



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GERENCIA DE
CONSTRUCCIONES

**Modelación y Calibración del sistema Culebrillas de la ciudad
de Cuenca.**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE CONSTRUCCIONES

Autores:

ANDRÉS SANTIAGO MARTÍNEZ PALACIOS

JORGE FERNANDO PÉREZ PARRA

Director:

ING. JOSUÉ BERNARDO LARRIVA VÁSQUEZ

CUENCA, ECUADOR

2022

DEDICATORIA

El presente trabajo investigativo dedico principalmente a Dios, por ser la fuente de inspiración y la guía necesaria para continuar en este proceso de obtener uno de mis anhelos más deseados. A mis padres José Martínez y Sonia Palacios, los pilares fundamentales en mi vida, con mucho amor y cariño, les dedico todo mi esfuerzo, en reconocimiento a todo el sacrificio puesto, quienes han sido los principales promotores de mis sueños, se merecen esto y mucho más, gracias a ustedes por cada día confiar en mí. Mi madre por ser confidente, compañera y amiga, que con su bendición de cada día me protegía e iluminaba, mi padre por siempre desear y anhelar lo mejor para mi vida, con tus consejos y valores formaste un hombre de bien.

A mis hermanos Christian, Sebastián y Sthefany por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar siempre conmigo en todo momento, me animaban e impulsaban para nunca darme por vencido, en cada uno de ustedes tengo el espejo en el cual me quiero reflejar por sus virtudes infinitas y su gran corazón.

De igual manera dedico a mis abuelos, que me acompañaron en los momentos más importantes, que con un sabio consejo pudieron sacar mi mejor versión, en especial para mi Raquelita y mi gran compañero de vida Pepito, que desde el cielo sé que me sigues acompañando y guiando para cumplir mis sueños; a mis tías Ani y Cumandá que siempre estuvieron apoyándome en este proyecto con sus mejores sentimientos; a todos los miembros de mi familia por toda su ayuda y sus deseos.

Andrés Santiago Martínez Palacios

DEDICATORIA

A mis Padres Fernando y Narcisa, gracias por apoyarme, en cada paso que he dado en mi vida y ser el soporte de la misma, con palabras de aliento y gestos de amor y confianza, por creer en mí, por haberme forjado en la persona que soy.

A mis hermanas Fernanda y Tatiana, gracias por estar presentes en mi vida y ser una guía y ejemplo, inculcando en mí valores de responsabilidad y superación.

A mis sobrinos Jhosue y Romina, son parte fundamental de mi vida, siendo aún tan pequeños aportan mucho en mi vida, con cada gesto de amor, han logrado ocupar un lugar especial en mi corazón.

Una meta más alcanzada gracias a ustedes, quienes han sido mi apoyo y han fortalecido mis ganas de ser profesional, inculcando en mí, valores y principios que cada día me ayudan a ser mejor.

Comienzo mi vida profesional, mis metas y anhelos crecen, sé que cada logro que tenga, estarán ustedes para apoyarme como lo han hecho siempre, es por ello que hoy quiero dedicarles mi titulación.

Jorge Fernando Pérez Parra

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestros más sinceros agradecimientos:

En primer lugar, a nuestro director de tesis, Ing. Josué Bernardo Larriva Vásquez, PhD, por brindarnos la confianza y oportunidad de realizar bajo su tutela el presente proyecto de grado. Por guiarnos en este proceso mediante sus conocimientos, que han sido de gran ayuda con el objetivo de llegar a la calidad y excelencia, la cual se refleja en este proyecto.

A los miembros que conforman el tribunal, el Ing. Javier Fernández de Córdova Webster y la Ing. Belén Arévalo Durazno, por la gran acogida brindada para la culminación de este trabajo de titulación.

A ETAPA EP, a sus miembros y departamentos por las facilidades ofrecidas, en especial a la Ing. Verónica Chumi Buenaño, quien fue parte esencial para el desarrollo de este trabajo, mediante su ética, profesionalismo, paciencia y sabiduría, nos aconsejó en cada uno de los temas que constituyen en este trabajo de titulación.

Al personal que forma parte de la Facultad de Ciencia y Tecnología de la Universidad del Azuay, maestros y amigos, por acompañarnos a lo largo de toda nuestra trayectoria académica, acompañándonos incondicionalmente y estando presente en aquellos recuerdos que nos llevaremos por siempre.

INDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
INDICE DE CONTENIDOS.....	V
INDICE DE FIGURAS	VIII
INDICE DE TABLAS	XI
INDICE DE ANEXOS	XIII
RESUMEN.....	XIV
ABSTRACT.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	1
ANTECEDENTES	2
JUSTIFICACIÓN	2
ALCANCE.....	3
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
CAPÍTULO I	4
1. PROCESAMIENTO Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	4
1.1. Recopilación de información preliminar.....	4
1.1.1. Localización y límites políticos.....	4
1.1.2. Información topográfica.....	5
1.1.3. Zona de estudio.....	6
1.2. Información general	7
1.2.1. Definición de agua potable	7
1.2.2. Definición Catastro de Agua Potable	7
1.2.3. Definición Sistema de Abastecimiento de agua potable	7
1.2.4. Definición Modelación hidráulica	8
1.3. Información catastral.....	9
CAPÍTULO II	10
2. PARÁMETROS DE DISEÑO	10

2.1. Mecánica de Fluidos	10
2.1.1. Hidráulica en las tuberías	10
2.1.2. Ecuación general de la conservación de la energía.....	10
2.1.3. Coeficiente de fricción de Swamee - Jain	11
2.1.4. Coeficiente de fricción de Colebrook - White	11
2.1.5. Fórmula de Darcy - Weisbach	12
2.1.6. Flujo no Permanente	12
2.2. Software CivilCAD 3D: Aplicación.....	12
2.3. Software ArcMAP: Aplicación.	13
2.4. Software WaterGEMS: Aplicación.....	14
CAPÍTULO III	16
3. MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN	16
3.1. Accesorios	16
3.2. ACTUALIZACIÓN CON EL SOFTWARE WATERGEMS.....	16
3.3. Simbología de los elementos hidráulicos de WaterGEMS.....	16
3.3.1. Tanque o depósito de almacenamiento	16
3.3.2. Válvulas de control	16
3.3.3. Válvulas rompe presiones	17
3.3.4. Válvulas de aire.....	17
3.3.5. Válvulas de purga.....	17
3.3.6. Hidrantes.....	17
3.4. Unidades y criterios hidráulicos	18
3.5. Información y propiedades demográficas mediante el software ArcMap ...	19
3.5.1. Sistema de medidores: Usuarios.....	19
3.5.2. Cálculo de los caudales.....	20
3.6. Pasos para el cálculo y la obtención del caudal máximo horario.....	20
3.6.1. Caudal calculado promedio	20
3.6.2. Caudal medio	21
3.6.3. Caudal máximo diario.....	21
3.6.4. Caudal máximo horario	21
3.6.5. Condiciones del factor de mayoración.....	22
3.7 Ingreso de datos de GIS a WaterGEMS	22
CAPÍTULO IV	26
4. LEVANTAMIENTO DE DATOS EN CAMPO	26
4.1. Muestreo.....	26

4.1.1. Método probabilístico estratificado	26
4.1.2. Tamaño de la muestra.....	26
4.1.3. Aplicación del método para los sectores del sistema.....	26
4.2. Levantamiento de información de las presiones en campo.....	27
4.2.1. SECTOR SIGCHOCOCHA	27
4.2.2. SECTOR PAN DE AZUCAR.....	28
4.2.2. SECTOR RACAR.....	29
4.2.4. SECTOR TRINIDAD	30
4.2.5. SECTOR PUMAYUNGA	31
CAPÍTULO V	33
5. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS CON PRESIONES TOMADAS EN CAMPO.....	33
5.1. Método de calibración Manual	33
5.2. Método de calibración por optimización de Rugosidades.....	38
5.3. Método de calibración por optimización de Rugosidades/Demandas.....	42
5.4. Resultados.....	44
5.4.1. Resultados de velocidades.....	44
5.4.3 Resultados de presiones	47
5.4.2. Resultados de calibración	50
CONCLUSIONES.....	55
RECOMENDACIONES.....	56
ANEXOS	58
BIBLIOGRAFIA.....	64

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Sectorización Sistema Culebrillas	4
Figura 1.2. Visualización de las Cartas Topográficas del Sistema Culebrillas escala 1:5000	6
Figura 2.1. Principio de Conservación de la Energía	10
Figura 2.2. Visualización Digital: Sistema Culebrillas en CivilCad 3D	13
Figura 2.3. Visualización Digital: Sistema Culebrillas en Arcgis	14
Figura 2.4 Visualización Digital: Sistema Culebrillas en WaterGEMS	15
Figura 3.1. Lista de Unidades en WaterGEMS	18
Figura 3.2. Sistema de medidores de la red Culebrillas y sus sectores.....	19
Figura 3.3. Ventana TRex Wizard para el ingreso de las elevaciones.....	22
Figura 3.4. Ventana ModelBuilder para el ingreso de las demandas.....	23
Figura 3.5. Ventana Load Builder Wizard para el ingreso de las demandas con los medidores.....	24
Figura 3.6. Ventana con las distintas opciones para el ingreso de las demandas con los medidores	25
Figura 4.1. Interpretación de las muestras en cada uno de los sub-sectores del sector Sigchococha	28
Figura 4.2. Interpretación de las muestras en cada uno de los sub-sectores del sector Pan de Azúcar	29
Figura 4.3. Interpretación de las muestras en cada uno de los sub-sectores del sector Racar	30
Figura 4.4. Interpretación de las muestras en cada uno de los sub-sectores del sector Trinidad.....	31
Figura 5.1. Ventana Calibration Criteria	34
Figura 5.2. Ventana Field Data Snapshots.....	35
Figura 5.3. Ingreso de los datos medidos en campo, Sector Trinidad.....	35
Figura 5.4. Ingreso de los datos medidos en campo, Sector Trinidad.....	36
Figura 5.5. Ingreso de los datos medidos en campo, Sector Trinidad.....	36

Figura 5.6. Ventana Roughness Groups.....	36
Figura 5.7. Ventana Roughness de la calibración manual	37
Figura 5.8. Ventana Field Data de la calibración manual	37
Figura 5.9. Ventana Field Data de la calibración manual	37
Figura 5.10. Ventana Simulated Results.....	38
Figura 5.11. Configuración rugosidad para la simulación Manual	38
Figura 5.12. Configuración rugosidad para la simulación Manual	39
Figura 5.13. Configuración de la lista de opciones.....	40
Figura 5.14. Vista de las soluciones con sus respectivos Fitness para el metodo rugosidad.....	40
Figura 5.15. Vista da la Solution 1 con sus respectivos resultados para el metodo rugosidad.....	41
Figura 5.16. Vista da la Solution 1 con sus respectivos resultados para el método rugosidad.....	41
Figura 5.17. Grupo de demandas ingresadas para la simulación.....	42
Figura 5.18. Vista de las soluciones con sus respectivos Fitness para el método rugosidad/demanda	43
Figura 5.19. Vista da la Solution 1 con sus respectivos resultados para el método rugosidad/demanda	43
Figura 5.20. Vista da la Solution 1 con sus respectivos resultados para el método rugosidad/demanda	44
Figura 5.21. Codificación de colores para los rangos de velocidad en las tuberías.	44
Figura 5.22. Velocidades del sector Sigchococha modificadas por color	45
Figura 5.23. Velocidades del sector Pan de Azúcar modificadas por color	45
Figura 5.24. Velocidades del sector Racar modificadas por color	46
Figura 5.25. Velocidades del sector Trinidad modificadas por color.....	46
Figura 5.26. Velocidades del sector Pumayunga modificadas por color.....	47
Figura 5.27. Codificación de colores para los rangos de velocidad en las tuberías.	47
Figura 5.28. Presiones del sector Sigchococha modificadas por color.....	48

Figura 5.29. Presiones del sector Pan de Azucar modificadas por color.....	48
Figura 5.30. Presiones del sector Racar modificadas por color.....	49
Figura 5.31. Presiones del sector Trinidad modificadas por color	49
Figura 5.32. Presiones del sector Pumayunga modificadas por color	50
Figura 5.33. Calibración Solution 1 método rugosidad/demanda del sector Sigchococha	51
Figura 5.34. Calibración Solution 1 método rugosidad/demanda del sector Pan de Azúcar	51
Figura 5.35. Calibración Solution 1 método rugosidad/demanda del sector Racar..	52
Figura 5.36 Calibración Solution 1 método rugosidad/demanda del sector Racar...	53
Figura 5.37. Calibración Solution 1 método rugosidad/demanda del sector Pumayunga	54

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. División Político - Administrativo	5
Tabla 1.2. Sectores que conforman el Sistema Culebrillas con sus respectivas cartas y escalas	5
Tabla 1.3. Sectores que conforman el Sistema Culebrillas con sus respectivas cartas y escalas	6
Tabla 3.1. Factor o porcentaje de fugas a considerar en el diseño del proyecto; Factor que representa la relación entre el caudal máximo diario y horario al caudal medio.....	20
Tabla 3.2 Condiciones del factor de mayoración	22
Tabla 4.1. Sub-sectorización del sector Sigchococha con respectiva muestra.....	27
Tabla 4.2. Elevación inicial y final del sector Sigchococha.....	27
Tabla 4.3. Información detallada de las presiones tomadas en campo de cada subsector del sector Sigchococha	28
Tabla 4.4. Sub-sectorización del sector Pan de Azúcar con respectiva muestra.....	28
Tabla 4.5. Elevación inicial y final del sector Pan de Azúcar	29
Tabla 4.6. Información detallada de las presiones tomadas en campo de cada subsector del sector Pan de Azúcar.....	29
Tabla 4.7. Sub-sectorización del sector Racar con respectiva muestra	29
Tabla 4.8. Elevación inicial y final del sector Racar.....	30
Tabla 4.9. Información detallada de las presiones tomadas en campo de cada subsector del sector Racar	30
Tabla 4.10. Sub-sectorización del sector Trinidad con respectiva muestra	30
Tabla 4.11. Elevación inicial y final del sector Trinidad	31
Tabla 4.12. Información detallada de las presiones tomadas en campo de cada subsector del sector Trinidad.....	31
Tabla 4.13. Sub-sectorización del sector Pumayunga con respectiva muestra	31
Tabla 4.14. Elevación inicial y final del sector Pumayunga	32
Tabla 4.15. Información detallada de las presiones tomadas en campo de cada subsector del sector Pumayunga.....	32

Tabla 5.1. Diferencia del Grado Hidráulico observado con el calculado del sector Sigchococha	50
Tabla 5.2. Diferencia del Grado Hidráulico observado con el calculado del sector Pan de Azúcar	51
Tabla 5.3. Diferencia del Grado Hidráulico observado con el calculado del sector Pan de Azúcar	52
Tabla 5.4. Diferencia del Grado Hidráulico observado con el calculado del sector Trinidad	53
Tabla 5.5. Diferencia del Grado Hidráulico observado con el calculado del sector Pumayunga	53

INDICE DE ANEXOS

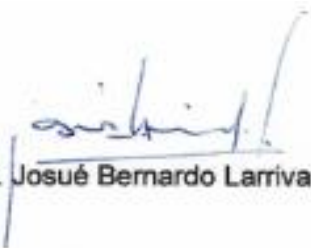
Anexo 1.1. Mapa de Presiones Sigchococha.....	59
Anexo 1.2. Mapa de Presiones Pan de Azúcar.....	59
Anexo 1.3. Mapa de Presiones Racar.....	60
Anexo 1.4. Mapa de Presiones Trinidad	60
Anexo 1.5. Mapa de Presiones Pumayunga	61
Anexo 1.6. Mapa de Válvulas PVR recomendadas Sigchococha.....	61
Anexo 1.7. Mapa de Válvulas PVR recomendadas Pan de Azúcar.....	62
Anexo 1.8. Mapa de Válvulas PVR recomendadas Racar	62
Anexo 1.9. Mapa de Válvulas PVR recomendadas Trinidad	63
Anexo 1.10. Mapa de Válvulas PVR recomendadas Trinidad	63

Modelación y Calibración del sistema Culebrillas de la ciudad de Cuenca.

RESUMEN

El presente proyecto comprende la modelación y calibración del sistema de agua potable de la ciudad de Cuenca "Culebrillas", el cual abastece a cinco sectores Sigchococha, Trinidad, Pan de Azúcar, Racar y Pumayunga. Se recopiló información demográfica, cartográfica y topográfica, además de la información referente a consumos y catastros, proporcionada por parte de la empresa ETAPA EP. Para la ejecución del proyecto se utilizaron diversas herramientas informáticas como AutoCAD y ArcMap para procesar los datos preliminares; y por otra parte el software WaterGEMS para la elaboración, simulación y calibración de los modelos hidráulicos.

Palabras Claves: modelos hidráulicos, calibración, herramientas informáticas, sistema de agua potable, consumos, simulación.



Phd. Josué Bernardo Larriva Vásquez

Director de Tesis



Ing. José Fernando Vázquez Calero

Coordinador de Escuela



Andrés Santiago Martínez Palacios



Jorge Fernando Pérez Parra

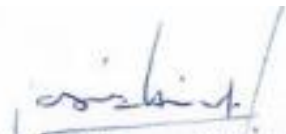
Autores

Modelation and Calibration of Culebrillas system in Cuenca city.

ABSTRACT

In the present project comprises moderation and calibration of the potable water system in the city of Cuenca "Culebrillas" which provides five sectors, Sigchococha, Trinidad, Pan de Azúcar, Racar y Pumayunga. It collected information of demographic, cartographic and topographic; moreover, information about consumptions and cadasters providing for the company ETAPA EP. For the execution of this project is used programs, such as AutoCAD and ArcMap to process the preliminary data and on the other hand WaterGEMS software for elaboration, simulation and calibration of the digital models.

Keywords: hydraulic models, calibration, IT tools, drinking water system, consumption, simulation.



Phd. Josué Bernardo Larriva Vásquez

Thesis Director



Ing. José Fernando Vázquez Calero

School Coordinator



Andrés Santiago Martínez Palacios

Andrés Santiago Martínez Palacios



Jorge Fernando Pérez Parra

Authors



**Translated by
Sthefany Martínez**

Andrés Santiago Martínez Palacios

Jorge Fernando Pérez Parra

Trabajo de Titulación

Phd. Josué Bernardo Larriva Vásquez

Marzo, 2022

Modelación y Calibración del sistema Culebrillas de la ciudad de Cuenca.

INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable resulta indispensable para el desarrollo y el buen vivir de la sociedad, de esta manera los gobiernos y empresas municipales se encargan de la distribución y suministro de este servicio mediante redes de abastecimiento, las cuales deben cumplir con un adecuado funcionamiento, es decir, el líquido vital debe trasladarse desde la fuente hasta la vivienda de cada usuario asegurando así una dotación mínima.

A medida que el tiempo avanza, la población crece y las redes de los distintos sistemas de distribución se extienden, por lo tanto, dichos modelos necesitan ser monitoreados, revisados y calibrados. Las nuevas herramientas tecnológicas permiten incorporar y representar las condiciones actuales de las redes mediante softwares especializados en modelos hidráulicos.

El estudio servirá para la actualización y modelación de las redes del sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Cuenca "Culebrillas" a cargo de la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento - ETAPA EP. Se recopilará y levantará información relevante de los cinco sectores que constituyen el sistema: Sigchococha, Trinidad, Pan de Azúcar, Racar y Pumayunga. Además, se realizarán simulaciones que reflejen el comportamiento hidráulico de las redes de cada sector, con la finalidad de analizar los resultados; de esta manera se brindará a la empresa la oportunidad de evaluar posibles soluciones y alternativas en el futuro, a fin de garantizar un servicio continuo y de calidad a la comunidad.

