J-34	J-35	28.5	54.6	PVC
167	P-35	16	J-58	J-59	28.5	54.6	PVC
177	P-39	17	J-64	J-65	28.5	54.6	PVC
183	P-41	18	J-68	J-67	28.5	54.6	PVC
192	P-43	19	J-73	J-67	28.5	54.6	PVC
220	P-55	24	J-89	J-58	28.5	54.6	PVC
222	P-56	24	J-66	J-90	28.5	54.6	PVC
490	P-78	4	J-73	J-35	28.5	54.6	PVC
274	P-79	41	J-65	J-89	28.5	54.6	PVC
510	P-90	248	J-189	J-188	28.5	54.6	PVC
511	P-91	15	J-59	J-189	28.5	54.6	PVC
529	P-103	6	TCV- 7	J-195	54.6	80.4	PVC
628	P-123	117	J-201	J-202	54.6	84.4	PVC
404	P-127	17	J-110	J-14	54.6	84.4	PVC
406	P-128	52	TCV- 13	J-108	54.6	80.4	PVC
84	P-8	4	J-13	J-14	54.6	80.4	PVC
494	P-81	68	J-182	J-138	54.6	80.4	PVC
402	P-126	63	J-135	J-128	80.4	103.4	PVC

Fuente:

Figura 50 Optimización Diámetros



Fuente: Autores

La optimización de los diámetros soluciona presiones dinámicas mínimas según la normatividad, pero a su vez se generan y continúan presiones estáticas altas, de ahí la importancia de instalar cuatro válvulas reguladoras de presión, se proponen instalar una válvula en la zona nororiental ubicada en el tramo p128, con una configuración de 17 m.c.a, otra en el tramo p134 con una configuración de 31 m.c.a en la zona noroccidental y una válvula reguladora de presión en el tramo p 132, con consigna de 16 m.c.a ubicada en la zona sur occidental del casco urbano y una válvula reguladora en el tramo p-130 con la configuración de 20 m.c.a en la zona centro; las configuraciones para cada una de las válvulas se evaluaron con el fin de que solucionar excesos de presión sin perjudicar las presiones mínimas en el periodo de máximo consumo.

Figura 51 Regulación de presiones.