Antecedentes

Según la Constitución de la República del Ecuador (2008): “El derecho humano al agua es fundamental e irrenunciable. El agua constituye patrimonio nacional estratégico de uso público, inalienable, imprescriptible, inembargable y esencial para la vida.” (p. 13)

La empresa ETAPA EP cuenta con 33 reservas ubicadas en lugares estratégicos los cuales garantizan la continuidad del servicio de Agua Potable, estos tienen una capacidad total de 120.000 metros cúbicos de reserva para la ciudad. La cobertura que alcanza a tener las redes de distribución de agua potable en la parte urbana es de 96 %, en cambio para la zona rural la cobertura llega a tener un 88% de alcance. (ETAPA EP, 2022)

El principal afluente del río Tomebamba es el conocido río Sayausí o también llamado río Culebrillas, el cual durante los años 1949 hasta 1970 era la fuente de abastecimiento de la Ciudad de Cuenca. La planta de tratamiento Culebrillas es la que abastece de agua potable a todo el sistema que lleva su mismo nombre, con una capacidad de 150 l/s de caudal que puede ocuparse. La planta beneficia a todo el sector Noroccidente de la ciudad de Cuenca que se encuentran a un nivel superior de la planta de El Cebollar. (Avila, 2013)

El Código de ética de la empresa Etapa EP menciona: “La Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Cuenca –ETAPA EP-, tiene como principal objetivo la provisión de servicios públicos básicos con criterios de eficiencia, racionalidad y rentabilidad social, contribuyendo al mejoramiento de la calidad de vida de la población dentro de su área de acción.” (p. 9)

Justificación

Este trabajo busca la actualización y calibración de los datos hidráulicos del modelo digital, para el sistema de abastecimiento de agua potable Culebrillas; el cual abarca los sectores Pan de Azúcar, Pumayunga, Racar, Sigchococha y Trinidad. El objetivo principal del proyecto radica en calibrar los modelos hidráulicos, para asegurar que exista una mejora en la calidad y en la continuidad de la prestación del servicio de agua potable, es decir, mediante los respectivos estudios hidráulicos como la investigación de la distribución y crecimiento poblacional, los análisis topográficos y de suelo en cada sector.

Por lo tanto, con los parámetros anteriormente mencionados se pretende garantizar que los niveles de servicio sean los óptimos; esto se logrará mediante las evaluaciones generales del sistema, las cuáles permitirán efectuar futuras planificaciones. Por lo que es muy importante y necesario la implementación de este tipo de proyectos; mediante la utilización del software y modelos digitales basados en algoritmos; con los cuales se puede garantizar una gran mejora en la red de distribución permitiendo así, que el funcionamiento hidráulico de las tuberías del sistema sea el esperado.

Estamos seguros de que la ejecución del modelo será de considerable utilidad, para una correcta gestión de la Institución encargada de los servicios básicos en el Cantón.

Alcance

La información cartográfica, topográfica y catastral recopilada en el desarrollo del proyecto resulta fundamental para la creación de los modelos digitales hidráulicos; con la cual se consigue que dichos modelos estén actualizados permitiendo así evaluar las redes de abastecimiento de agua potable del sistema “Culebrillas” y brindando la posibilidad de futuros estudios, planificaciones y proyectos que garanticen la calidad del servicio a todos los usuarios.

Objetivo general

- Establecer un modelo digital actualizado para la red de distribución de agua potable del sistema Culebrillas. Con el fin de conseguir una adecuada calibración mediante la utilización del software WATERGEMS.

Objetivos específicos

- Evaluar los datos obtenidos en el levantamiento de información de las redes del sistema, es decir, diámetros, materiales y caudal de consumo; al igual que las pérdidas de este y las presiones en las tuberías.
- Generar mediante una simulación de la red calibrada un modelo que refleje la funcionalidad del sistema de distribución Culebrillas.
- Formular una propuesta que garantice actualizar el sistema de abastecimiento de agua Culebrillas, para que de esta manera sirva como base de futuros proyectos por parte de la empresa ETAPA E.P.

CAPÍTULO I

1. PROCESAMIENTO Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

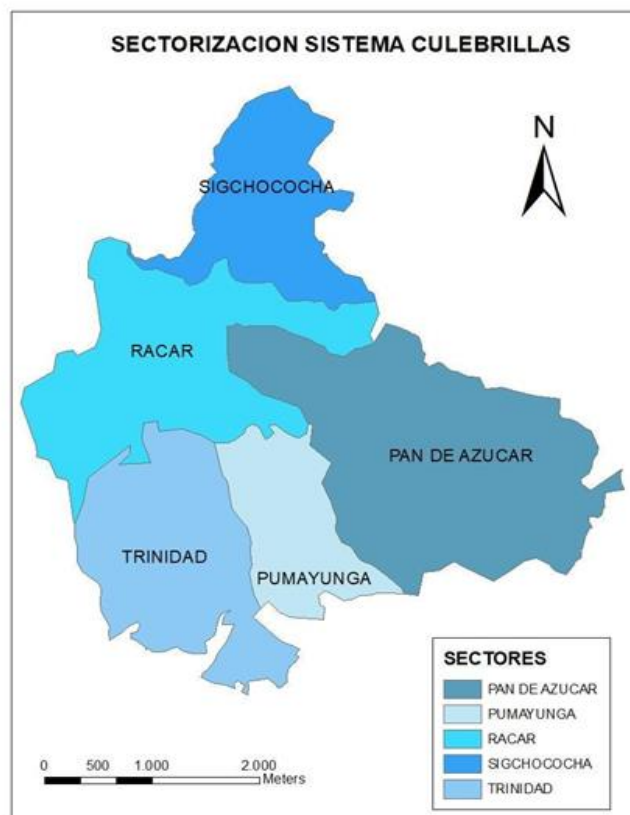
1.1. Recopilación de información preliminar

1.1.1. Localización y límites políticos

El proyecto tomará lugar en las parroquias Sayausí y Chiquintad del Cantón Cuenca. El sistema se encuentra ubicado al noreste de la Ciudad de Cuenca, a 15 km de la misma. Limita al norte con las parroquias Chiquintad y San Antonio de Cañar, al Sur con la parroquia Sayausi y el cantón Cuenca, al este con la parroquia Chiquintad y al oeste con la parroquia Sayausí.

Estas parroquias poseen 2 tipos de clima en su mayor parte del territorio, Climático Frío Andino y Templado Interandino, ya que se encuentran entre los 2.500 y 4.700 m.s.n.m.

Figura 1.1.
Sectorización Sistema Culebrillas



Nota. Datos obtenidos de la Empresa Publica ETAPA EP.

La Microcuenca perteneciente al Río Culebrillas posee un área total de 6077.49 Ha. Se encuentra ubicada en la provincia del Azuay, en las parroquias de Sayausí y Chiquintad, y en la provincia del Cañar, en la parroquia San Antonio. La parroquia de Sayausí representa la mayor parte del área total y resulta la más importante e influyente en el proyecto.

Tabla 1.1.
División Político - Administrativo

DIVISIÓN POLÍTICO - ADMINISTRATIVO	
Parroquia	Área (Ha)
Chiquintad	119.441
Cuenca	1.772
San Antonio	0.188
Sayausí	5956.05
TOTAL	6077.45

Nota. Datos obtenidos de la Empresa Publica ETAPA EP.

1.1.2. Información topográfica

Para la actualización del modelo hidráulico es necesario tener en cuenta la planimetría, así como los datos altimétricos; de esta manera en el software WaterGems se procede hacer la modelación en donde se podrá identificar la dirección del flujo del agua, determinar cuáles son las pendientes de cada una de las tuberías, las presiones, los caudales y velocidades que se van a establecer en cada nodo de la red. La información topográfica fue obtenida de la empresa pública ETAPA EP.

A continuación, se puede observar la tabla en donde se detallan los nombres de los sectores con sus respectivas escalas topográficas.

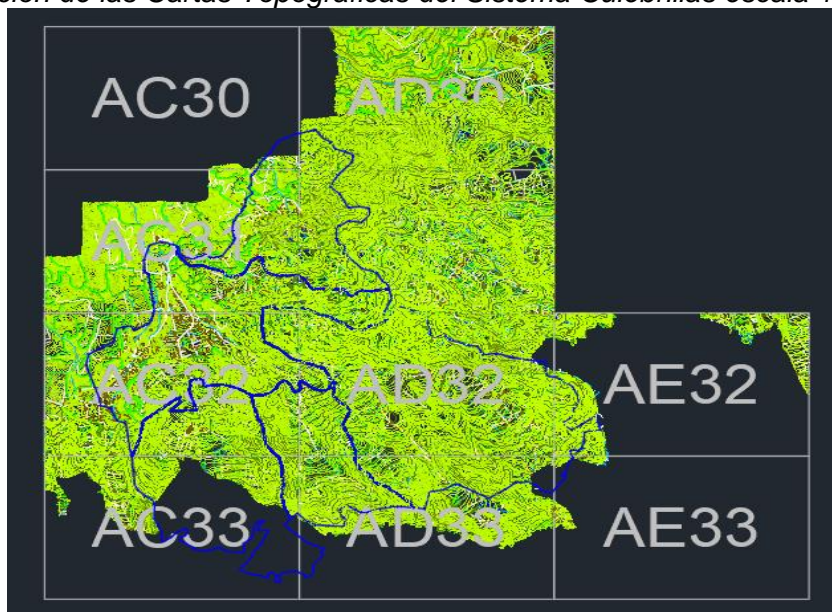
Tabla 1.2.
Sectores que conforman el Sistema Culebrillas con sus respectivas cartas y escalas

SECTOR	CARTAS	ESCALA
PAN DE AZÚCAR	AC31, AC32, AD31, AD32, AD33, AE32, AE33	1:5000
PUMAYUNGA	AC32, AC33, AD32, AD33	1:5000
RACAR	AC31, AC32, AD31, AD32	1:5000
SIGCHOCOCHA	AC30, AC31, AD30, AD31	1:5000
TRINIDAD	AC32, AC33, AD33	1:5000

Nota. Datos obtenidos de la Empresa Publica ETAPA EP.

Figura 1.2.

Visualización de las Cartas Topográficas del Sistema Culebrillas escala 1:5000



Nota. Datos obtenidos de la Empresa Publica ETAPA EP.

1.1.3. Zona de estudio

El consumo del servicio de agua potable por parte de los usuarios se mide con respecto a la cantidad de agua que se consume en un período de tiempo determinado, dicha cantidad se puede observar en los datos de las lecturas de medidores, esta información se obtuvo de ETAPA EP. En este caso se mide en (Litros / Segundo).

El siguiente cuadro muestra el consumo de los usuarios y el número de medidores actuales con respecto a cada sector del sistema.

Tabla 1.3.

Sectores que conforman el Sistema Culebrillas con sus respectivas cartas y escalas

SECTOR	CONSUMO (l/s)	NÚMERO DE MEDIDORES ACTUALES
SIGCHOCOCHA	2.966	416
TRINIDAD	39.991	2882
PAN DE AZÚCAR	32.07	2766
RACAR	16.895	1424
PUMAYUNGA	4.339	399
TOTAL	96.261	7887

Nota. Datos obtenidos de ETAPA EP.

1.2. Información general

1.2.1. Definición de agua potable

El agua potable se define como el suministro del líquido vital que no ocasiona riesgos significativos en la salud al momento de consumirlo durante toda una vida y deberá ser adecuada para todos los usos domésticos habituales, incluyendo la higiene personal. (Organización Mundial de la Salud, 2011)

1.2.2. Definición Catastro de Agua Potable

“El Catastro Técnico de agua potable y saneamiento, es el documento fuente de los activos que posee ETAPA EP, y que constituye la herramienta fundamental para operación y mantenimiento, por lo que es indispensable la estandarización de la información.” (ETAPA EP - Subgerencia de Operaciones de Agua Potable y Saneamiento, 2022)

1.2.3. Definición Sistema de Abastecimiento de agua potable

Un sistema de distribución transporta el agua desde la etapa de tratamiento, el tanque o reservorio hasta la conexión de servicio para los usuarios. La red debe dotar de agua potable a todo el sistema manteniendo la cantidad, continuidad y calidad de la misma; así también, debe mantener las presiones adecuadas y requeridas tanto en los nodos, como en las distintas válvulas que constituyen el sistema. (Bhardwaj & Metzgar, 2005)

Además, se deben acatar las siguientes especificaciones las mismas que deben ser evaluadas en el sistema- estipuladas en la normativa vigente:

- **Almacenamiento:** Según el Instituto Ecuatoriano de Normalización (2014) La capacidad de almacenamiento deberá ser del 50% del volumen medio diario futuro, pero en ningún caso, será inferior a 10 m³.
- **Fuente de Abastecimiento:** La fuente tiene que asegurar un caudal mínimo de 2 veces el caudal máximo diario futuro calculado. (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2014)
- **Caudal:** Es importante tener en consideración que para redes de distribución el caudal de ser el máximo diario, teniendo en cuenta que se produce al final del periodo al cual fue diseñado más el de incendio y se verificarán las presiones en campo de la red, dando como resultado el

caudal máximo horario al del periodo establecido ((Código Ecuatoriano de la Construcción CO 10.07-601, 2012)

- **Velocidades:** Las velocidades destinadas a la conducción de agua no tienen que producir erosión de la solera y paredes en la tubería y además que impida la sedimentación de algunos materiales que sean transportados por el agua. Se escogen por el tipo de material donde las cantidades oscilan entre 0.4m/s a 3 m/s y se recomienda desde un punto de vista económico que la velocidad tenga 1.5 m/s. (Código Ecuatoriano de la Construcción CO 10.07-601, 2012)
- **Presión:** Según el Código Ecuatoriano de la Construcción CO 10.07-601 (2012) se debe tener en cuenta los siguientes parámetros. En casos de tener nodos y condiciones desfavorables la presión mínima que se debe considerar es de 10 m.c.a., por otro lado, para abastecer la grifería pública la presión mínima requerida es de 5 m.c.a. Otra consideración que se debe adoptar en cuenta es la presión estática y dinámica, el valor máximo que debe alcanzar es de 70 m.c.a y 50 m.c.a respectivamente.
- **Diámetros:** En las mallas principales de la red de distribución y en los rellenos, los diámetros de las tuberías se escogerán –existentes en el comercio- los más cercanos a los que se obtuvieron en los cálculos hidráulicos. Sin embargo, en el caso de que se necesite instalar bocas de fuego o un hidrante el diámetro seleccionado deberá ser como mínimo el correspondiente a estos artefactos. (Código Ecuatoriano de la Construcción CO 10.07-601, 2012)
- **Pérdidas de carga:** En obras de conducción el estudio hidráulico debería tomar en cuenta las pérdidas localizadas y por fricción, se debería hacer el cálculo de las pérdidas por carga localizada producidas por compuertas, transiciones, rejillas, cambios de dirección, válvulas, cambios de sección, además estas deben asumirse refiriéndose a la comparativa técnico-económica de las variantes. (Código Ecuatoriano de la Construcción CO 10.07-601, 2012)

1.2.4. Definición Modelación hidráulica

“Un modelo es una abstracción de la realidad, en la que se establecen relaciones para tratar de entender el comportamiento de un fenómeno. La representación de un sistema real a través de un modelo parte de ciertas inferencias y emplea información a diferentes escalas para entender el comportamiento del fenómeno de

interés.” (IDEAM, 2018. PROTOCOLO DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA, pág. 8. Bogotá, D.C.)

1.3. Información catastral

Para la elaboración del modelo hidráulico del sistema Culebrillas se necesitó el catastro de las redes del sistema de agua potable, que fue necesario para identificar la red antigua; de esta manera también se pudieron aumentar los nuevos ramales que se asignaron en los últimos años o eliminar los que no estaban en funcionamiento. Dicha información fue obtenida del departamento de catastros de la empresa pública ETAPA EP.

El principal beneficio de los catastros es aquel que permite identificar las características de la red de distribución; como las siguientes: material, componentes, longitud, diámetro y accesorios; información indispensable para la modelación hidráulica y para establecer los correctivos de funcionamiento del sistema de abastecimiento de agua potable.

CAPÍTULO II

2. PARÁMETROS DE DISEÑO

2.1. Mecánica de Fluidos

2.1.1. Hidráulica en las tuberías

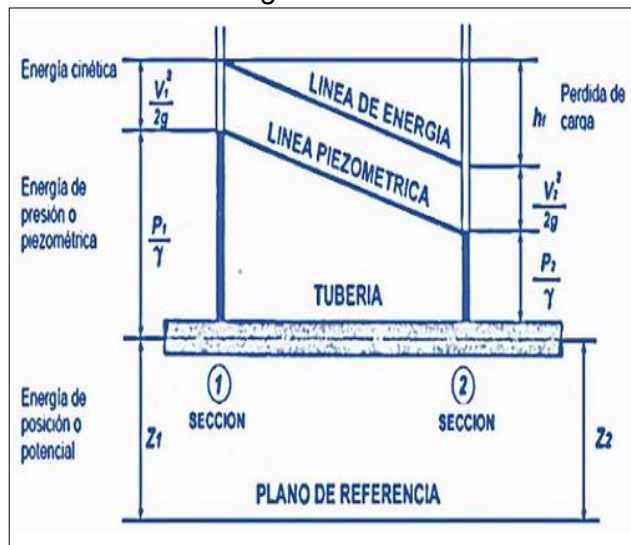
Se denomina hidráulica a aquella rama de la mecánica de fluidos, la cual estudia las propiedades mecánicas que poseen los líquidos. De esta manera, existe la posibilidad de realizar diseños de sistemas de tuberías que permiten conducir el agua fácilmente, mediante el análisis de las fuerzas que actúen y las condiciones a las cuales se encuentre sometido dicho fluido.

2.1.2. Ecuación general de la conservación de la energía

Para el año 1738, Daniel Bernoulli publicó la obra “hidrodinámica”, la cual consideraba las propiedades más relevantes de un fluido como la densidad, presión y velocidad, así como su relación fundamental conocida como la teoría dinámica de los fluidos. Según Cotos Morales (2019) en su libro Mecánica de Fluidos señala que el principio de Bernoulli consiste que la energía mecánica total por unidad de peso se mantiene en todo el filamento de corriente dependiendo si el régimen es permanente.

Figura 2.1.

Principio de Conservación de la Energía



Nota. Datos obtenidos de la Empresa Publica ETAPA EP.

$$Z_s + \frac{P_s}{\gamma} + \frac{V_s^2}{2g} = Z_i + \frac{P_i}{\gamma} + \frac{V_i^2}{2g} + h_f \quad (1)$$

Dónde:

Z = Elevación (m)

P = Presión (kPa)

γ = Peso específico del agua (kN/m³)

V = Velocidad media (m/s)

g = Gravedad (m/s²)
(N*n/N)

hf = Pérdida de carga por rozamiento

2.1.3. Coeficiente de fricción de Swamee - Jain

Para el cálculo del factor o el coeficiente de fricción el programa WaterGEMS utiliza la fórmula de Swamee-Jain, el cual es utilizado para el análisis de un régimen turbulento rugoso, que se muestra a continuación.

$$f = \frac{0.25}{[\log(\frac{s/D}{3.7} + \frac{0.54}{Re^{0.9}})]^2} \quad (2)$$

Dónde:

f = Factor de Fricción Swamee-Jai

s = Medida del tamaño de las proyecciones de la rugosidad

D = Diámetro

Re = Numero de Reynolds

- Flujo laminar: Re < 2000
- Flujo turbulento: Re > 4000

Los errores involucrados en el factor de fricción siempre fueron menores que el 1%, en el presente estudio, lo cual se constata en la modelación. Varios programas comerciales utilizan esta ecuación en conjunto con la de Darcy.

2.1.4. Coeficiente de fricción de Colebrook - White

El programa WaterGEMS realiza una iteración para obtener un coeficiente de fricción más ajustado utilizando la ecuación de Colebrook and White que se muestra a continuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -0.869 \ln \left(\frac{s/D}{3.7} + \frac{0.54}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (3)$$

Dónde:

f = Factor de Fricción Swamee-Jain

D = Diámetro

s = Medida del tamaño de las proyecciones de la rugosidad

Re = Numero de Reynolds

Se utiliza los siguientes valores para los diferentes tipos de flujos:

- Flujo laminar: $Re < 2000$.
- Flujo turbulento: $Re > 4000$.

2.1.5. Fórmula de Darcy - Weisbach

Es una ecuación empírica ampliamente conocida que determina la pérdida de carga debido a la disipación de energía en forma de fricción. Esta fricción es el resultado de la interacción entre el fluido y su estructura conductora, o tubería (Ladino Moreno , García Ubaque, & García Vaca, 2019). WaterGems para obtener las pérdidas de carga utiliza la siguiente ecuación:

$$h = f \frac{LV^2}{D2g} \quad (4)$$

Dónde:

h = Pérdida de carga

f = Factor de fricción

L = Longitud

V = Velocidad

D = Diámetro

g = Gravedad

2.1.6. Flujo no Permanente

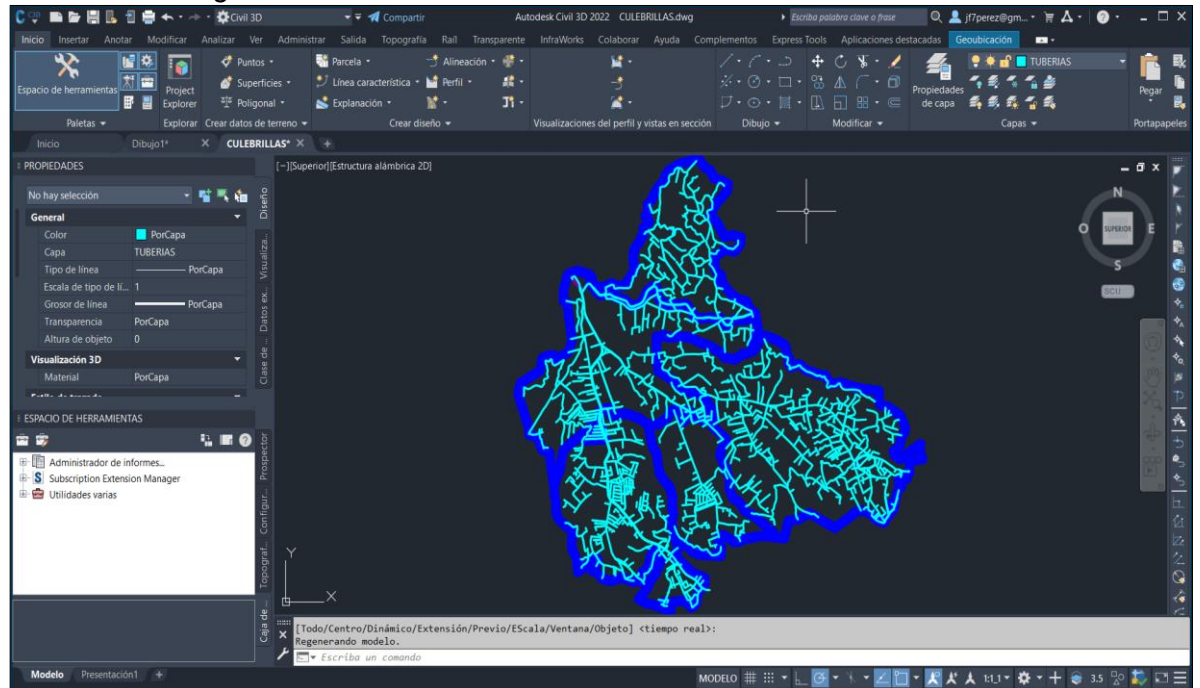
Un sistema de distribución de agua potable puede variar a lo largo del día dependiendo de los requerimientos solicitados y utilizados por los usuarios, generando pérdidas o incrementos en las presiones. Debido a ello, resulta necesario realizar un modelo dinámico, para establecer un pronóstico que refleje con proximidad, la realidad respecto al consumo de todos los usuarios en cada hora del día.

2.2. Software CivilCAD 3D: Aplicación.

El programa CivilCAD 3D permite mediante sus herramientas, la creación del modelo de la red de distribución del sistema Culebrillas. Por medio de este, se pueden importar los catastros previos de la ciudad de Cuenca, almacenados y proporcionados por la empresa ETAPA EP; con esta información es posible

determinar valores que estén conformes a la realidad y a la constitución de todas las tuberías pertenecientes al sistema, para posteriormente iniciar con la construcción del modelo digital de la red.

Figura 2.2.
Visualización Digital: Sistema Culebrillas en CivilCad 3D



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del CivilCad 3D

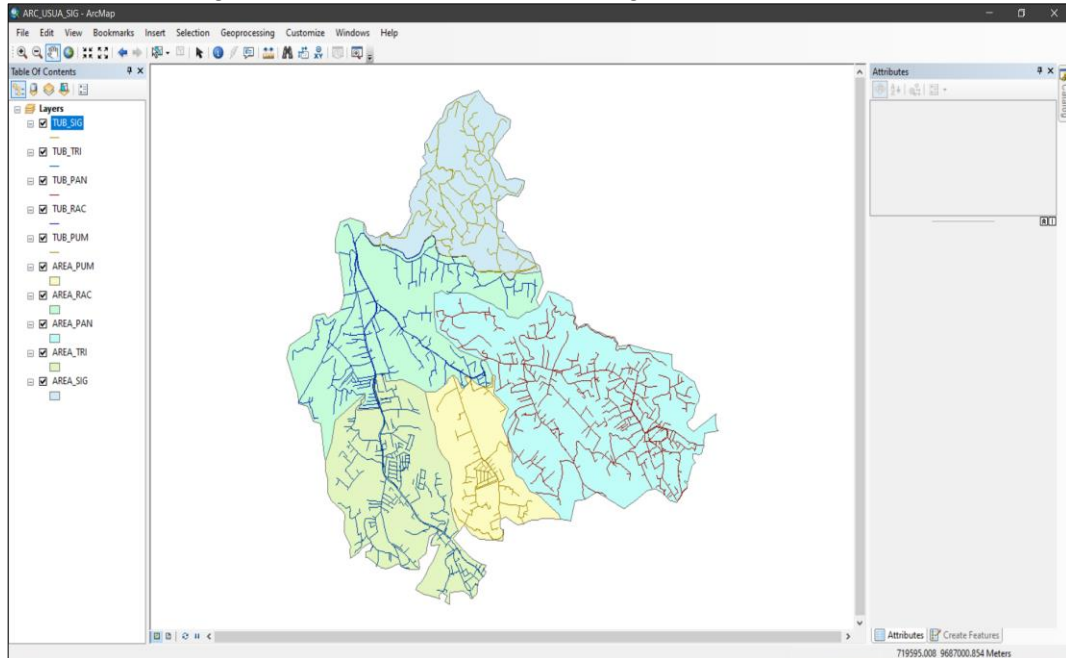
2.3. Software ArcMAP: Aplicación.

El software ArcMAP es un sistema capaz de organizar, recopilar, compartir, distribuir y analizar información ligada a la geografía, la herramienta ha servido para poner el conocimiento geográfico al servicio de sectores como la ciencia, el gobierno, la educación y la empresa. Una de las mayores ventajas que posee esta herramienta es que la información puede estar accesible en cualquier parte del mundo se puede utilizar en smartphones, equipos de escritorio o en navegadores. (ESRI, 2022)

Una de las herramientas que más se utilizó en la modelación del sistema Culebrillas fueron los shapefiles, que no es más que un formato no topológico y sencillo para guardar información de atributos de la red y la ubicación geométrica. Se puede decir que estas entidades geográficas se representan por medio de polígonos, líneas o puntos. Además, los shapefiles tienen la capacidad de incluir tablas de dBase, en donde se almacenan datos adicionales las cuales se pueden vincular con las entidades de un shapefile. (ESRI, ArcMAP, 2022)

A continuación, se va a mostrar la interfaz del software con sus principales herramientas:

Figura 2.3.
Visualización Digital: Sistema Culebrillas en Arcgis



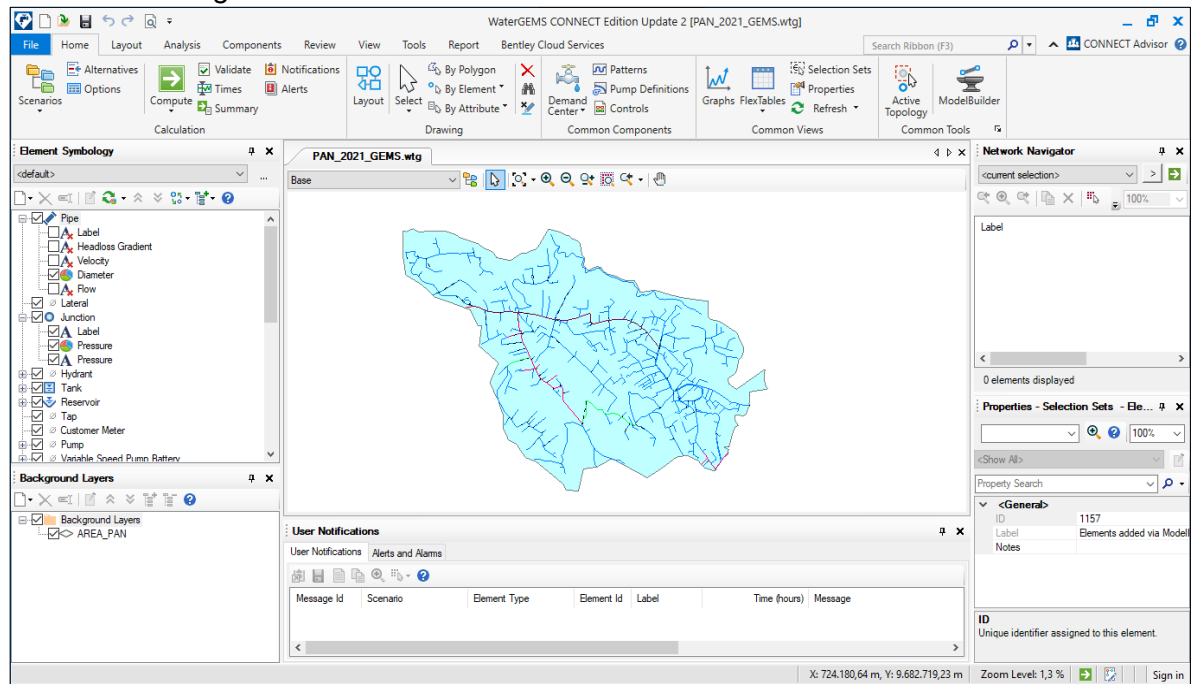
Nota. Datos obtenidos de la Interfaz de Arcgis

2.4. Software WaterGEMS: Aplicación.

El software WaterGEMS es un utilitario que facilita la toma de decisiones para aquellos profesionales que realicen diseños, operación y planificación para la distribución correcta de agua. Una de sus mayores ventajas de esta herramienta es identificar el comportamiento de la infraestructura, también verifica como debe ser su crecimiento debido a factores como la población y las demandas, adicionalmente muestra cómo se debería reaccionar ante las estrategias operativas. (Bentley, 2022)

En la siguiente figura se muestra la interfaz del programa:

Figura 2.4
Visualización Digital: Sistema Culebrillas en WaterGEMS



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

CAPÍTULO III

3. MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN

3.1. Accesorios

Se denominan accesorios a aquellas estructuras utilizadas en las redes de distribución para facilitar las conexiones entre las diferentes tuberías en el transporte del líquido. Además, son utilizados para proporcionar soluciones a problemas hidráulicos que impidan el correcto funcionamiento del sistema.

3.2. Actualización con el software WaterGEMS

Con la nueva información catastral que se ha registrado de los sectores que conforman el sistema Culebrillas, se procede a la actualización de los datos con la ayuda del software Watergems.

3.3. Simbología de los elementos hidráulicos de WaterGEMS

Dentro de la red de distribución existen los siguientes elementos hidráulicos: tanque de almacenamiento, tuberías, válvulas, hidrantes y reductores de presiones; y se representan de la siguiente manera:

3.3.1. Tanque o depósito de almacenamiento

Son aquellos depósitos de tipo cerrado, los cuales contienen almacenada la cantidad de agua necesaria para cubrir y satisfacer la demanda variable en el tiempo del consumo de los usuarios, para cada sector que comprende el sistema. (Código Ecuatoriano de la Construcción CO 10.07-601, 2012)

Simbología:



3.3.2. Válvulas de control

Son aparatos que tienen como objetivo la regulación del caudal y la velocidad de un fluido, siendo el último elemento en un lazo de control instalado en una línea de proceso, que tiene un comportamiento como un orificio, donde la sección de paso varía continuamente con el objetivo de controlar un caudal. (Gutiérrez Hinestroza & Iturralde Kure, 2017)

Simbología:



3.3.3. Válvulas rompe presiones

La función que cumple esta válvula es de asegurar el control que está independiente de la carga de los tanques de reserva, haciendo que los movimientos bruscos con los que llega el agua a ciertos puntos los transforma a un movimiento tolerable, rigiéndose al control de presión con el que estaba diseñado el proyecto. (Universidad Politécnica de Catalunya, 2004)

Simbología:



3.3.4. Válvulas de aire

Las válvulas de aire funcionan tanto para la admisión como para la expulsión de aire, resaltando en los puntos de mayor carga o cabeza hidráulica, contribuyendo en la reducción de inconvenientes en la red, tales como: golpe de ariete, cavitación, menor caudal de agua, disminución de la sección transversal útil de la tubería, incremento en las pérdidas, aumento de corrosión y la posibilidad de ruptura de la tubería. (Heiler, 1999)

Simbología:



3.3.5. Válvulas de purga

“Válvula ubicada en los puntos más bajos de la red o conducción para eliminar acumulación de sedimentos.” (Tixe, 2004)

Simbología:



3.3.6. Hidrantes

El objetivo de la instalación de un hidrante es proporcionar una conexión a la red de distribución de agua potable, que permita a los bomberos conectar un equipo contra incendios, estos deben instalarse a una distancia de 200 metros entre ellos, considerando el número de personas a las que va a beneficiar este aparato. (Ministerio de Inclusion Econimica y Social , 2009)



3.4. Unidades y criterios hidráulicos

Para iniciar la modelación en el programa *WaterGEMS*, se deben constituir los criterios con los que se va a evaluar y las unidades de medida con las que se ingresarán las elevaciones y caudales, además verificando los datos que el programa calculará como la velocidad (m/s), pérdidas unitarias (m/km) y flujo (l/s), a continuación, se va a mostrar los pasos para hacer los cambios respectivos:

- Identificar en la barra de herramientas la opción *tools*.
- Luego seleccionamos la ventana *options*.
- Finalmente hacemos click en *units*.

Las unidades del programa están seteadas en el sistema inglés, por lo tanto, hay que cambiar al sistema internacional como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 3.1.
Lista de Unidades en WaterGEMS

	Label	Unit	Display Precision	Format
1	Absolute Roughness	mm	5	Number
2	Angle	radians	2	Number
3	Area	m ²	1	Number
4	Area - Large	km ²	2	Number
5	Area - Medium	ha	3	Number
6	Background Layer Unit	m	0	Number
7	Break Rate	breaks/yr/km	3	Number
8	Bulk Reaction Rate	(mg/L) ⁽¹⁻ⁿ⁾ /da	3	Number
9	Capita	L/capita/day	2	Number
10	Coefficient		3	Number
11	Concentration (Bulk)	mg/L	1	Number
12	Concentration (Wall)	mg/m ²	2	Scientific
13	Coordinate	m	2	Number
14	Coordinate (Latitude, Longitu...		5	Number
15	Cost per Unit Energy	\$/kWh	2	Number
16	Cost per Unit Power	\$/kW	1	Number
17	Cost per Unit Volume	\$/ML	0	Number
18	Count (Bulk)	Count/L	0	Number
19	Count (Wall)	Count/m ²	0	Number
20	Culvert Coefficient		4	Number
21	Currency	\$	2	Number
22	Currency - Large	\$	0	Number

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

3.5. Información y propiedades demográficas mediante el software ArcMap

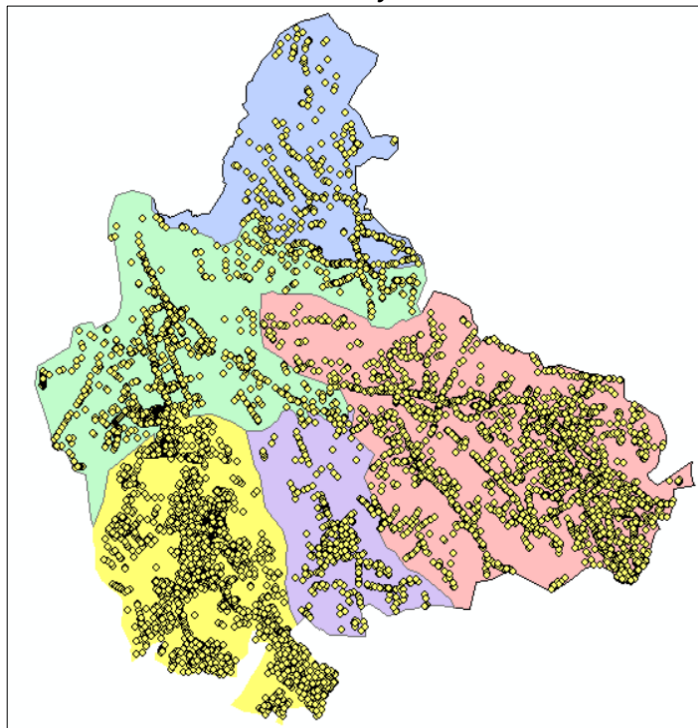
Para el cálculo de caudales es primordial contar con la información demográfica necesaria en cada uno de los sectores del proyecto, la cual será trabajada en el software ArcMap mediante los datos que serán proporcionados por la empresa ETAPA EP. Además, para obtener los caudales mencionados, se realizará una lectura correspondiente al sistema de medidores en donde se encuentran sujetos todos los usuarios de la red.

3.5.1. Sistema de medidores: Usuarios

El mapeo del sistema de medidores, proporcionado por la empresa ETAPA EP mediante un archivo en formato (.shp), facilita el manejo de la información con precisión referente a la lectura del número de usuarios pertenecientes a la red de agua potable en cada uno de los sectores que constituyen el sistema Culebrillas. El archivo cuenta con información acerca de los medidores, en la tabla de atributos se muestra el consumo mensual y su ubicación exacta en cada sector.

Figura 3.2.

Sistema de medidores de la red Culebrillas y sus sectores



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

3.5.2. Cálculo de los caudales

Luego de haber realizado la proyección de las poblaciones con el sistema de medidores para todos los sectores, mediante el dato de instalaciones promedio (INLPROME) que se encuentra en el archivo de formato shape, se determinó el caudal (l/s) para cada uno de los sectores.

A partir de dicho caudal, se determina el caudal medio (Q_m), el caudal máximo diario (QMD) y el caudal máximo horario (QMH).

Tabla 3.1.

Factor o porcentaje de fugas a considerar en el diseño del proyecto; Factor que representa la relación entre el caudal máximo diario y horario al caudal medio

FACTOR	VALOR
f	1.2
KMD	1.25
KMH	1.82

Nota. Datos obtenidos de la Empresa Publica ETAPA EP.

Donde:

f = Representa el factor o porcentaje de fugas a considerar en el diseño del proyecto.

KMD = Factor que representa la relación entre el caudal máximo diario al caudal medio.

KMH = Factor que representa la relación entre el caudal máximo horario al caudal medio.

3.6. Pasos para el cálculo y la obtención del caudal máximo horario

3.6.1. Caudal calculado promedio

Se debe calcular con la siguiente fórmula:

$$Q_d = \frac{(\sum \text{Instalaciones promedio}) \times \text{factor de incremento} \times 1000}{30 \times 86400} \quad (5)$$

Donde:

Q_d = Caudal calculado promedio (l/s)

Instalaciones promedio = Representa el valor de consumo promedio mensual por medidor

3.6.2. Caudal medio

Se debe calcular con la siguiente fórmula

$$Q_m = Q_d \times f \quad (6)$$

Donde:

Q_m = Caudal medio (l/s)

Q_d = Caudal calculado promedio (l/s)

f = factor de fugas

3.6.3. Caudal máximo diario

Se debe calcular con la siguiente fórmula:

$$Q_{MD} = K_{MD} \times Q_m \quad (7)$$

Donde:

Q_{MD} = Caudal máximo diario (l/s)

K_{MD} = Factor de mayoración máximo diario

Q_m = Caudal medio (l/s)

3.6.4. Caudal máximo horario

Se debe calcular con la siguiente fórmula:

$$Q_{MH} = K_{MH} \times Q_m \quad (8)$$

Donde:

Q_{MH} = Caudal máximo horario (l/s)

K_{MH} = Factor de mayoración máximo horario

Q_m = Caudal medio (l/s)

Al caudal calculado se le multiplica por un factor de mayoración de los sectores analizados, el cual indica el incremento poblacional de cada uno de los sectores.

3.6.5. Condiciones del factor de mayoración

Se deberá elegir el factor de mayoración de cada uno de los periodos analizados que permita determinar el caudal máximo horario, dependiendo del rango en que este se encuentre. (ETAPA EP, 2022)

Tabla 3.2

Condiciones del factor de mayoración

$F_m \leq 1$	Consumo de medidores
$1 < FM < 2$	Consumo mayorado de medidores
$FM \geq 2$	Redistribución

Nota. Datos obtenidos de ETAPA EP.