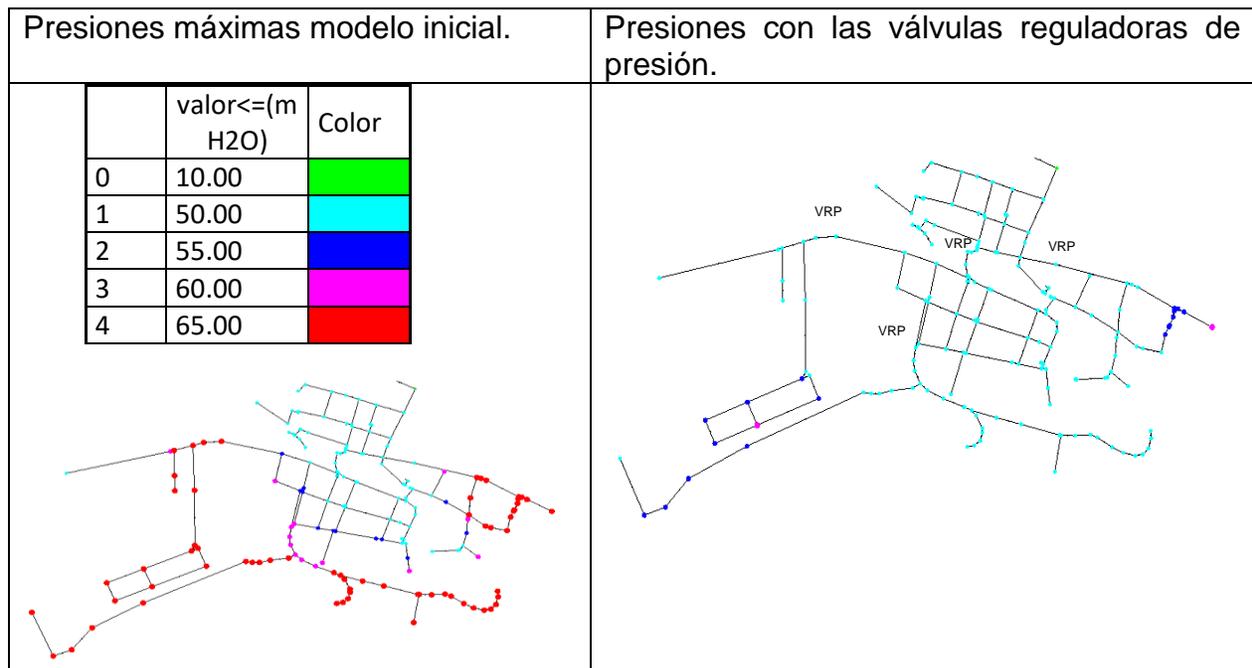
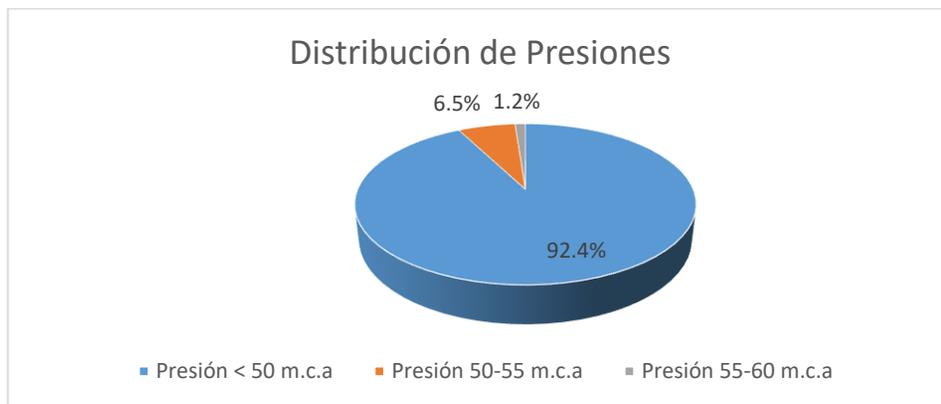


Figura 52 Distribución de presiones con las VRP



Fuente: Autores

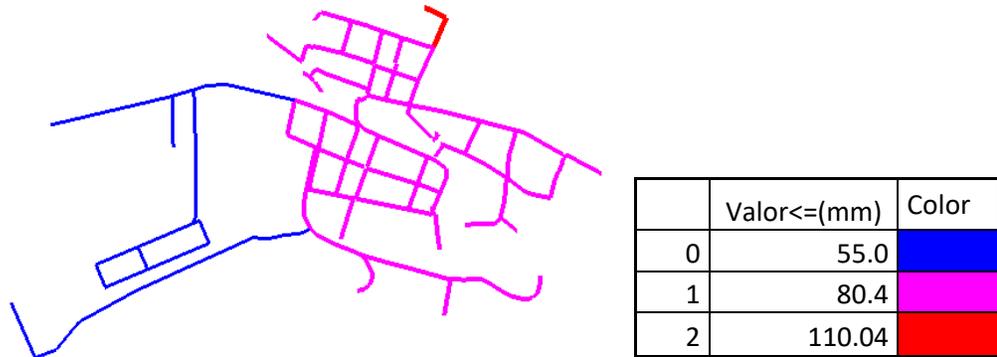
Analizando la distribución de presiones en cada uno de los nodos, se puede confirmar que la red en condiciones estáticas cumple con la norma.

9.5.2. Escenario de optimización 2.

El segundo escenario se fundamentó en el artículo 63 de la resolución 0330, en donde se establece los diámetros mínimos reales para las redes de distribución, donde en las zonas urbanas este diámetro no debe ser inferior a 75 mm y 50 mm

en zonas rurales. Como se puede ver en la figura 53 toda la tubería de la zona urbana se cambió a 3" y en la zona de expansión en tubería de 2", es de aclarar que la aplicación de este escenario implica retirar más del 90% de la red existente y realizar el reemplazo por el diámetro señalado a continuación.

Figura 53 Diámetros Escenario 2



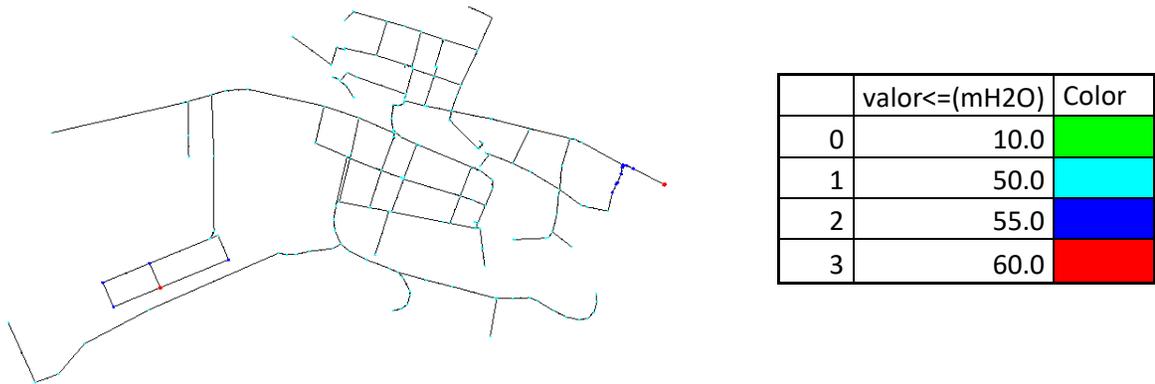
Este escenario propuesto presenta un rango de presiones altas en condiciones estáticas por lo que también se considera instalar válvulas reguladoras de presión, si bien las presiones eran superiores a las presentadas en el escenario 1, la misma configuración y ubicación determinadas en este, cumplieron con la normatividad, donde el 91% de los nodos presentan presiones inferiores a 50 m.c.a la tabla 25 describe la respectiva configuración de cada válvula.

Tabla 26 Reporte Válvulas Reguladoras de Presión

ID	Etiqueta	Presión ajuste (Inicial) (m H2O)
636	PRV-1	17
639	PRV-2	20
642	PRV-3	16
645	PRV-4	31