3.7 Ingreso de datos de GIS a WaterGEMS

Las cartas topográficas que fueron proporcionadas por ETAPA EP de la ciudad de Cuenca están realizadas en el formato .dxf las cuales serán exportadas con la ayuda del programa *CivilCAD 3D*, de esta manera podremos cargar el modelo hidráulico de toda la red del sistema Culebrillas, en la barra de herramientas del programa antes mencionado se escoge la opción denominada *TRex Wizard* y se realizarán los siguientes pasos:

Figura 3.3.

Ventana TRex Wizard para el ingreso de las elevaciones

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

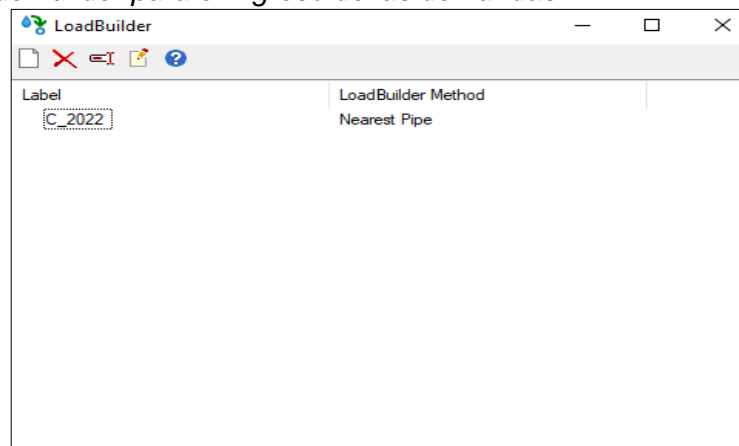
- En la opción de Data Source Type: DXF Contours
- En la opción File: Se procede a identificar el archivo .dxf correspondiente a la carta topográfica del sector que se va a analizar.
- En la opción Spatial Reference: Se selecciona los datos de la elevación proporcionados en el catastro Unknown Select Elevation Field: se selecciona las unidades con las que se va a exportar Elevation X-Y Units: m.
- En la opción Z Units: Se elige las unidades en las coordenadas z en este caso m.

Se mostrará una ventana en la cual se puede identificar cada una de las elevaciones que se van a asignar a los distintos nodos, finalmente se procede hacer click en el botón *Finish*.

Con los datos obtenidos de los medidores según el gasto mensual en cada uno de los domicilios, se ingresan las demandas calculadas en el programa.

- En primer lugar, se identifica la opción *LoadBuilder* en la barra de herramientas, con ello se procede hacer click en *New*, como se puede observar en la siguiente figura:

Figura 3.4.
Ventana ModelBuilder para el ingreso de las demandas

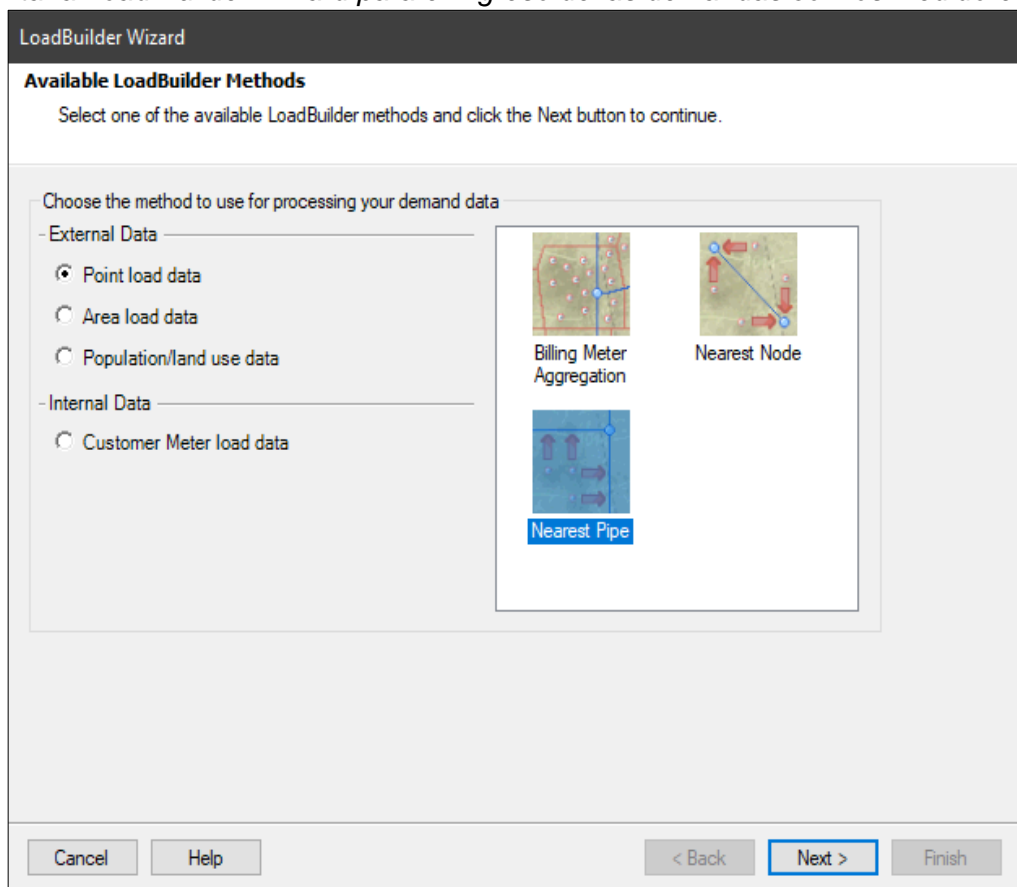


Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

- A continuación, se procede a dar click en *Point load data*, en la opción *Nearest Pipe* como se observa a continuación.

Figura 3.5.

Ventana *Load Builder Wizard* para el ingreso de las demandas con los medidores



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Luego, se muestra una ventana en la cual se debe escoger las siguientes herramientas:

- En la opción donde dice *Pipe Layer* se escoge *Pipe/All Elements*.
- En el campo *Pipe ID Field* se debe escoger *Element ID*.
- En la opción donde dice *Load Assignment* se selecciona *Equal Distribution*.
- En el campo *Node Layer* ponemos la opción *Junction/All Elements*.
- En la opción denominada *Node ID Field* se escoge *Element ID*.
- En el campo *Billing Meter Layer* se debe ingresar la información de los medidores.
- En la opción *Load Type Field* se selecciona *TIPO*.
- En el campo donde dice *Polyline Distribution* se coloca la opción *Equal Distribution*.
- En la opción donde dice *Usage Field* el caudal máximo horario denominado QMH y su unidad está definida en L/s.

Figura 3.6.

Ventana con las distintas opciones para el ingreso de las demandas con los medidores

LoadBuilder Wizard

Nearest Pipe

Enter in data for all fields below and click Next to continue.

Model Pipes Data:

Pipe Layer: Pipe\All Elements ...

Pipe ID Field: ElementID ▾

Load Assignment: Equal Distribution ▾

Model Node Layer

Node Layer: Junction\All Elements ...

Node ID Field: ElementID ▾

Use Previous Run

Billing Meter Data

Billing Meter Layer: C:\Users\j7pe\Downloads\TESIS\CULE ...

Load Type Field: TIPO ▾

Polyline Distribution: Equal Distribution ▾

Usage Field: QMH ▾ L/s ▾

Cancel Help < Back Next > Finish

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

CAPÍTULO IV

4. LEVANTAMIENTO DE DATOS EN CAMPO

4.1. Muestreo

4.1.1. Método probabilístico estratificado

“En este tipo de muestreo la población de estudio se divide en subgrupos o estratos, escogiendo posteriormente una muestra al azar de cada estrato. Esta división suele realizarse según una característica que pueda influir sobre los resultados del estudio. Si la estratificación se realiza respecto a un carácter se denomina muestreo estratificado simple, y si se realiza respecto dos o más características se denomina muestreo estratificado compuesto.” (Canal Díaz, 2006)

4.1.2. Tamaño de la muestra

Para definir el tamaño de la muestra, primero se establecen los estratos de la siguiente manera:

- Se define el público objetivo.
- Se reconoce la variable de la estratificación y se calcula el número de estratos que serán utilizados.
- Calcular el tamaño de cada estrato según los requerimientos.
- Cada estrato debe ser único y debe abarcar a todos y cada uno de los miembros.
- Cada miembro de los distintos estratos posee un número que lo identifica (Object ID).
- Se escogen de manera aleatoria las muestras.

4.1.3. Aplicación del método para los sectores del sistema

Por medio del método de muestreo probabilístico estratificado se busca garantizar un número igual de muestras en cada estrato. De esta manera los resultados serán homogéneos y facilitarán la posterior modelación del sistema.

El muestreo tiene la finalidad de tomar varias presiones hidráulicas a lo largo de la red de agua potable, para reflejar el comportamiento en campo del sistema. Estas presiones servirán como referencia para la calibración del modelo.

Cada sector estará dividido en 3 estratos, para establecer los estratos se determinó la elevación mínima y máxima según las curvas de nivel de cada sector, por medio de esta diferencia de elevaciones se realiza una división en 3 partes iguales, de esta manera se obtiene subsectores de igual magnitud. Por lo tanto, las muestras reflejarán las presiones en tres niveles de elevaciones (alta, media y baja) de los 5 sectores que conforman el sistema Culebrillas.

Se toman 6 muestras por cada sector, las cuales están repartidas dependiendo del porcentaje de la población total (medidores) que representa cada estrato. De esta manera, se encuentra un factor f, que viene dado al dividir la población de cada subsector para la población total del sector. El número de muestras de cada subsector resulta del producto del factor f y el número total de muestras requerido para cada sector, es decir, 6.

4.2. Levantamiento de información de las presiones en campo

4.2.1. SECTOR SIGCHOCOCHA

Tabla 4.1.

Sub-sectorización del sector Sigchocochoa con respectiva muestra

SUB-SECTOR	POBLACIÓN	FACTOR	MUESTRA
S1	43	0,103365	1
S2	140	0,336538	2
S3	233	0,560096	3
TOTAL	416	1	6

Nota. Datos obtenidos por los Autores

Tabla 4.2.

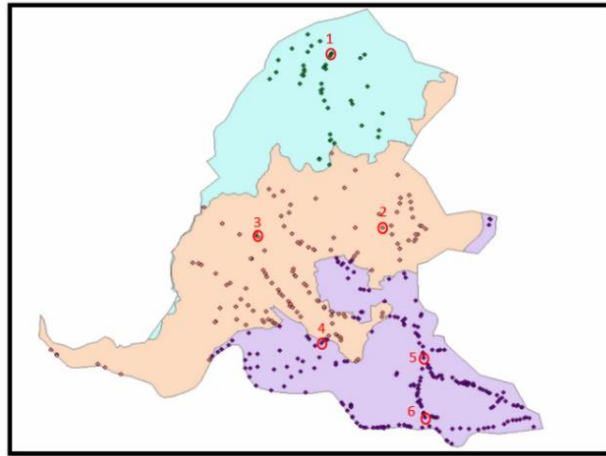
Elevación inicial y final del sector Sigchocochoa

ELEVACIÓN INICIAL	ELEVACIÓN FINAL
2718	2828
2828	2938
2938	3048

Nota. Datos obtenidos por los Autores

Figura 4.1.

Interpretación de las muestras en cada uno de los sub-sectores del sector Sigchococha



Nota. Datos obtenidos por los Autores

Tabla 4.3.

Información detallada de las presiones tomadas en campo de cada subsector del sector Sigchococha

SUBSECTOR	MEDIDOR	X	Y	HORA 1	PRESIÓN	HORA 2	PRESIÓN
S1	1	719306,48	9686564	12:00 am	56.25 mca	12:30 pm	54.84 mca
S2	2	719542,29	9685716	11:58 am	63.28 mca	12:32 pm	59.76 mca
	3	718972,151	9685672	11:55 am	59.76 mca	12:35 pm	57.65 mca
S3	4	719261,62	9685154	11:52 am	70.31 mca	12:38 pm	65.39 mca
	5	719731,955	9685079	11:50 am	42.19 mca	12:40 pm	39.37 mca
	6	719739,8697	9684789	11:47 am	68.2 mca	12:43 pm	63.98 mca

Nota. Datos obtenidos por los Autores

4.2.2. SECTOR PAN DE AZUCAR

Tabla 4.4.

Sub-sectorización del sector Pan de Azúcar con respectiva muestra

SUB-SECTOR	POBLACIÓN	FACTOR	MUESTRA
S1	699	0,252711	2
S2	1424	0,514823	3
S3	643	0,232466	1
TOTAL	2766	1	6

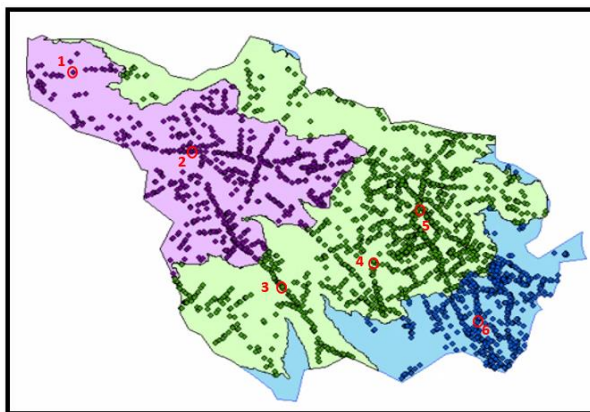
Nota. Datos obtenidos por los Autores

Tabla 4.5.
Elevación inicial y final del sector Pan de Azúcar

ELEVACIÓN INICIAL	ELEVACIÓN FINAL
2584	2672
2672	2760
2760	2850

Nota. Datos obtenidos por los Autores

Figura 4.2.
Interpretación de las muestras en cada uno de los sub-sectores del sector Pan de Azúcar



Nota. Datos obtenidos por los Autores

Tabla 4.6.
Información detallada de las presiones tomadas en campo de cada subsector del sector Pan de Azúcar

SUBSECTOR	MEDIDOR	X	Y	HORA 1	PRESIÓN	HORA 2	PRESIÓN
S1	1	719200,75	9684256	11:20 am	59.76 mca	12:50 pm	57.65 mca
	2	719933,685	9683691	10:39 am	28.12 mca	14:07 pm	27.42 mca
S2	3	720530,939	9682776	10:49 am	42.19 mca	14:15 pm	40.08 mca
	4	721187,153	9682844	11:04 am	84.37 mca	14:18 pm	79.45 mca
	5	721492	9683323	10:57 am	63.28 mca	14:20 pm	61.87 mca
S3	6	721876	9682468	11:16 am	28.12 mca	14:25 pm	28.12 mca

Nota. Datos obtenidos por los Autores

4.2.2. SECTOR RACAR

Tabla 4.7.
Sub-sectorización del sector Racar con respectiva muestra

SUB-SECTOR	POBLACIÓN	FACTOR	MUESTRA
S1	239	0,167602	1
S2	1039	0,728612	4
S3	148	0,103787	1
TOTAL	1426	1	6

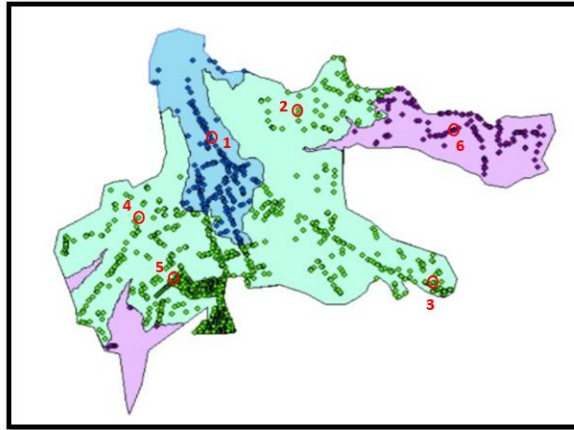
Nota. Datos obtenidos por los Autores

Tabla 4.8.
Elevación inicial y final del sector Racar

ELEVACIÓN INICIAL	ELEVACIÓN FINAL
2698	2784
2784	2870
2870	2958

Nota. Datos obtenidos por los Autores

Figura 4.3.
Interpretación de las muestras en cada uno de los sub-sectores del sector Racar



Nota. Datos obtenidos por los Autores

Tabla 4.9.
Información detallada de las presiones tomadas en campo de cada subsector del sector Racar

SUBSECTOR	MEDIDOR	X	Y	HORA 1	PRESIÓN	HORA 2	PRESIÓN
S1	1	718005,5084	9684582	11:40 am	17.58 mca	12:56 pm	16.17 mca
	2	718598,233	9684763	11:37 am	38.67 mca	12:53 pm	33.75 mca
S2	3	719495,5382	9683527	10:43 am	28.12 mca	14:00 pm	25.31 mca
	4	717631,544	9683991	11:45 am	84.37 mca	13:00 pm	80.15 mca
	5	717829,0463	9683605	10:10 am	73.82 mca	13:03 pm	73.12 mca
S3	6	719643,6857	9684618	10:05 am	38.67 mca	12:45 pm	35.15 mca

Nota. Datos obtenidos por los Autores

4.2.4. SECTOR TRINIDAD

Tabla 4.10.
Sub-sectorización del sector Trinidad con respectiva muestra

SUB-SECTOR	POBLACIÓN	FACTOR	MUESTRA
S1	792	0,274809	2
S2	1556	0,539903	3
S3	534	0,185288	1
TOTAL	2882	1	6

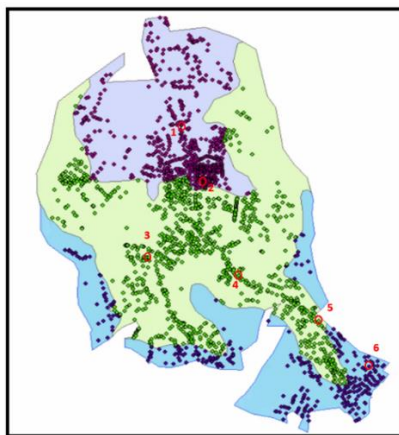
Nota. Datos obtenidos por los Autores

Tabla 4.11.
Elevación inicial y final del sector Trinidad

ELEVACIÓN INICIAL	ELEVACIÓN FINAL
2620	2700
2700	2780
2780	2858

Nota. Datos obtenidos por los Autores

Figura 4.4.
Interpretación de las muestras en cada uno de los sub-sectores del sector Trinidad



Nota. Datos obtenidos por los Autores

Tabla 4.12.
Información detallada de las presiones tomadas en campo de cada subsector del sector Trinidad

SUBSECTOR	MEDIDOR	X	Y	HORA 1	PRESIÓN	HORA 2	PRESIÓN
S1	1	718327	9682864	9:59 am	45.70 mca	13:10 pm	45.70 mca
	2	718429,2633	9682542	9:50 am	66.79 mca	13:13 pm	64.68 mca
S2	3	718180,132	9682067	9:44 am	61.16 mca	13:17 pm	59.76 mca
	4	718673,133	9681948	9:40 am	63.27 mca	13:22 pm	63.27 mca
	5	719151,2865	9681661	9:37 am	105.46 mca	13:27 pm	100.54 mca
S3	6	719450,3951	9681375	9:34 am	84.37 mca	13:30 pm	81.55 mca

Nota. Datos obtenidos por los Autores

4.2.5. SECTOR PUMAYUNGA

Tabla 4.13.
Sub-sectorización del sector Pumayunga con respectiva muestra

SUB-SECTOR	POBLACIÓN	FACTOR	MUESTRA
S1	76	0,190476	1
S2	292	0,73183	4
S3	31	0,077694	1
TOTAL	399	1	6

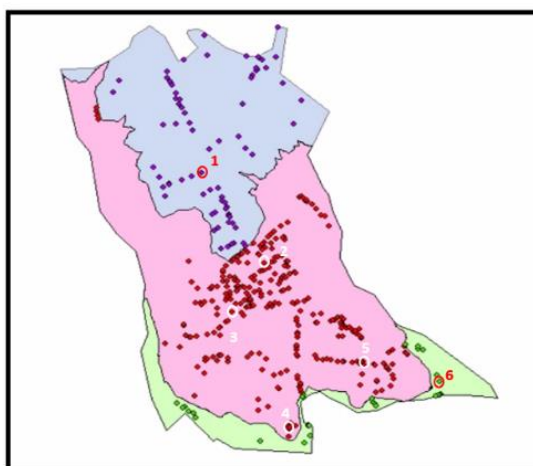
Nota. Datos obtenidos por los Autores

Tabla 4.14.
Elevación inicial y final del sector Pumayunga

ELEVACIÓN INICIAL	ELEVACIÓN FINAL
2628	2706
2706	2784
2784	2864

Nota. Datos obtenidos por los Autores

Figura 4.5.
Interpretación de las muestras en cada uno de los sub-sectores del sector Pumayunga



Nota. Datos obtenidos por los Autores

Tabla 4.15.
Información detallada de las presiones tomadas en campo de cada subsector del sector Pumayunga

SUBSECTOR	MEDIDOR	X	Y	HORA 1	PRESIÓN	HORA 2	PRESIÓN
S1	1	719344,049	9682919	10:31 am	42.19 mca	13:55 pm	38.67 mca
S2	2	719598,5045	9682521	10:29 am	84.37 mca	13:50 pm	82.26 mca
	3	719450,9516	9682267	10:35 am	31.40 mca	13:47 pm	87.89 mca
	4	719700,2401	9681792	10:15 am	37.26 mca	13:35 pm	37.26 mca
	5	720000,2307	9682087	10:19 am	94.92 mca	13:43 pm	93.51 mca
	S3	6	720045,8412	9681903	10:25 am	108.98 mca	13:40 pm

Nota. Datos obtenidos por los Autores

CAPÍTULO V

5. CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS HIDRÁULICOS CON PRESIONES TOMADAS EN CAMPO


Antes de iniciar con el proceso de calibración, primero se debe asegurar y validar que el sistema entero se encuentre actualizado, es decir, todos los modelos digitales deben contar con las correspondientes elevaciones, consumos, y demás elementos, sin errores.

Se procede a la calibración del sistema mediante la herramienta *Darwin Calibrator*, la cual permite evaluar el estado en que se encuentra la red, y por medio de la información tomada en campo, la herramienta ajusta las presiones del sistema, de manera que la simulación del modelo funciona como la red de cada uno de los sectores. Para este caso se tomó en cuenta tres metodologías de calibración que se muestran a continuación:

- Método de calibración Manual
- Método de calibración por optimización de Rugosidades
- Método de calibración por optimización de Rugosidades/Demandas

5.1. Método de calibración Manual

Para utilizar la herramienta *Darwin Calibrator* se sigue los siguientes pasos:

- Dentro del programa WaterGems se selecciona en la pestaña *Analysis/Darwin Calibrator* . Luego clic en *New* y *New Calibration Study* para establecer los valores de configuración.
- Se selecciona la pestaña *Calibration Criteria* y se coloca los siguientes parámetros según el manual de Bentley WaterGems.
- Para el parámetro *Fitness Type* se debe tomar en cuenta que en general, independientemente del tipo de ajuste que seleccione, un ajuste más bajo indica una mejor calibración. Los tipos de ajuste incluyen: Minimizar diferencia de cuadrados, minimizar diferencia de valores absolutos y minimizar diferencia máxima.
 - En el caso de minimizar diferencia de cuadrados se utiliza una calibración diseñada para minimizar la suma de cuadrados de la discrepancia entre los datos observados y los valores simulados del modelo. (Los valores simulados del modelo incluyen las leyes

hidráulicas y las descargas de las tuberías). Esta calibración favorece las soluciones que minimizan la suma total de los cuadrados de las discrepancias entre los datos observados y los simulados, este ajuste es el recomendado para una mejor aproximación de los modelos de acuerdo con el *Bentley WaterGEMS*.

- Por otro lado, para minimizar diferencia de valores absolutos se utiliza una calibración diseñada para minimizar la suma de la discrepancia absoluta entre los datos observados y los valores simulados del modelo. Esta calibración favorece las soluciones que minimizan la suma total de discrepancias entre los datos observados y simulados.
 - Finalmente para minimizar diferencia máxima se utiliza una calibración diseñada para minimizar al máximo todas las discrepancias entre los datos observados y los valores simulados del modelo. Esta calibración favorece las soluciones que minimizan la peor discrepancia única entre los datos observados y simulados. Se debe tener en cuenta que el tipo de ajuste “minimizar la diferencia máxima” es más sensible a la precisión de sus datos que otros tipos de ajuste.
- Para el parámetro *Head/Flow per Fitness Point* se debe tomar en cuenta la altura y el flujo por tipo de ajuste, esto permiten equilibrar la importancia de la altura y el flujo en la calibración. Estableciendo estos valores de modo que la altura y el caudal tengan equivalencia unitaria. Se puede dar mayor importancia a la altura o el caudal estableciendo un número más pequeño para dar un valor con mayor precisión.
 - Para el parámetro *Flow Weight Type* se debe tomar en cuenta el tipo de ponderación utilizado: Ninguno, Lineal, Cuadrado, Raíz Cuadrada y Logarítmica. El tipo de ponderación que utilice puede proporcionar una mayor o menor penalización para la calibración del sistema.

Figura 5.1.
Ventana Calibration Criteria

Field Data Snapshots	Roughness Groups	Demand Groups	Status Elements	Calibration Criteria	Notes
Fitness					
Fitness Type:		Minimize Difference Squares			
Head per Fitness Point:		2.00	m		
Flow per Fitness Point:		6.0000000000	L/s		
Flow Weight Type:		Linear			

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS


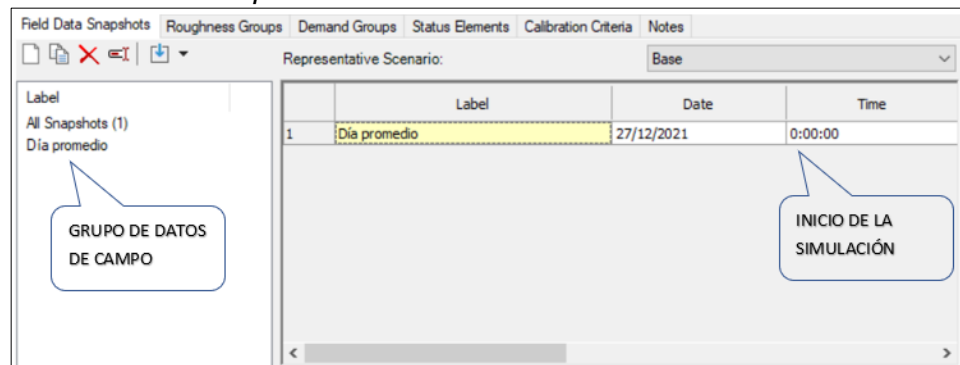
- En la pestaña *Field Data Snapshots* se selecciona *New*, y a continuación se cambia el nombre por defecto y se coloca “Día promedio” 
- Se define la fecha inicial en la ventana del escenario, se coloca 0:00:00 para determinar el tiempo de inicio.

Figura 5.2.
Ventana Field Data Snapshots



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS



- Se ingresan los datos obtenidos en la visita en campo, mediante la pestaña *Observed Target* en la parte inferior de la ventana. Haciendo clic en *New* se despliega la columna en la que se identifica los nodos del sistema por medio de la herramienta *Find*  en la cual escribimos su código de identificación y se procede a ingresar su correspondiente valor tomando en campo. Este valor será ingresado en la columna *Value* y representará el Grado Hidráulico (HGL).

Figura 5.3.
Ingreso de los datos medidos en campo, Sector Trinidad.

Field Data Set	Element	Attribute	Value
1 Día Promedio	TUB_TRI_633	Hydraulic Grade (m)	2,846.39
2 Día Promedio	TUB_TRI_19	Hydraulic Grade (m)	2,818.43
3 Día Promedio	TUB_TRI_296	Hydraulic Grade (m)	2,796.77
4 Día Promedio	TUB_TRI_230	Hydraulic Grade (m)	2,797.92
5 Día Promedio	TUB_TRI_667	Hydraulic Grade (m)	2,797.86
6 Día Promedio	TUB_TRI_489	Hydraulic Grade (m)	2,801.11

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

- Se selecciona la pestaña *Roughness Groups*, debido a que la calibración se ejecuta por ajuste de rugosidades para todas las tuberías de PVC. Clic en *New* y se nombra la etiqueta como “PVC”.
- En la columna *Elements ID's* se selecciona el botón *Select From Drawing* 

- Y a continuación, por medio de la herramienta Query se selecciona la opción *Network / All Pipes*, de esta manera se seleccionarán todas las tuberías ya que el sistema cuenta con tuberías únicamente de PVC.

Figura 5.4.

Ingreso de los datos medidos en campo, Sector Trinidad.

Roughness Demand Status Field Data Notes				
	Roughness Adjustment Group	Is Active?	Operation	Value
1	PVC	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply	1.000

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.5.

Ingreso de los datos medidos en campo, Sector Trinidad.

	Label	Element ID
124	TUB_TRI_841	124
127	TUB_TRI_920	127
130	TUB_TRI_1078	130
133	TUB_TRI_897	133
136	TUB_TRI_1210	136
139	TUB_TRI_1212	139
142	TUB_TRI_1170	142
144	TUB_TRI_846	144
146	TUB_TRI_1086	146
149	TUB_TRI_1135	149
152	TUB_TRI_1094	152
155	TUB_TRI_1197	155
158	TUB_TRI_1228	158
160	TUB_TRI_1204	160

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.6.

Ventana *Roughness Groups*

Field Data Snapshots Roughness Groups Demand Groups Status Elements Calibration Criteria Notes				
ID	Label	Element IDs	Notes	
1033	PVC	<Collection: 443 items >		

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Se establecen los parámetros de variación para la calibración. Se ejecuta en primer lugar una simulación manual, la cual tendrá las siguientes especificaciones:

- En el menú principal del *Darwin Calibrator* se selecciona la opción *New* y seguidamente se elige *New Manual Run*.
- En la pestaña *Roughness* se establece un valor de multiplicador de 1.00, de esta manera el valor de rugosidad se mantendrá constante durante la simulación.

Figura 5.7.
Ventana *Roughness* de la calibración manual

Roughness					
	Demand	Status	Field Data	Notes	
	Roughness Adjustment Group		Is Active?	Operation	Value
1	PVC		<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply	1.000

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

- Las pestañas *Demand* y *Status* no contienen grupos de datos ingresados, por lo tanto, se continúa con la siguiente pestaña.
- En la pestaña *Field Data* se verifica que se encuentre activa la etiqueta que contiene los datos observados en campo.

Figura 5.8.
Ventana *Field Data* de la calibración manual

Roughness			Demand		Status		Field Data		Options		Notes	
	Field Data Snapshot			Is Active?								
1	Dia Promedio			<input checked="" type="checkbox"/>								

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

- A continuación, click en el botón *Compute* para que el programa inicie con la simulación y calibración del sistema.
- Se selecciona la pestaña *Solutions* y se observa el valor *Fitness*, el cual debe ser cercano a cero para obtener un modelo calibrado.

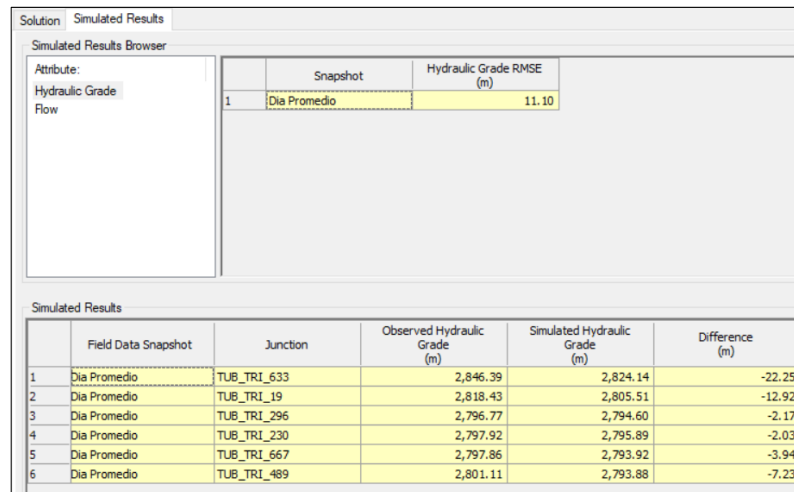
Figura 5.9.
Ventana *Field Data* de la calibración manual

Darwin Calibrator (TRI_2021_GEMS.wtg)		
	Solution	Fitness
1	Solution 1	30.778

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

- Haciendo click en la Solución 1, se puede observar la diferencia entre los valores del Grado Hidráulico observado y simulado.

Figura 5.10.
Ventana Simulated Results



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS


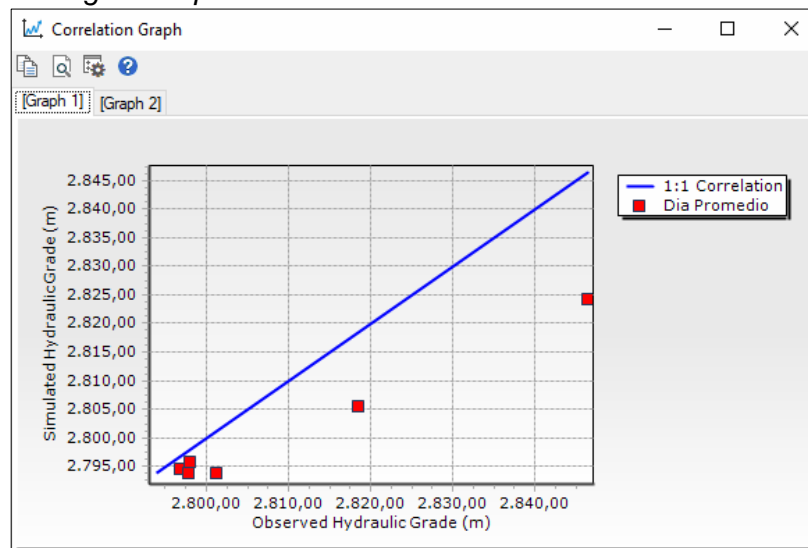
- Además, se puede observar cuando hacemos click en el botón *Graph*,  como está la dispersión de los puntos para medir el HGL, tal como se indica en la siguiente figura:

Figura 5.11.
Configuración rugosidad para la simulación Manual



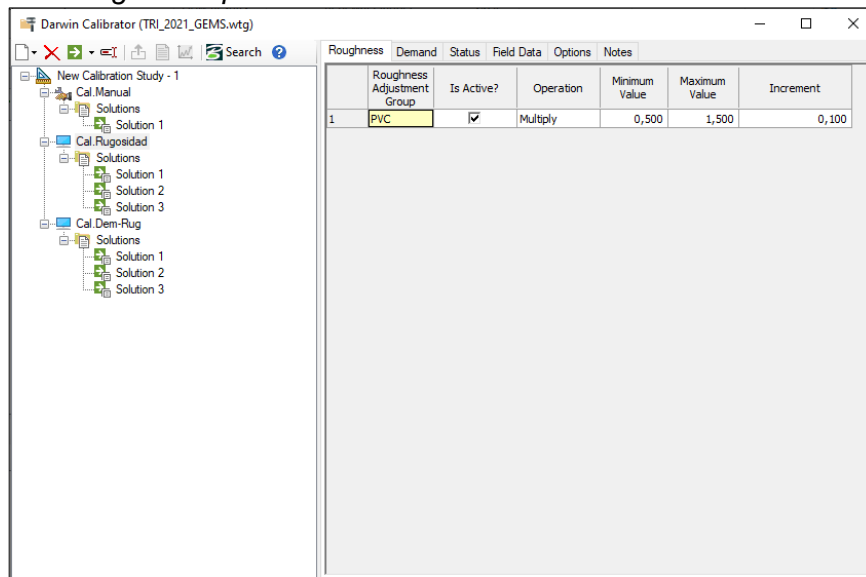
Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

5.2. Método de calibración por optimización de Rugosidades

Para el método de calibración por optimización de rugosidades el programa WaterGEMS tiene la capacidad de utilizar algoritmos genéricos obteniendo soluciones más ajustadas con los datos obtenidos en campo.

- Se procede a abrir el menú desplegable con el botón *New* del calibrador y se escoge la opción *New Optimized Run*. Para esta simulación se escogió el nombre de “Cal.Rugosidad”
- En esta modalidad de simulación el programa permite dar un rango de valores para la rugosidad del PVC, para este caso se escogen los valores de 0.5 a 1.5 con un incremento del 0.1, por lo tanto, se tiene la siguiente configuración:

Figura 5.12.
Configuración rugosidad para la simulación Manual



Roughness Adjustment Group	Is Active?	Operation	Minimum Value	Maximum Value	Increment
1 PVC	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply	0,500	1,500	0,100

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

- Seguidamente se da click en la pestaña *Options* y posteriormente se debe llenar las opciones tal como se muestra en la siguiente imagen:

Figura 5.13.
Configuración de la lista de opciones

Options	Value
Fitness Tolerance:	0.001
Maximum Trials:	10000
Non-Improvement Generations:	100
Solutions to Keep:	3
Leakage Detection Penalty Factor:	50,000

Advanced Options	Value
Maximum Era Number:	6
Era Generation Number:	150
Population Size:	50
Cut Probability:	1.7 %
Splice Probability:	90.0 %
Mutation Probability:	1.0 %
Random Seed:	0.500

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS


- Para empezar con la simulación se procede hacer click en el botón *Compute*  , para finalizar con el proceso se da un click en *Close*.
- Para ver los resultados se dirige a la pestaña *Solutions* el cual muestra error que tiene el modelo con respecto a los datos obtenidos en campo.

Figura 5.14.
Vista de las soluciones con sus respectivos Fitness para el metodo rugosidad

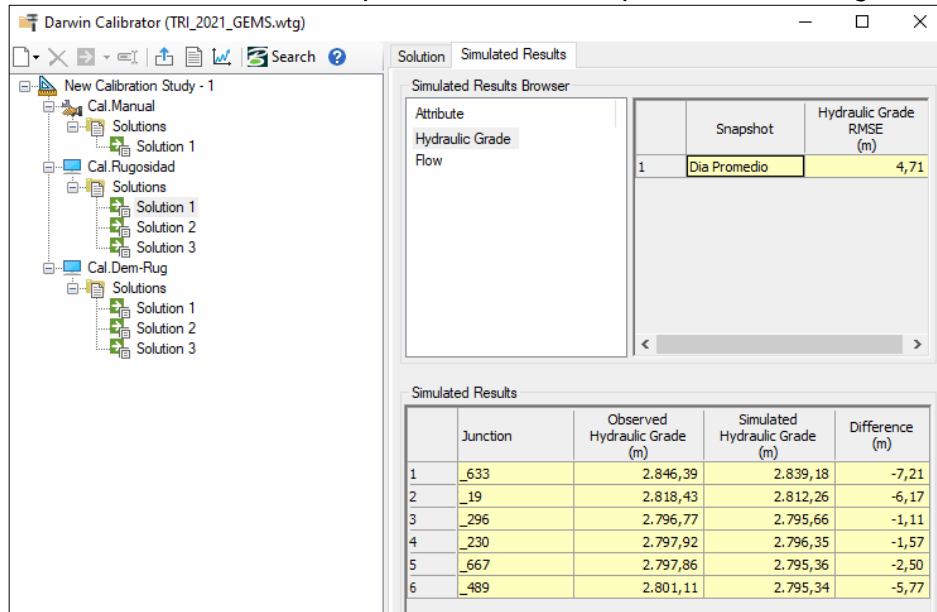
	Solution	Fitness
1	Solution 1	5,554
2	Solution 2	10,256
3	Solution 3	14,445

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

- Se puede identificar que las soluciones cada vez se van ajustando más al modelo, ahora se va a analizar el error RMSE y las diferencias que tiene los gradientes hidráulicos observado con el simulado, como se muestra a continuación:

Figura 5.15.

Vista da la *Solution 1* con sus respectivos resultados para el método rugosidad



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS


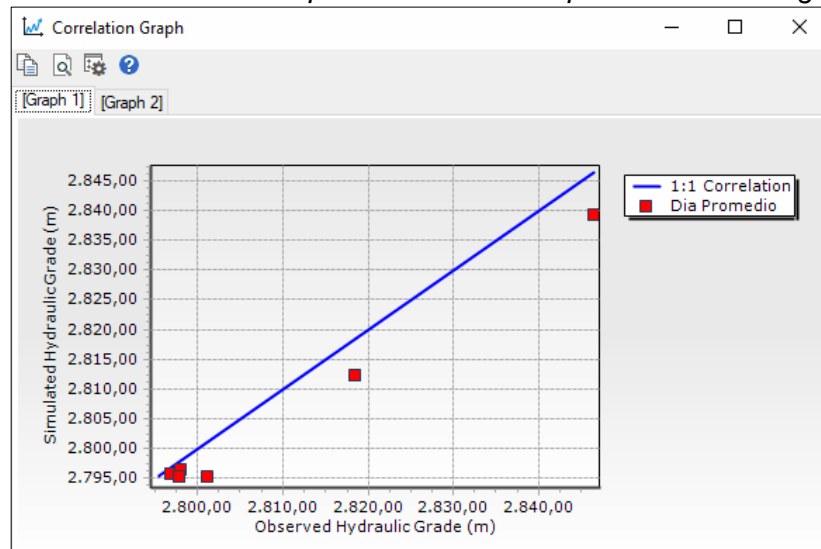
Además, se puede observar cuando se hace click en el botón *Graph*,  como está la dispersión de los puntos para medir el HGL, tal como se indica en la siguiente figura:

Figura 5.16.