Fuente: Autores

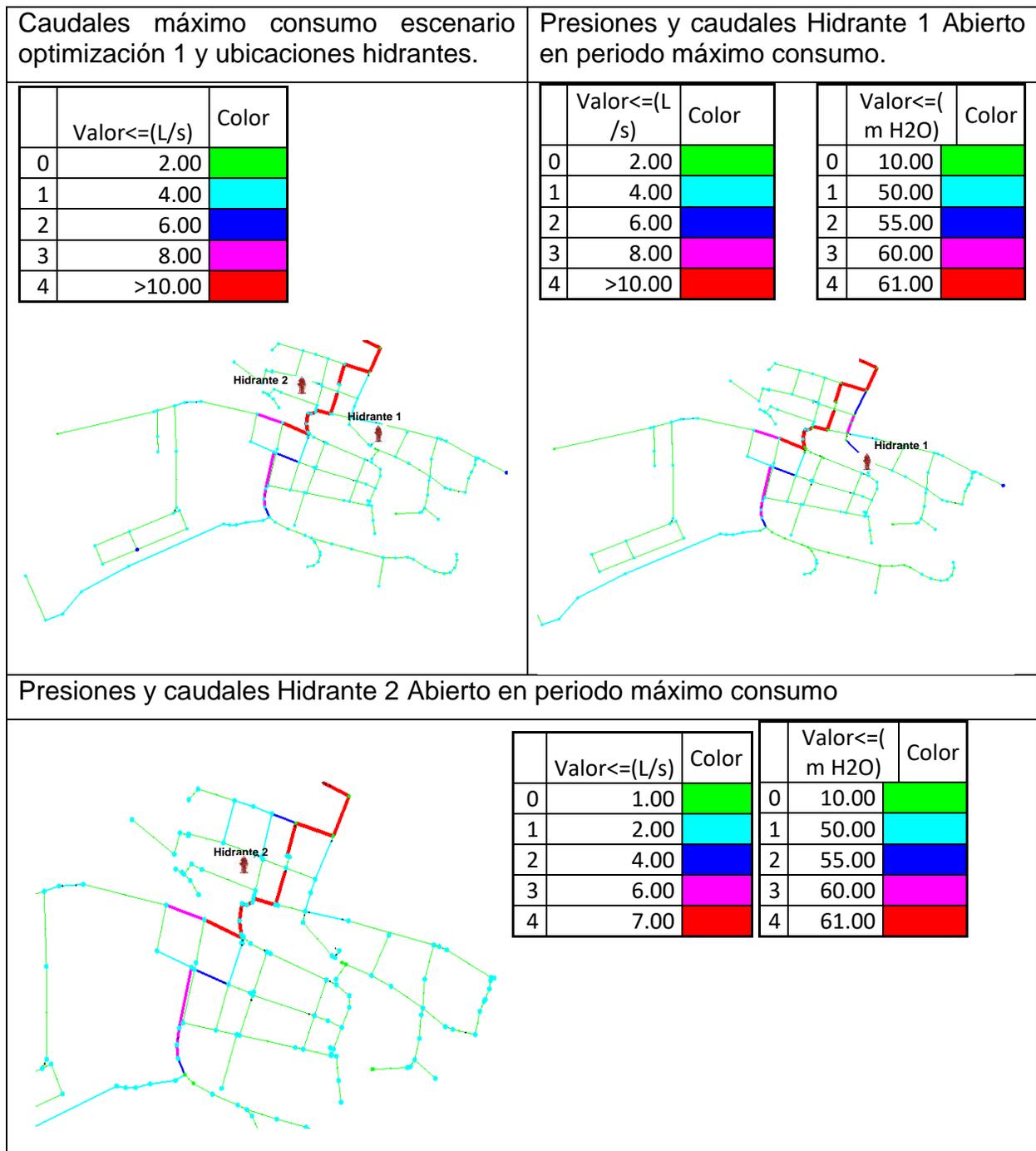
Figura 54 Escenario 2 Presiones máximas con VRP.



9.6. ESCENARIO DE INCENDIO.

El casco urbano del municipio de Macheta cuenta con dos hidrantes ubicados, en el carrera 5 con calle 7 y otro en la calle 9 con carrera 8 cerca de la plaza de mercado, con el objetivo de confirmar si los escenarios propuestos, cumplen con la normatividad, específicamente el artículo 70 de la resolución 0330, la cual establece que para poblaciones de diseño menores a 12500 habitantes, los hidrantes y las tuberías de los mismos deben tener la capacidad de conducir un caudal mínimo de 5 l/s, por lo tanto, se genera otro escenario con las mismas características físicas del escenario de optimización 1 elegido como la mejor alternativa, analizado desde el punto de vista técnico y económico, mediante la simulación de un evento de incendio, asignando una demanda en cada hidrante de 5 l/s, estos eventos simulados se realizan de manera independiente en la hora de máximo consumo arrojando los resultados de la figura 55.

Figura 55 Escenario eventos Incendio.



Fuente: Autores

La figura 55 permite observar los resultados de la simulación de un evento de incendio atendido por alguno de los hidrantes, confirmando que la red estaría en capacidad de conducir 5 l/s como lo exige la normatividad en la ubicación de cada uno de los hidrantes, tanto en el escenario de que el hidrante 1 este funcionado, como en el caso de apertura del hidrante 2, en ambos escenarios las presiones

cercanas de los nodos a cada hidrante sufren una disminución considerable de presión pero no inferior a 7 m.c.a, lo que confirma que en el evento de incendio puede ser atendido y garantizar simultáneamente el suministro de agua en la zona colindante de los hidrantes.