Vista da la *Solution 1* con sus respectivos resultados para el método rugosidad



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

5.3. Método de calibración por optimización de Rugosidades/Demandas

Para el método de calibración por optimización de rugosidades/demandas el programa WaterGEMS tiene la capacidad de utilizar algoritmos genéricos obteniendo soluciones más ajustadas con los datos obtenidos en campo.



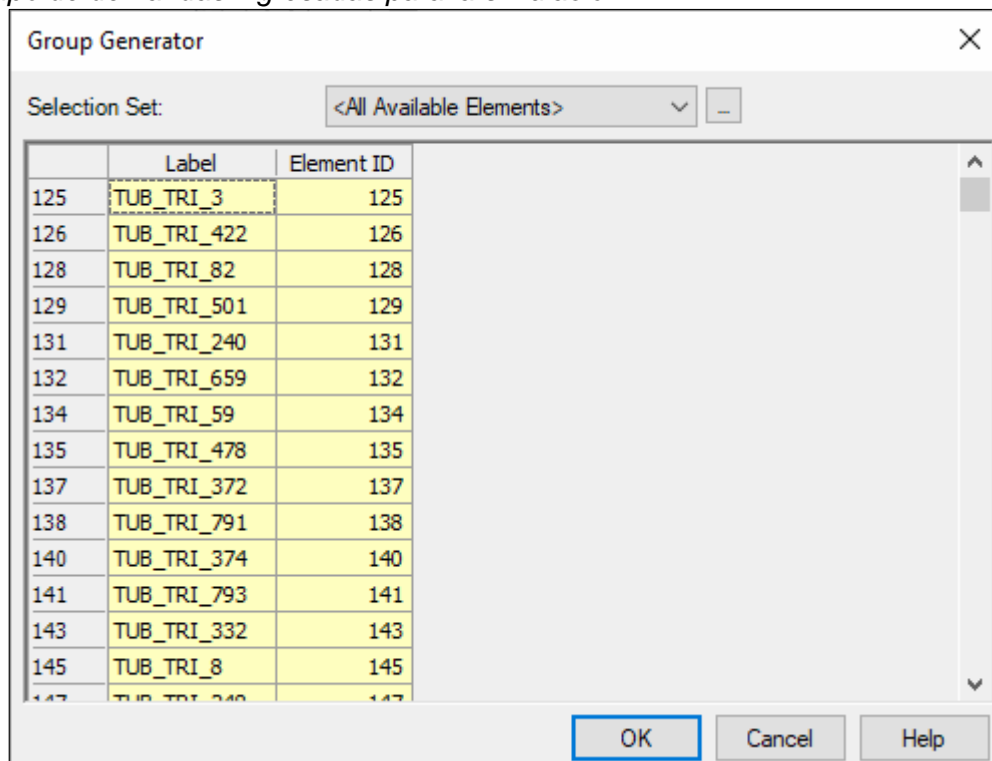
- Se procede a abrir el menú desplegable con el botón *New* del calibrador y se escoge la opción *New Optimized Run*. Para esta simulación se escogió el nombre de "Cal.Rugosidad"
- En esta modalidad de simulación el programa permite dar un rango de valores para la rugosidad del PVC, para este caso se escogen los valores de 0.5 a 1.5 con un incremento del 0.1
- Adicionalmente se activa las demandas que tiene el modelo dando click en la pestaña *Demand Groups*,
- A continuación, damos click en el icono *Select elements for demand group* 
- Seguidamente procedemos a cargar las demandas haciendo click en la opción *Queries*  y se escoge la clasificación en este caso *Consumo Residencial*

Figura 5.17.
Grupo de demandas ingresadas para la simulación



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS


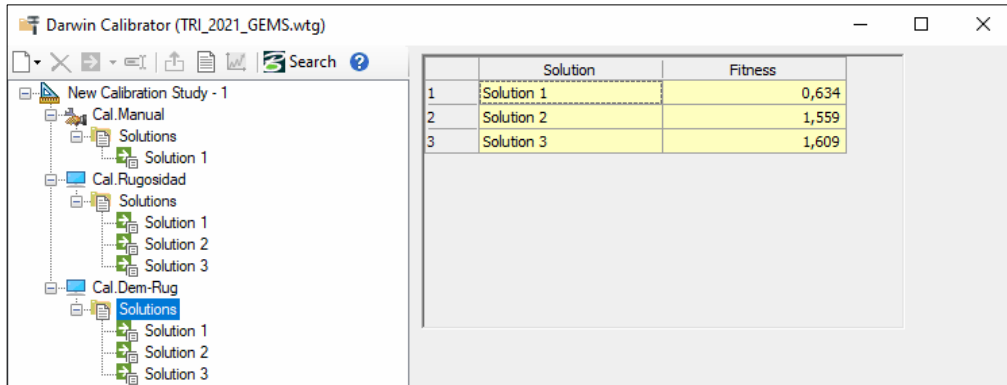
- Se realiza la misma configuración para la ventana de opciones
- Para empezar con la simulación se procede hacer click en el botón *Compute*  , para finalizar con el proceso se da un click en *Close*.
- Para ver los resultados se dirige a la pestaña *Solutions* el cual muestra error que tiene el modelo con respecto a los datos obtenidos en campo.

Figura 5.18.

Vista de las soluciones con sus respectivos *Fitness* para el método *rugosidad/demanda*



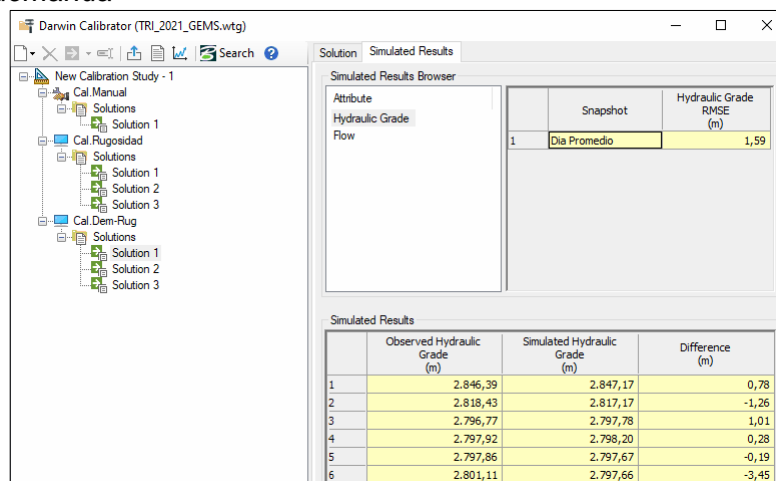
	Solution	Fitness
1	Solution 1	0,634
2	Solution 2	1,559
3	Solution 3	1,609

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

- Se puede identificar que las soluciones cada vez se van ajustando más al modelo, ahora se va analizar el error RMSE y las diferencias que tiene los gradientes hidráulicos observado con el simulado, como se muestra a continuación:

Figura 5.19.


Vista da la *Solution 1* con sus respectivos resultados para el método *rugosidad/demanda*



Attribute	Snapshot	Hydraulic Grade (m)
Flow	1	Dia Promedio
		1,59

	Observed Hydraulic Grade (m)	Simulated Hydraulic Grade (m)	Difference (m)
1	2.846,39	2.847,17	0,78
2	2.818,43	2.817,17	-1,26
3	2.796,77	2.797,78	1,01
4	2.797,92	2.798,20	0,28
5	2.797,86	2.797,67	-0,19
6	2.801,11	2.797,66	-3,45

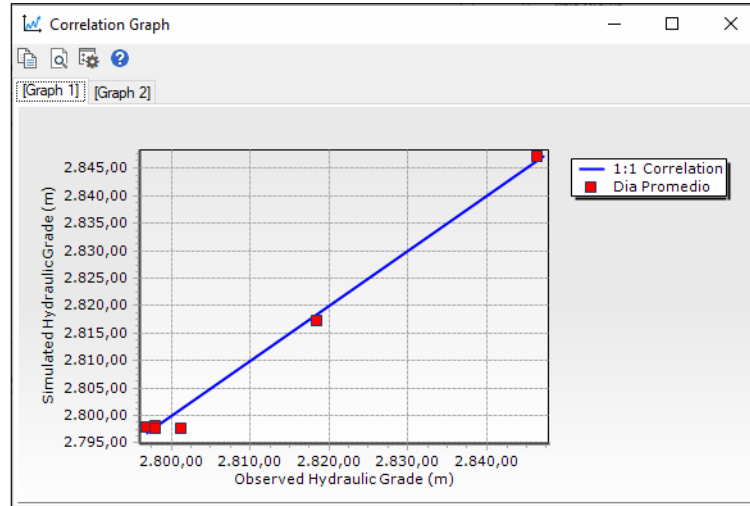
Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Además, podemos observar cuando hacemos click en el botón *Graph*,  como está la dispersión de los puntos para medir el HGL, en donde las aproximaciones

son buenas entre los puntos, por lo tanto, se termina la calibración, tal como nos indica en la siguiente figura:

Figura 5.20.

Vista da la Solution 1 con sus respectivos resultados para el método rugosidad/demanda



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

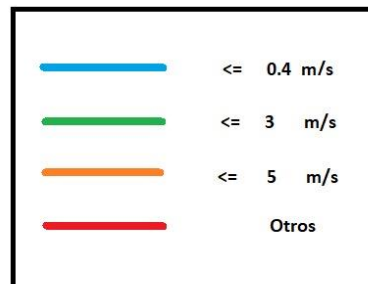
5.4. Resultados

5.4.1. Resultados de velocidades

Se establece un código de colores para representar de mejor manera el comportamiento de las velocidades en las tuberías de cada sector. De esta manera, la Figura 5.21 muestra los rangos de velocidades establecidos en la norma junto con sus respectivos colores. Como se puede apreciar, el color azul indicará un funcionamiento óptimo de la tubería, y el color rojo indicará un exceso en la misma, el cual se debe mitigar. Este código de colores se aplicará a cada sector para evaluar su funcionamiento.

Figura 5.21.

Codificación de colores para los rangos de velocidad en las tuberías

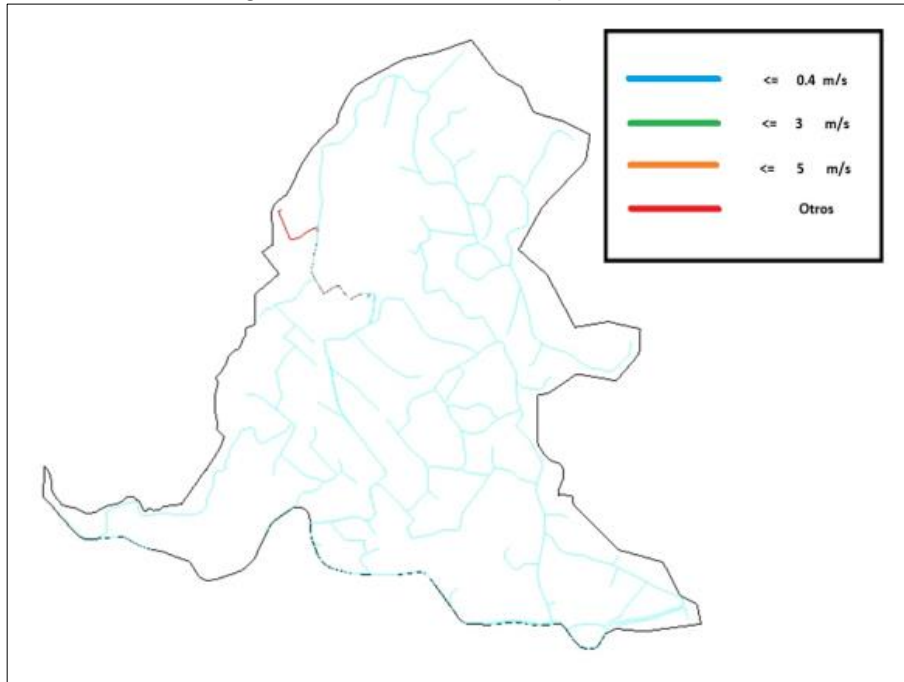


Nota. Datos obtenidos por los Autores

En todos los sectores se pudo apreciar que las máximas velocidades se dan a causa de las pendientes pronunciadas que existe alrededor de todo el sistema Culebrillas y también en los tramos que están cercanos a los tanques de almacenamiento, como se muestra en las Figuras 5.22,5.23,5.24,5.25,5.26

Figura 5.22.

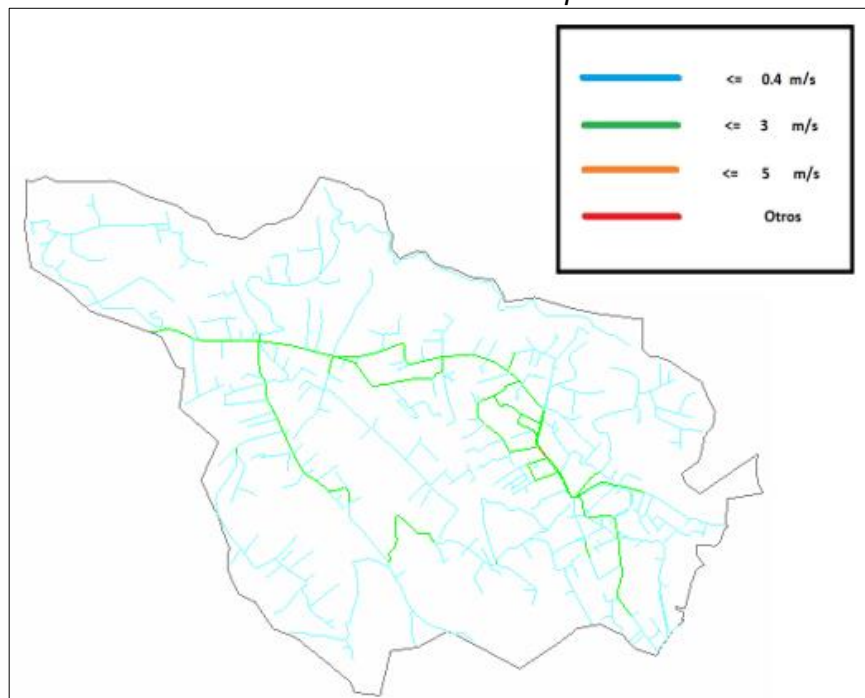
Velocidades del sector Sigchococha modificadas por color



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.23.

Velocidades del sector Pan de Azúcar modificadas por color



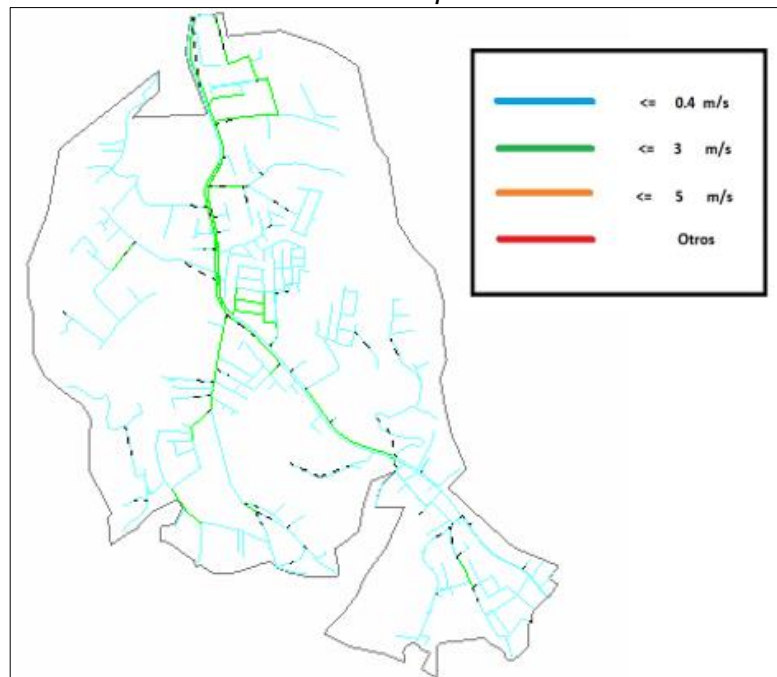
Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.24.
Velocidades del sector Racar modificadas por color



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.25.
Velocidades del sector Trinidad modificadas por color



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.26.
Velocidades del sector Pumayunga modificadas por color

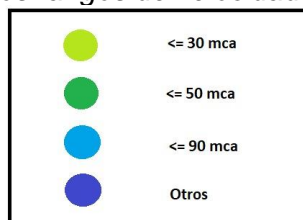


Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

5.4.3 Resultados de presiones

De igual manera para las presiones se establece un código de colores para representar de mejor manera el comportamiento en las tuberías de cada sector. A continuación, la Figura 5.27 muestra los rangos de presiones establecidos en la norma junto con sus respectivos colores. Como se puede observar, el color verde claro indicará un funcionamiento óptimo de la tubería, y el color morado indicará un exceso en la misma, el cual se debe mitigar. Este código de colores se aplicará a cada sector para evaluar su funcionamiento.

Figura 5.27.
Codificación de colores para los rangos de velocidad en las tuberías



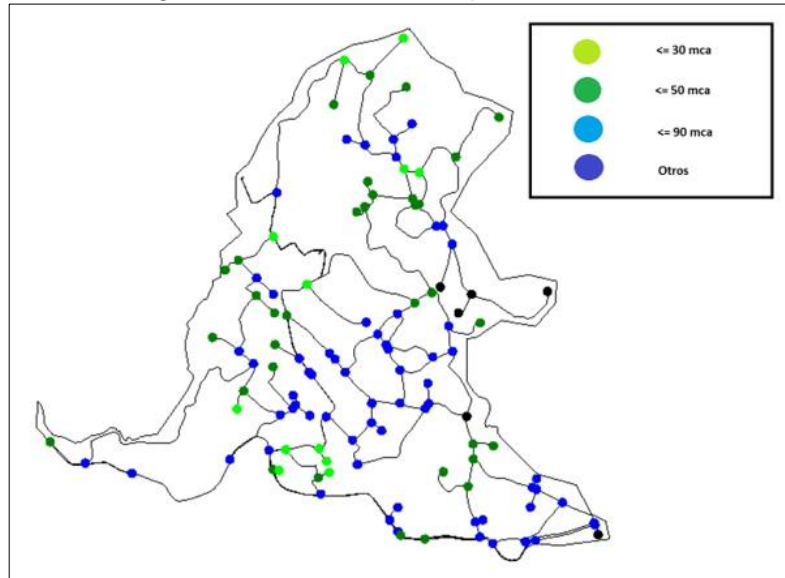
Nota. Datos obtenidos por los Autores

El motivo principal por el cual la mayoría de los nodos que tienen presiones mayores a 90 m.c.a., es producido por la excesiva pendiente dada por la topografía

del sector, esto se determinó al momento de tomar las presiones en campo; además la falta de válvulas rompe presiones en algunos puntos estratégicos es otro aspecto que se debe considerar, para regular y mejorar las presiones en cada uno de los sectores que conforman el sistema Culebrillas.

Figura 5.28.