10. CONCLUSIONES

La comparación del catastro de la red realizada entre los planos suministrados por la oficina de servicios públicos y la información suministrada por el fontanero a la investigación deja en evidencia la falta de actualización del catastro de la red.

La efectividad de calibración de modelos digitales mediante software basados en algoritmos genéticos depende mayoritariamente de un criterio profesional, que analice los resultados arrojados por dichas herramientas, para el caso del Darwin Calibrator, el realiza miles de iteraciones de posibles soluciones, pero es el profesional que conoce el comportamiento real de consumo o valores comunes de rugosidades según el tipo de material.

El modelo generado para un periodo de diseño 2045, evidenció que la estructura actual del sistema de acueducto no tiene la capacidad de suministrar el servicio en condiciones acordes a la normatividad vigente en las zonas de expansión urbana.

El análisis de sensibilidad de las variables de calibración evidenció que la red de distribución tiene una alta sensibilidad a la calibración por demandas presentando modelos con mayor adaptabilidad, caso contrario a la calibración por rugosidades, donde comparando el error del modelo inicial y el modelo calibrado por esta variable no es significativo, debido a las bajas velocidades en la red.

Se evidenció mediante el modelo inicial calibrado, que se presentan problemáticas respecto a las presiones, se encuentran presiones relativamente bajas en proximidades al tanque, en las cotas de mayor magnitud, las cuales se van incrementando a medida que disminuye la elevación hasta encontrarse un área altamente considerable con presiones que afectan las propiedades estructurales de los materiales de la tubería.

El modelo calibrado final obtuvo un error de 3.6% con respecto a las variables tomadas en campo.

Los escenarios propuestos de optimización cumplen con los lineamientos de la normatividad, tanto de consumo como en el caso de ocurrencia de un evento de incendio.

El análisis para la elección de la alternativa de mayor conveniencia se realiza teniendo en cuenta el aspecto tanto técnico como económico, si bien se contemplan dos alternativas, se elige la que conlleva una menor inversión de recursos, dado que requiere una menor longitud de tubería a intervenir, (1285 metros) por lo que a simple vista disminuye el costo total del proyecto, esto sin conocer cifras exactas, teniendo en cuenta que no es el alcance del proyecto pero si se brindan las mismas condiciones de funcionamiento hidráulico, las cuales se encuentran bajo el cumplimiento de la normatividad correspondiente.

11. RECOMENDACIONES

Acorde a los resultados obtenidos, se ve la necesidad de implementar acciones a corto plazo, como lo es la instalación de válvulas reguladoras de presión, ya que un alto porcentaje de nodos evidencian sobrepresiones que están afectando constantemente tanto la tubería como los diferentes elementos que componen la red.

Se ve la necesidad de considerar un plan de acción dado que el área urbana se expande constantemente, y con cada aumento de consumo en el costado sur del municipio se está disminuyendo presiones en el costado norte, parte alta del municipio, las cuales se evidencian actualmente con valores muy cercanos a 10 m.c.a.

Como recomendación general, y teniendo en cuenta que las condiciones hidráulicas del sistema no funcionarían correctamente, prestando un servicio óptimo respecto a continuidad y cobertura, se presenta una alternativa que, si bien contempla algunos cambios en la red, optimiza al máximo el sistema existente, disminuyendo costos y garantizando el abastecimiento a todas las áreas.

Se recomienda sistematizar los equipos de medición de caudales y presión con el fin de realizar mayor seguimiento del comportamiento de la red especialmente en la salida del tanque y estudiar las facturaciones del servicio para estimar IANC.