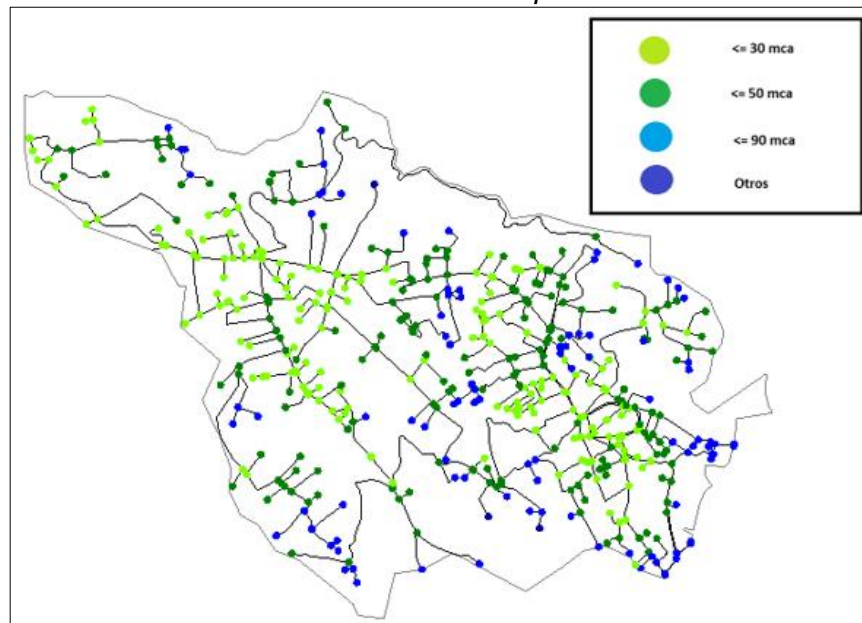
Presiones del sector Sigchococha modificadas por color



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

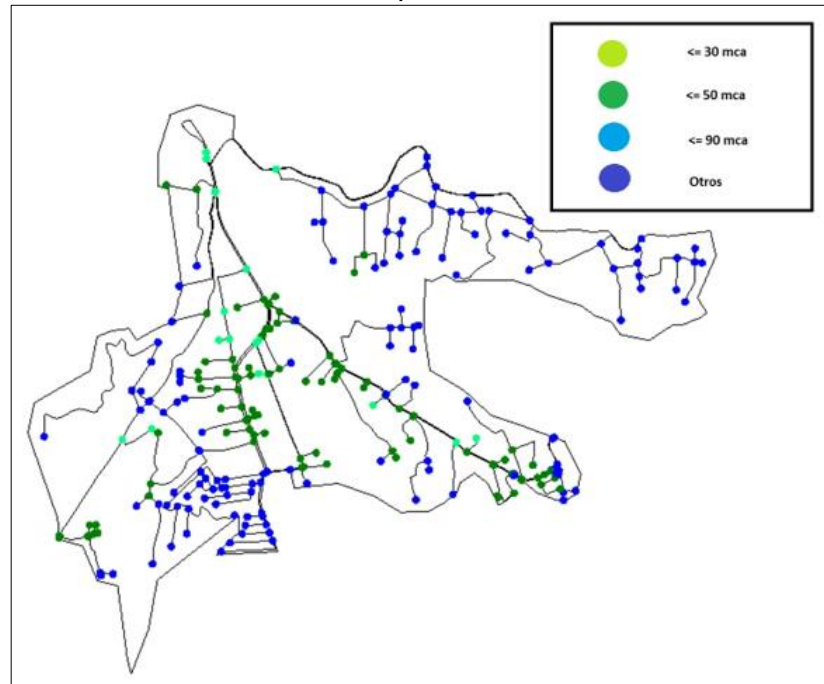
Figura 5.29.

Presiones del sector Pan de Azucar modificadas por color



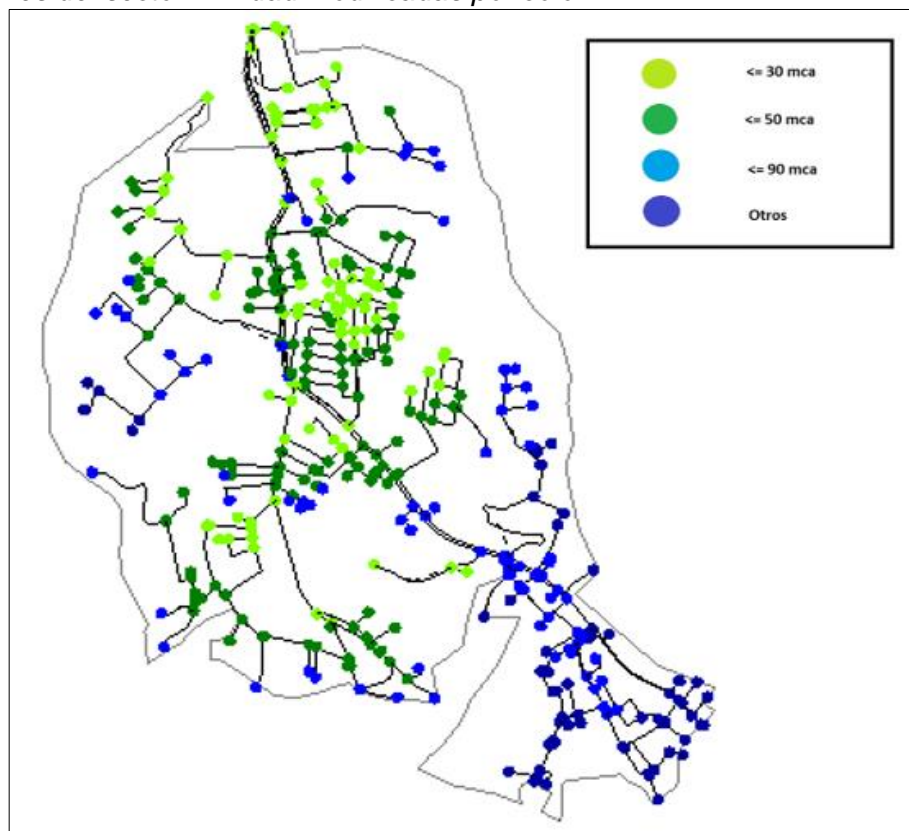
Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.30.
Presiones del sector Racar modificadas por color

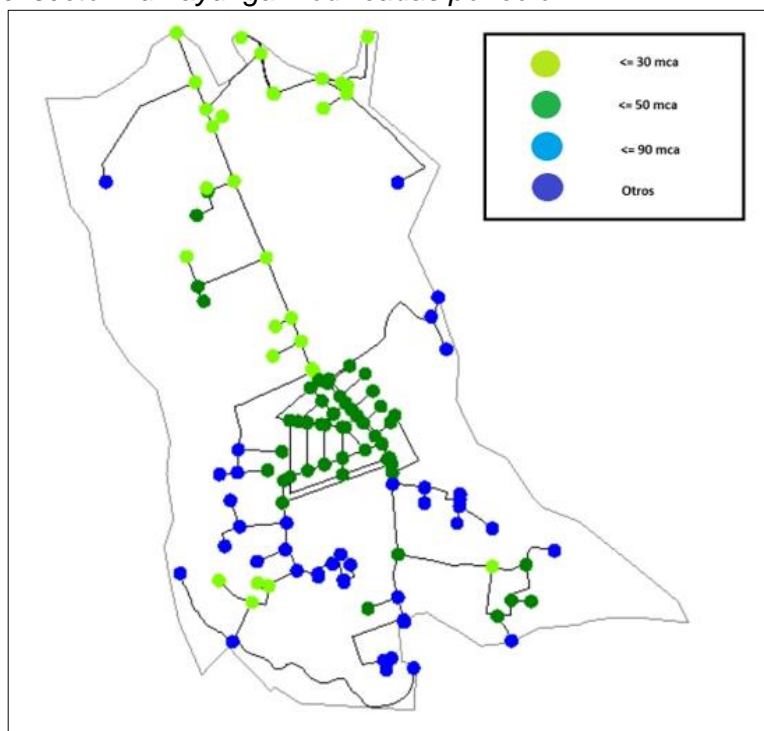


Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.31.
Presiones del sector Trinidad modificadas por color



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.32.*Presiones del sector Pumayunga modificadas por color*

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

5.4.2. Resultados de calibración

En este apartado se enseñará los resultados de la simulación y calibración de cada uno de los sectores que constituyen el sistema Culebrillas. Para garantizar una buena calibración, la diferencia de los valores observados con respecto a los modelados del Grado Hidráulico debe tener una tolerancia de +5 m.c.a. a -5 m.c.a.

Sector Sigchococha

Se puede observar en la siguiente tabla que la mayor tolerancia que existe en este sector es de 4.77 m.c.a., por lo tanto, es aceptable.

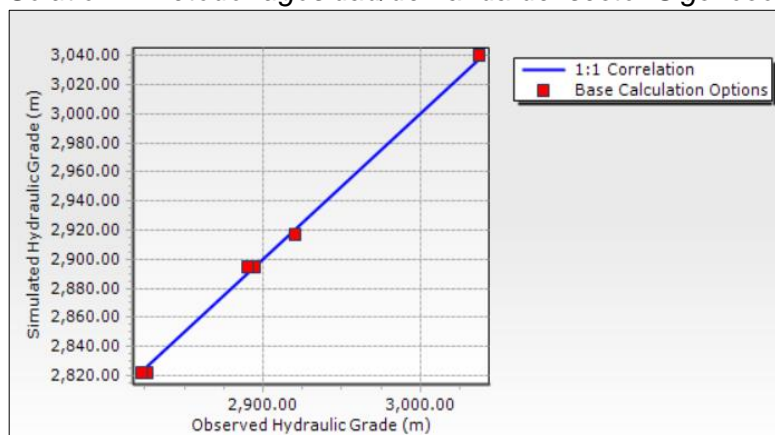
Tabla 5.1.*Diferencia del Grado Hidráulico observado con el calculado del sector Sigchococha*

DATOS OBSERVADOS EN CAMPO	NODO	GRADO HIDRÁULICO OBSERVADO (m)	GRADO HIDRÁULICO CALCULADO (m)	DIFERENCIA (m)
Día Promedio	TUB_SIG_140	3037,12	3040,04	2,92
Día Promedio	TUB_SIG_192	2894,68	2895,25	0,57
Día Promedio	TUB_SIG_20	2920,81	2917,31	-3,5
Día Promedio	TUB_SIG_44	2890,44	2895,21	4,77
Día Promedio	TUB_SIG_195	2826,42	2822,41	-4,01
Día Promedio	TUB_SIG_85	2823,2	2822,37	-0,83

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.33.

Calibración Solution 1 método rugosidad/demanda del sector Sigchococha



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Sector Pan de Azúcar

Se puede observar en la siguiente tabla que la mayor tolerancia que existe en este sector es de 4.31 m.c.a., por lo tanto, es aceptable.

Tabla 5.2.

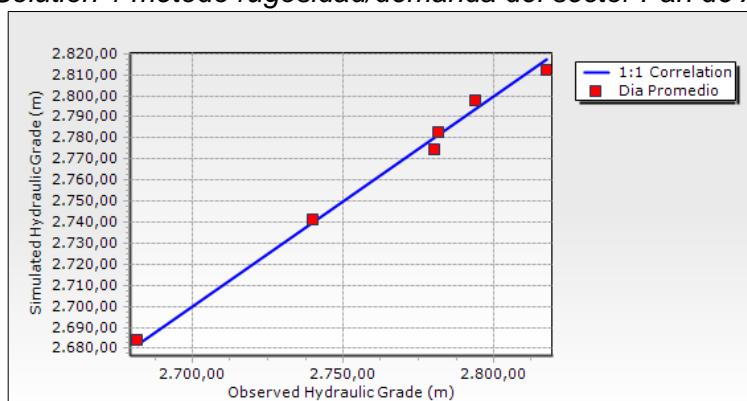
Diferencia del Grado Hidráulico observado con el calculado del sector Pan de Azúcar

DATOS OBSERVADOS EN CAMPO	NODO	GRADO HIDRÁULICO OBSERVADO (m)	GRADO HIDRÁULICO CALCULADO (m)	DIFERENCIA (m)
Dia Promedio	TUB_PAN_602	2.793,77	2.797,92	4,15
Dia Promedio	TUB_PAN_665	2.816,34	2.812,16	-4,18
Dia Promedio	TUB_PAN_471	2.781,44	2.782,56	1,12
Dia Promedio	TUB_PAN_674	2.739,95	2.741,23	1,28
Dia Promedio	TUB_PAN_537	2.779,08	2.774,77	-4,31
Dia Promedio	TUB_PAN_6	2.681,70	2.683,65	1,95

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.34.

Calibración Solution 1 método rugosidad/demanda del sector Pan de Azúcar



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Sector Racar

Se puede observar en la siguiente tabla que la mayor tolerancia que existe en este sector es de 4.38 m.c.a., por lo tanto, es aceptable.

Tabla 5.3.

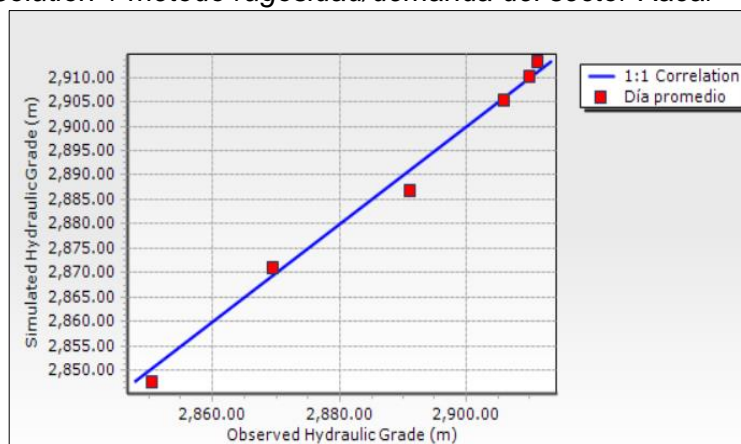
Diferencia del Grado Hidráulico observado con el calculado del sector Pan de Azúcar

DATOS OBSERVADOS EN CAMPO	NODO	GRADO HIDRÁULICO OBSERVADO (m)	GRADO HIDRÁULICO CALCULADO (m)	DIFERENCIA (m)
Día Promedio	TUB_RAC_481	2911,2	2913,25	2,05
Día Promedio	TUB_RAC_150	2891,09	2886,71	-4,38
Día Promedio	TUB_RAC_45	2850,31	2847,62	-2,69
Día Promedio	TUB_RAC_389	2905,86	2905,41	-0,45
Día Promedio	TUB_RAC_224	2909,85	2910,09	0,24
Día Promedio	TUB_RAC_32	2869,49	2871,02	1,53

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.35.

Calibración Solution 1 método rugosidad/demanda del sector Racar



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

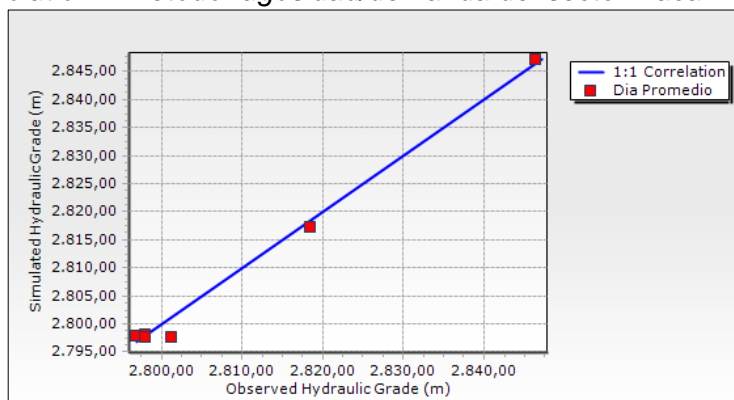
Sector Trinidad

Se puede observar en la siguiente tabla que la mayor tolerancia que existe en este sector es de 3.45 m.c.a., por lo tanto, es aceptable.

Tabla 5.4.*Diferencia del Grado Hidráulico observado con el calculado del sector Trinidad*

DATOS OBSERVADOS EN CAMPO	NODO	GRADO HIDRÁULICO OBSERVADO (m)	GRADO HIDRÁULICO CALCULADO (m)	DIFERENCIA (m)
Día Promedio	TUB_TRI_633	2.846,39	2.847,17	0,78
Día Promedio	TUB_TRI_19	2.818,43	2.817,17	-1,26
Día Promedio	TUB_TRI_296	2.796,77	2.797,78	1,01
Día Promedio	TUB_TRI_230	2.797,92	2.798,20	0,28
Día Promedio	TUB_TRI_667	2.797,86	2.797,67	-0,19
Día Promedio	TUB_TRI_489	2.801,11	2.797,66	-3,45

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.36*Calibración Solution 1 método rugosidad/demanda del sector Racar*

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Sector Pumayunga

Se puede observar en la siguiente tabla que la mayor tolerancia que existe en este sector es de 4.94 m.c.a., por lo tanto, es aceptable.

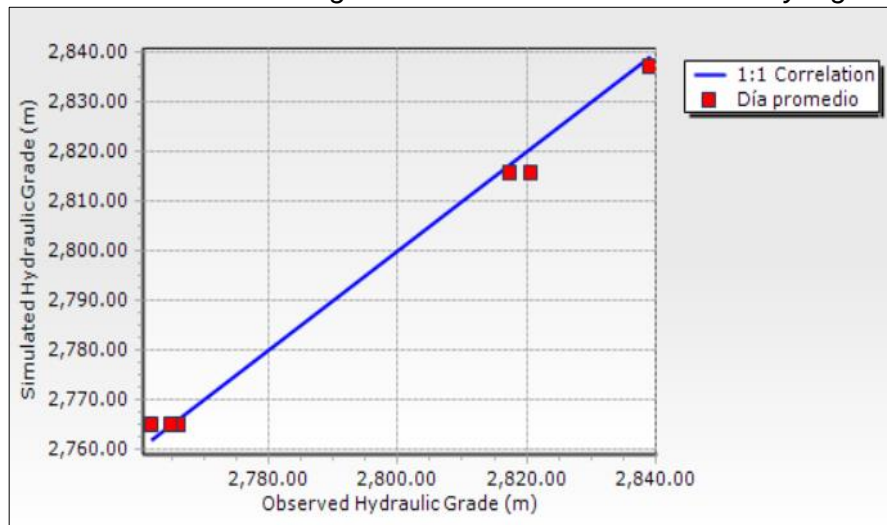
Tabla 5.5.*Diferencia del Grado Hidráulico observado con el calculado del sector Pumayunga*

DATOS OBSERVADOS EN CAMPO	NODO	GRADO HIDRÁULICO OBSERVADO (m)	GRADO HIDRÁULICO CALCULADO (m)	DIFERENCIA (m)
Día Promedio	TUB_PUM_130	2839,02	2837,26	-1,76
Día Promedio	TUB_PUM_226	2817,37	2815,84	-1,53
Día Promedio	TUB_PUM_155	2820,73	2815,78	-4,94
Día Promedio	TUB_PUM_158	2766,1	2765,07	-1,03
Día Promedio	TUB_PUM_9	2764,8	2765,04	0,24
Día Promedio	TUB_PUM_8	2761,92	2765,04	3,12

Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

Figura 5.37.

Calibración Solution 1 método rugosidad/demanda del sector Pumayunga



Nota. Datos obtenidos de la Interfaz del WaterGEMS

CONCLUSIONES

- Para el desarrollo de la modelación y calibración de los sectores Sigchococha, Pan de Azúcar, Racar, Trinidad y Pumayunga, los cuales conforman el sistema Culebrillas, se realizó una obtención y selección exhaustiva de los datos demográficos, cartográficos, catastrales, topográficos, de las dotaciones y los consumos, los cuales fueron proporcionados por la Empresa Pública Municipal de Telecomunicaciones, Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, garantizando que los cálculos realizados en el programa WaterGEMS sean confiables.
- Con los catastros obtenidos de la recopilación previa se analizaron y exportaron los datos del programa AutoCAD al WaterGEMS, con la finalidad de actualizar los modelos hidráulicos de cada sector. Además, mediante el utilitario ArcMap se logró detallar las propiedades de cada uno de los elementos y accesorios que constituye la red de agua potable del sistema como: dotaciones y consumos. De esta manera, con la ayuda de estos programas se desarrollaron los gráficos tanto de las tuberías y nodos como de los accesorios hidráulicos.
- Se estableció un criterio de muestreo probabilístico estratificado, el cual sirvió para la obtención de los datos en campo con la ayuda del instrumento manómetro, que permitió medir las presiones en cada uno de los domicilios. La información recopilada se puede observar mediante tablas, en las que se detalla el número de sub-sectores y de muestras que se obtuvo en cada uno de los sectores que conforman el sistema, lo que permite la comparación y evolución con la simulación de los modelos hidráulicos obtenidos en el programa WaterGEMS.
- Con la recopilación de datos que se obtuvo en campo se hizo un análisis y comparación con los resultados proporcionados por el software, con la finalidad de representar una similitud entre ambos; sin embargo, se observó que la información era distinta, es decir, no se aproximaban a los resultados requeridos, debido a esto se procedió a realizar una calibración. Por lo tanto, con la herramienta *Darwin Calibrator* -que tiene el programa WaterGEMS- se pudo ajustar los datos obtenidos en la modelación hidráulica con la información recopilada en campo, teniendo en cuenta una tolerancia del Grado Hidráulico de ± 5 m.c.a., garantizando el correcto funcionamiento del modelo.