En el desarrollo del modelo digital de la red calibrada, hubo la necesidad de tomar decisiones ya que a pesar de la gestión en la oficina de servicios públicos y las diferentes brigadas de toma de datos, no fue posible conocer algunos parámetros o datos de caudal en algunos puntos específicos de la tubería así como datos de facturación, esto con el fin de obtener las pérdidas técnicas del sistema, por lo que se ve la importancia de tener dicha información con el fin de ser suministrada a la herramienta de calibración Darwin Calibrator y así obtener de manera más precisa el funcionamiento de la red.

12. ANEXOS

ANEXO A. Negación de viabilidad de servicios públicos en algunos sectores del municipio.

	<p>República de Colombia Departamento de Cundinamarca Municipio de Machetá – Oficina de Servicios Públicos Nit. 899.999.401-1 CÓDIGO POSTAL 250640</p>	
<p>EL SUSCRITO JEFE DE LA OFICINA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS DEL MUNICIPIO DE MACHETA CUNDINAMARCA</p>		
<p>CERTIFICA</p>		
<p>Que, de acuerdo a la solicitud presentada, el predio denominado "La Herrería" ubicado en la Vereda Quebrada Honda, Sector las cuadras de propiedad del señor JOSE HERRERA SANDOVAL identificado con cédula de ciudadanía No. 19.278.988, y una vez realizada la visita por parte de los fontaneros del Municipio NO es viable la prestación de los servicios públicos domiciliarios del proyecto de Veintisiete (27) parcelas para la construcción de viviendas rurales.</p>		
<p>La presente certificación se expide a los Veintiséis (26) días del mes de Junio de 2019 a solicitud del interesado.</p>		
<p>Cordialmente</p>		
 JAIRO ERNESTO BERNAL CUADROS Jefe Oficina de Servicios Públicos		
<p>"Construyendo futuro" Alcaldía Municipal de Machetá Palacio Municipal, Carrera 8 No 5-35 Piso 1° Tel. 091 8588251 Fax 091 8588250 Código postal 250640 serviciospubli@macheta-cundinamarca.gov.co</p>		
<p>VERSION 1 / 01-04-2019</p>		

ANEXO B. Planos en formato dwg de las dos alternativas de optimización propuestas. (consultar CD-ROM)

ANEXO C. Reporte Watercad nodos. (consultar CD-ROM)

ANEXO D. Reporte Watercad tuberías (consultar CD-ROM)

13. BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA DE MACHETA CUNDINAMARCA. Plan de contingencia contra incendios. Machetá. 2018.

BENTLEY, Modelación y diseño de sistemas de distribución de agua [en línea]. Pensilvania: [consultado: 19 de octubre de 2019]. Disponible en: <http://academia.edu/>.

BILLINGS, Clayton. How to Calibrate Water Distribution Network Models. [base de datos en línea]. United States. Hanley-Wood LLC. 1997. [consultado: 2 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://search-proquest-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/docview/218857617?accountid=45660>.

CENGEI, yunus CIMBALA, jhon. Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones [base de datos en línea]. New York. The Mcgrawhill companies. 2006. [consultado: 03 de Noviembre 2019]. Disponible en: base de datos ProQuest Ebook Central.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA, constitución de 1991 (4 Julio de 1991. Bogotá, D.C., 1991.

COLOMBIA. MINISTERIO DE VIVIENDA, CIUDAD Y TERRITORIO. Resolución 0330 (8, junio, 2017). Por la cual se adopta el reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico RAS. Bogotá, D.C., 2017.

CRANE, ed. Flujo de fluidos: en válvulas, accesorios y tuberías. [base de datos en línea]. McGraw-Hill Interamericana. [consultado: 19 de Octubre 2019]. Disponible en: base de datos ProQuest Ebook Central

DRINGOLI, Gesse. Usando el Calibrador Darwin. [en línea]. [consultado: 25 de Enero de 2020]. Disponible en: https://communities.bentley.com/products/hydraulics___hydrology/w/hydraulics_and_hydrology___wiki/40028/water-model-calibration-tips