- Una vez obtenida la calibración de los modelos hidráulicos de cada uno de los sectores con sus respectivos parámetros de diseño tanto de presiones, velocidades y tolerancia del grado hidráulico, se concluye que los resultados adquiridos se optimizan.

RECOMENDACIONES

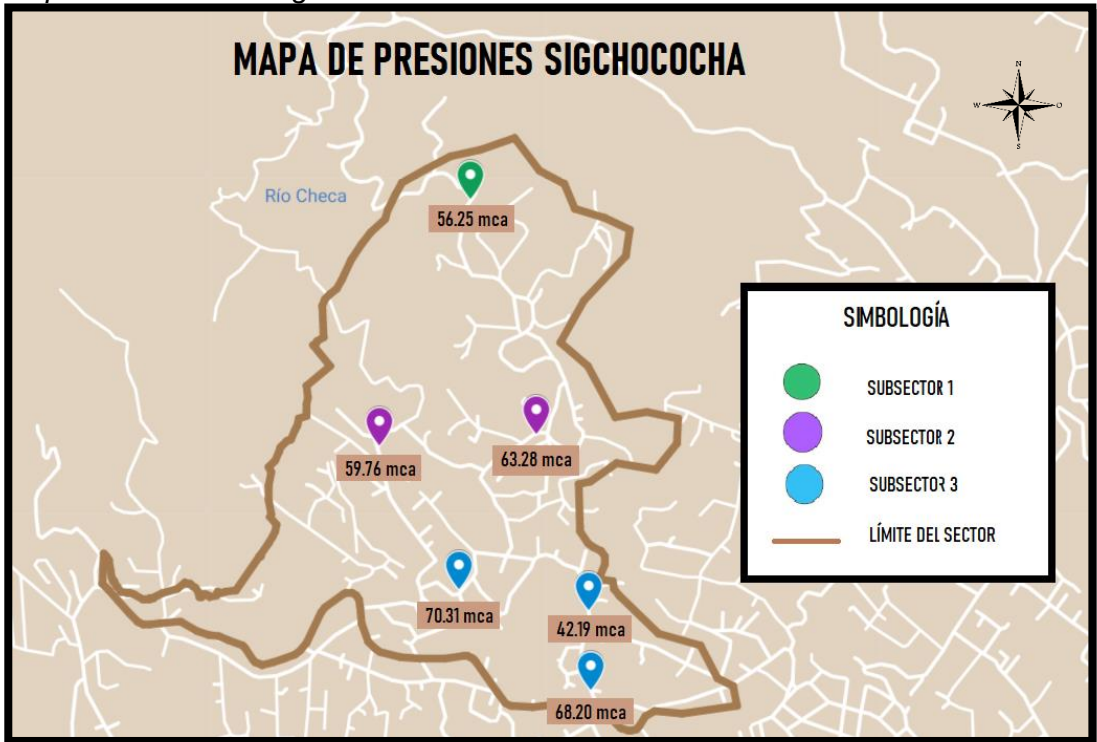
Una vez efectuado la modelación y calibración del sistema de agua potable en los diferentes sectores del estudio y además en función de la información obtenida en campo se han establecido valores con respecto al funcionamiento de la red; con el fin de obtener una optimización en función del requerimiento de la población y las instalaciones del sistema existente, realizamos las siguientes recomendaciones:

- Es importante tener en cuenta la actualización de los modelos hidráulicos para las redes de distribución de agua potable cada vez que estas se vayan ampliando, esto ayudaría a que la toma de decisiones para trabajos futuros sea la más factible, con el único objetivo de lograr que la cantidad, calidad y continuidad del agua en este sistema analizado este de conformidad con los requerimientos de la ciudadanía cuencana.
- Se debería instalar válvulas reguladoras de presión en algunos puntos estratégicos (Ver Anexos desde el 1.6. al 1.10.), puesto que la mayor parte del sistema Culebrillas tiene una topografía con pendientes muy pronunciadas, por esta razón las presiones llegan a tener valores mayores a los 90 m.c.a., lo que produce deterioro en los aparatos sanitarios de los domicilios de cada uno de los sectores.
- Debido al paso del tiempo las rugosidades de las tuberías van variando sustancialmente, por el desgaste que conlleva su uso, como consecuencia se produce un aumento en las velocidades, alterando los resultados que se obtiene en los modelos hidráulicos, por lo tanto, se recomienda realizar un mantenimiento de las tuberías de conformidad con los valores obtenidos y el requerimiento de la población.
- El comportamiento de las válvulas reductoras de presiones es un aspecto importante que tomar en consideración, puesto que es indispensable su correcto funcionamiento para que el sistema se mantenga estable y dentro de los parámetros que exige la normativa; por esta razón se recomienda verificar constantemente las presiones tanto de entrada como de salida.

- Se recomienda utilizar los modelos digitales desarrollados en este proyecto como base para futuras obras en la red del sistema Culebrillas, es decir, instalaciones de nuevas tuberías, facilitando la planificación de los diseños con los datos obtenidos en los modelos de cada uno de los sectores, asegurando que se cumpla las condiciones óptimas.
- Se recomienda realizar inspecciones en los puntos cercanos a las válvulas para comprobar si las presiones que se toman en campo se encuentren aproximadas a las que representan los modelos, con esto se podrían identificar si estas tienen un correcto funcionamiento, caso contrario se debería realizar un mantenimiento o cambiarlas.

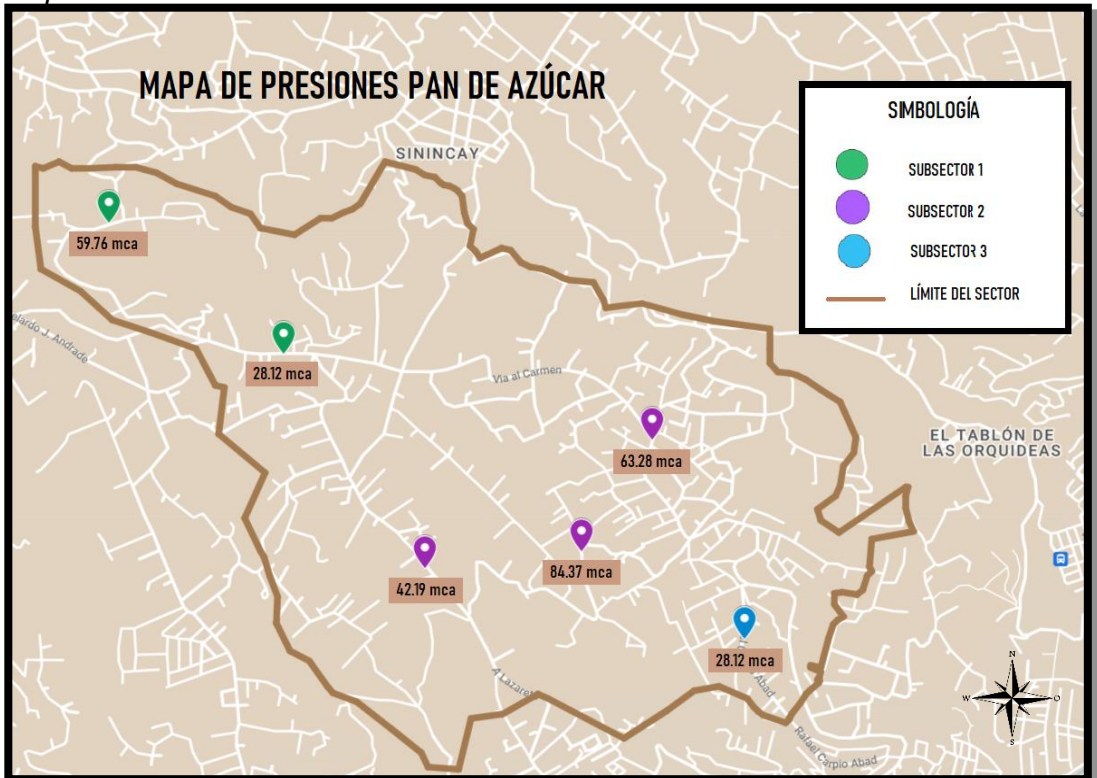
ANEXOS

Anexo 1.1.
Mapa de Presiones Sigchococha



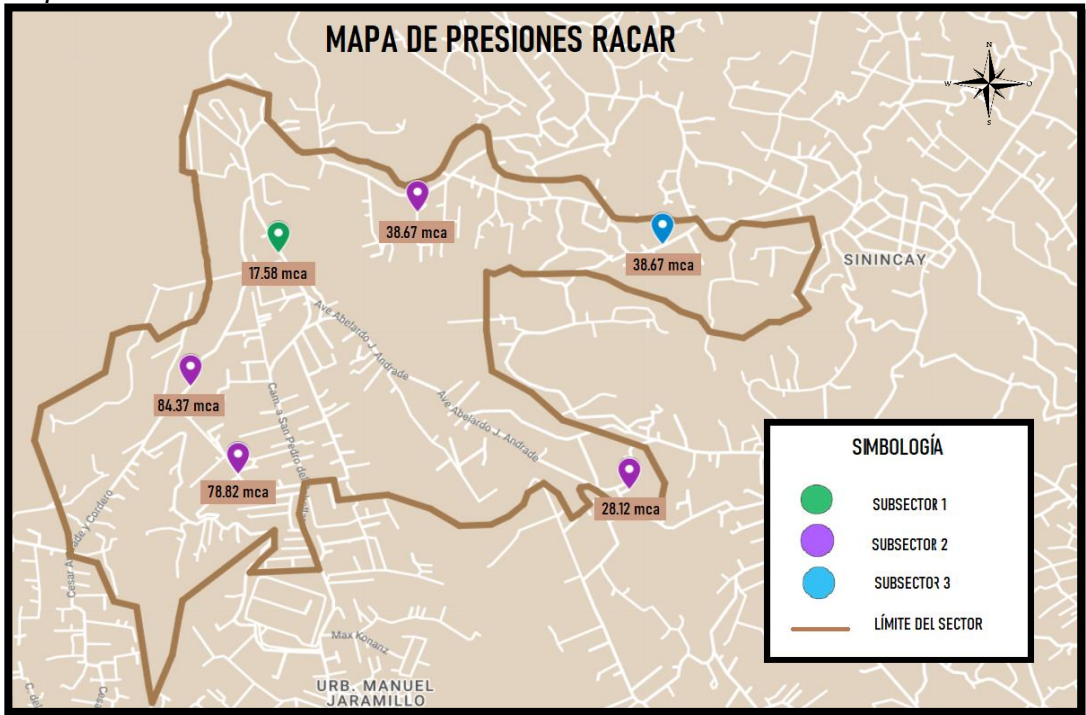
Nota. Datos obtenidos por los Autores

Anexo 1.2.
Mapa de Presiones Pan de Azúcar



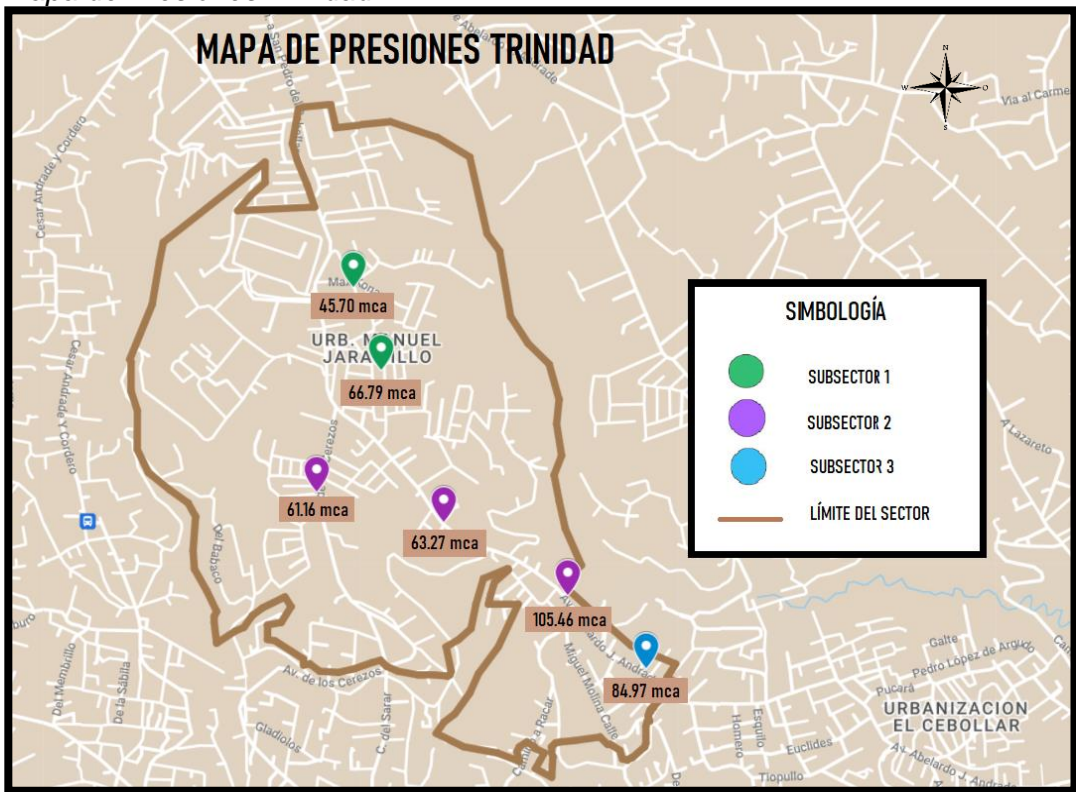
Nota. Datos obtenidos por los Autores

Anexo 1.3.
Mapa de Presiones Racar



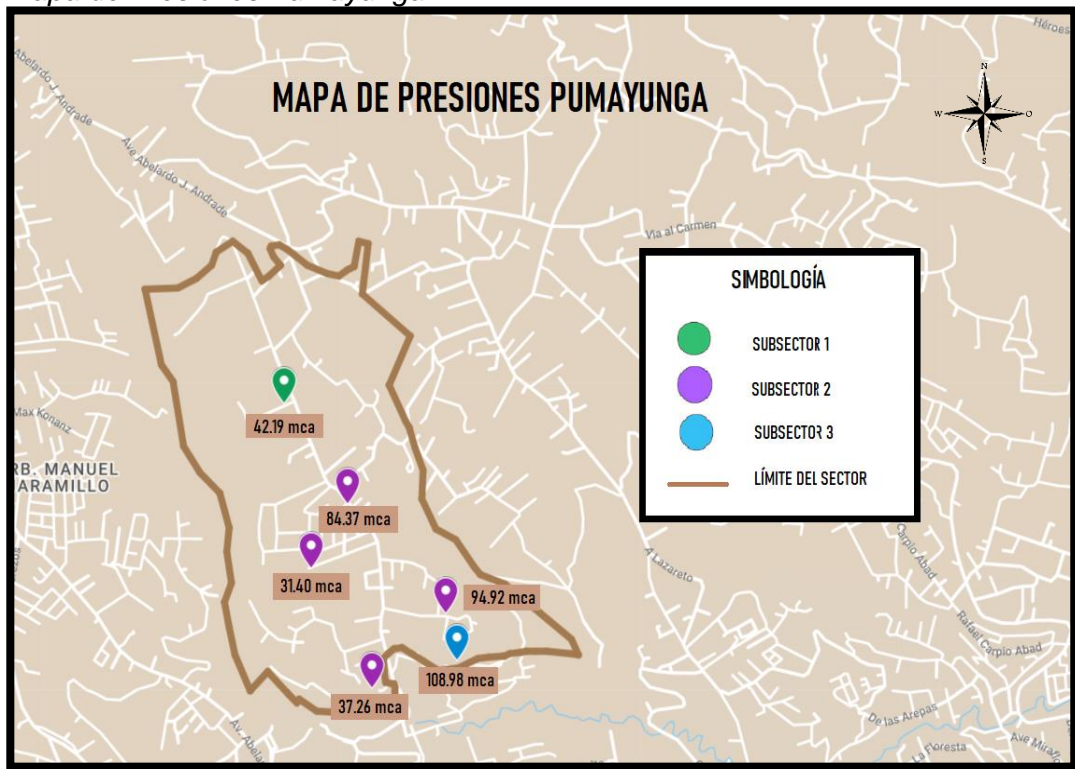
Nota. Datos obtenidos por los Autores

Anexo 1.4.
Mapa de Presiones Trinidad



Nota. Datos obtenidos por los Autores

Anexo 1.5.
Mapa de Presiones Pumayunga



Nota. Datos obtenidos por los Autores

Anexo 1.6.
Mapa de Válvulas PVR recomendadas Sigchococha



Nota. Datos obtenidos por los Autores

Anexo 1.7.

Mapa de Válvulas PVR recomendadas Pan de Azúcar



Nota. Datos obtenidos por los Autores

Anexo 1.8.

Mapa de Válvulas PVR recomendadas Racar



Nota. Datos obtenidos por los Autores

Anexo 1.9.

Mapa de Válvulas PVR recomendadas Trinidad



Nota. Datos obtenidos por los Autores

Anexo 1.10.

Mapa de Válvulas PVR recomendadas Trinidad



Nota. Datos obtenidos por los Autores

BIBLIOGRAFIA

- Avila, R. (2013). Sistemas de agua potable y aguas residuales de la ciudad de Cuenca. *Galileo*, 11.
- Bentley. (06 de Marzo de 2022). *Bentley*. Obtenido de Software de análisis y diseño de sistemas de distribución de agua : <https://www.bentley.com/es/products/product-line/hydraulics-and-hydrology-software/watergems>
- Bhardwaj, V., & Metzgar, C. (2005). Reservoirs, Towers, and Tanks Drinking Water Storage Facilities. *Tech brief*, 4.
- Canal Díaz, N. (2006). Técnicas de muestreo sesgos más frecuentes. *Seden* , 12.
- Código Ecuatoriano de la Construcción CO 10.07-601. (2012). *Normas para estudio y diseño de sistemas de agua potable y disposición de aguas residuales para poblaciones mayores a 1000 habitantes*. Quito: Secretaria del Agua.
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Derechos del Buen Vivir*. Quito: LEXIS.
- Cotos Morales, R. C. (2019). *Mecánica de Fluidos* . Chimbote: Utex .
- ESRI. (06 de Marzo de 2022). *ArcGIS Resources*. Obtenido de Introducción a ArcGIS: <https://resources.arcgis.com/es/help/getting-started/articles/026n00000014000000.htm>
- ESRI. (06 de Marzo de 2022). *ArcMAP*. Obtenido de Qué es un shapefile: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/shapefiles/what-is-a-shapefile.htm>
- ETAPA EP. (2015). *Código de ética y conducta de la empresa pública municipal de telecomunicaciones agua potable, alcantarillado y saneamiento*. Cuenca.
- ETAPA EP. (2022). *ETAPA*. Obtenido de <https://www.etapa.net.ec/principal/agua-potable/operaci%C3%B3n-y-mantenimiento/redes-de-distribuci%C3%B3n>
- ETAPA EP. (06 de Marzo de 2022). *ETAPA*. Obtenido de <https://www.etapa.net.ec/principal/agua-potable/ingreso-de-catastros-y-solicitud-informacion>
- Gutiérrez Hinestroza, M., & Iturralde Kure, S. A. (2017). *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control*. Santa Elena: UPSE.

Heiler, R. (1999). *Valves for the water industry*. Barmen.

Instituto Ecuatoriano de Normalización . (2014). *Código de practica para el diseño de sistemas de abastecimiento de agua potable, disposición de excretas y residuos líquidos en el área rural*. Quito: INEN.

Ladino Moreno , E. O., García Ubaque, C. A., & García Vaca, M. C. (2019). Darcy-Weisbach resistance coefficient determination using Newton-Raphson approach for android 4.0. *Tecnura*, 7.

Ministerio de Inclusion Econimica y Social . (2009). *Reglamento de Prevencion, mitigación y protección contra incendios*. Quito: LEXIS.

Organizacion Mundial de la Salud. (2011). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. Ginebra: Creative Commons.

Tixe, S. (2004). *Guía de diseño para líneas de conducción de impulsión de sistemas de abastecimiento de agua rural*. Lima: Organizacion Panamericana de Salud

Vargas Martínez, N., Loaiza Quintero, J., Acosta Barragan , J., Urregon Zuluaga, J., Plazas Romero, C., Valencia Giraldo, M., . . . Bernal Quiroga, F. (2018). *Protocolo de Modelación Hidrológica e Hidráulica*. Bogotá: IDEAM.