ESPINOSA, Adriana. El agua, un reto para la salud publica la calidad del agua y las oportunidades para la vigilancia en salud ambiental. [en línea]. Bogotá D.C. 2018, Universidad Nacional De Colombia. Facultad de medicina. [Consultado Noviembre de 2019] disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/63280/1/PhD%20Adriana%20J%20EspinosaRamirez.pdf>

HIRREL, Timothy. How not to calibrate a hydraulic network model. (base de datos en línea). United States. American Water Works Association. 2008. [consultado: 2 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://search-proquest-com.ucatolica.basesdedatosezproxy.com/docview/221587456/abstract/F1618208A8364790PQ/1?accountid=45660>.

IDEAM. Estudio Nacional del agua [en línea]. Bogotá D.C. 2015 P64.[Consultado 13 Septiembre 2019] disponible en: http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023080/ENA_2014.pdf

MARTÍNEZ, Andrés y MUÑOS, Diego. Diagnóstico del estado actual y proyectado a un periodo de diseño para la red de acueducto de la zona urbana del municipio de Madrid Cundinamarca. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.

MELANIE. M, Handbook of Genetic Algorithms, Van Nostrand Reinhold, New York. 1991. [en línea]. Bogotá:consultado:22 de Enero de 2020]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/82599838.pdf>

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD (OMS) [en línea] [Consultado Noviembre de 2019] <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>

PANTOJA, Juan y GUERRÓN, Jorge. Propuesta de mejoramiento para la óptima operación del sistema de acueducto del municipio de la Palma Cundinamarca. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. 2018

PERDOMO, Álvaro y GUTIÉRREZ, Oscar. Comprobación en campo, de una modelación asistida por computador para una red hidráulica, caso distrito de riego El Vergel, Mpio Tarqui, Dpto Huila-Colombia. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. 2015

PÉREZ, Rafael. Instalaciones hidrosanitarias y de gas para edificaciones [base de datos en línea].6ª Edición. Bogotá. Ecoe ediciones. 2010.[consultado: 8 de Octubre 2019]. Disponible en: base de datos ProQuest Ebook Central

RODRÍGUEZ, Masiel y RODRÍGUEZ, Jhon. Modelación y evaluación hidráulica del alcantarillado del municipio de Chocontá Cundinamarca, mediante el uso del software EPA SWMM. Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Facultad de ingeniería. 2014.

ROGERS, Dm. Network analysis models - the secret for success.[base de datos en línea]. United Kingdom. IWA Publishing. 2005. [consultado: 03 Noviembre 2019]. Disponible en: <https://search-proquestcom.ucatolica.basesdedatossezproxy.com/central/docview/1943129662/abstract/991D6CDD133F4CCAPQ/1?accountid=45660>

SALAS, Daniel. Evaluación de métodos de inteligencia artificial para la calibración de redes de acueducto. Bogotá, Universidad de los Andes. Facultad de ingeniería. 2003.

SALDARRIAGA, Juan. Metodología de calibración de redes de distribución de agua potable. [en línea]. Bogotá:[consultado:22 de Enero de 2020]. Disponible en:

<https://es.scribd.com/document/48829940/10-Metodologia-Calibracion-Redes-Distribucion-Agua-Potable>

SISA, Augusto. Análisis de Parámetros para la Calibración de Redes de Tuberías con Algoritmos Genéticos. [en línea]. Bogotá D.C. 2003.[Consultado Noviembre de 2019] disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/9133>

VEGA, C, Calibración de Redes de Distribución de Agua Potable con Métodos de Inteligencia Artificial. Bogotá (2007) [en línea]. Consultado: 24 de Enero de 2020. Disponible en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9718/u296088.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ZACARIAS, Santiago GONZALES, Justino, et al. Mecánica de fluidos: teoría con aplicaciones y modelado [base de datos en línea]. 1ª Edición. Ciudad de México. Grupo Editorial Patria. 2017.[consultado: 19 de Octubre 2019]. Disponible en: base de datos ProQuest Ebook Central