



# | POSGRADOS |

## Maestría en --- **Sistemas Hidráulicos Urbanos de Abastecimiento y Protección**

RPC-SO-24-NO.381-2022

### Opción de Titulación:

Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

### Tema:

Calibración numérica de sistemas de abastecimiento de agua potable en sectores densamente poblados de Guayaquil, Ecuador.

### Autor

Luisa María Barragán Cáceres

### Director:

Byron Andrés Heredia Hidalgo

GUAYAQUIL – Ecuador  
2025



**Autor(es):**



Luisa María Barragán Cáceres  
Ingeniera Civil  
Candidata a Magíster en Sistemas Hidráulicos Urbanos de  
Abastecimiento y Protección por la Universidad Politécnica  
Salesiana – Sede Guayaquil.  
lbarraganc@gmail.com

**Dirigido por:**



Byron Andrés Heredia Hidalgo  
Ingeniero Civil  
Magíster en la carrera de ingeniería en recursos hídricos y manejo  
bheredia@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2025 © Universidad Politécnica Salesiana.

GUAYAQUIL– ECUADOR – SUDAMÉRICA

**Luisa María Barragán Cáceres**

SISTEMAS HIDRÁULICOS URBANOS DE ABASTECIMIENTO Y PROTECCIÓN

**Calibración numérica de sistemas de abastecimiento de agua potable en sectores densamente poblados de Guayaquil, Ecuador.**

## **DEDICATORIA**

A Dios, por ser la luz que ha guiado cada uno de mis pasos a lo largo de este camino académico. Su presencia constante me ha brindado la fortaleza, la serenidad y la sabiduría necesarias para afrontar los desafíos y culminar con éxito esta etapa tan significativa. A Él, toda la honra y gratitud.

A mi familia, por su respaldo incondicional, por el amor que han sabido manifestarme en cada momento y por ser el sostén emocional que me ha impulsado a perseverar. A mis padres, por inculcarme desde temprana edad los valores del esfuerzo, la responsabilidad y la dedicación; a mis hermanos, por su comprensión, apoyo y aliento constante. Este logro es también reflejo del sacrificio y compromiso de cada uno de ustedes.

A los docentes que formaron parte de mi proceso académico, por compartir su conocimiento con vocación, por su guía permanente y por ser referentes de excelencia profesional y ética. Su labor ha sido determinante en la construcción de mi perfil como profesional y como ser humano.

De manera especial, al Ing. Byron Andrés Heredia Hidalgo, tutor de este trabajo de tesis, por su acompañamiento riguroso, su orientación técnica y su disposición permanente para aportar con sus observaciones y experiencia. Su guía ha sido un pilar esencial para la culminación de este proyecto académico.

A todos quienes, de una u otra manera, aportaron con su tiempo, sus palabras o su ejemplo, les extiendo mi más sincero agradecimiento. Este trabajo es el resultado de un esfuerzo colectivo que trasciende lo personal y refleja el valor del acompañamiento en cada etapa del aprendizaje.

## **AGRADECIMIENTO**

Al culminar esta etapa tan significativa en mi formación profesional, deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas e instituciones que hicieron posible la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco a Dios, por ser mi guía constante, por brindarme la fortaleza en los momentos de dificultad y por permitirme alcanzar esta meta con firmeza y esperanza.

A mi familia, por su amor incondicional, su paciencia y su apoyo permanente. Gracias por acompañarme con palabras de aliento, por confiar en mis capacidades y por ser mi mayor fuente de motivación a lo largo de este proceso. Su presencia ha sido fundamental para sostenerme en los momentos más exigentes.

A los docentes de este programa de posgrado, por compartir sus conocimientos con excelencia y compromiso, y por formar parte esencial de mi crecimiento académico y profesional. Cada clase, cada consejo y cada exigencia contribuyeron a fortalecer mis competencias y mi vocación de servicio.

Mi agradecimiento especial al Ing. Byron Andrés Heredia Hidalgo, tutor de este trabajo de tesis, por su orientación técnica, su disposición constante y su guía oportuna durante todo el proceso. Su acompañamiento ha sido clave para estructurar este estudio con rigurosidad y claridad. De igual manera, agradezco al Ing. Christian Domínguez, Coordinador de la Maestría y docente del programa, por su apoyo institucional, su criterio académico y su compromiso con la formación de profesionales con alto nivel técnico.

Extiendo también mi gratitud a mis compañeros de estudios y a todas las personas que, de una u otra manera, aportaron su tiempo, experiencia o palabras de ánimo. Cada gesto ha dejado una huella en este camino.

Finalmente, a la institución que acogió mi proyecto, por facilitar los espacios, la información y los recursos necesarios para su desarrollo.

A todos, mi más sincero reconocimiento.

# Tabla de Contenido

Resumen .....	10
Abstract .....	11
1 Introducción .....	12
2 Determinación del Problema.....	13
3 Objetivo .....	14
4 Marco teórico .....	15
4.1 Normas.....	15
4.2 MA-OED-004 (Manual de diseño de acueducto).....	15
4.3 Modelación hidráulica .....	20
4.4 Elementos que intervienen en la simulación de redes de distribución.....	20
4.4.1. Tuberías .....	20
4.4.2. Nodos.....	20
4.4.3. Reservorio.....	21
4.4.4. Tanques de almacenamiento .....	21
4.4.5. Patrones de consumo .....	21
4.5 Calibración de redes de distribución de agua potable .....	22
4.5.1. Variables que intervienen en la calibración .....	22
4.5.1.1. Variables hidráulicas .....	22
4.5.1.2. Demandas Desconocidas .....	22
4.5.1.3. Emisores.....	22
4.5.1.4. Variables topológicas .....	23
4.5.1.5. Diámetro .....	23
4.5.1.6. Rugosidad.....	23
4.5.1.7. Pérdidas menores .....	23
5 Materiales y metodología.....	23
5.1 Área de estudio.....	24
5.2 METODOLOGIA .....	25
5.3 MATERIALES.....	25
5.3.1. HERRAMIENTAS TECNOLOGICAS.....	25
5.3.2. INSTRUMENTOS.....	26
5.4 Recopilación de datos demográficos del área de estudio .....	26

5.5	Determinación de la demanda .....	27
5.6	Parámetros de modelación.....	28
5.6.1.	Archivos utilizados .....	28
5.6.2.	Criterios de Cálculos Utilizados para este estudio .....	28
5.7	Descripción del modelo .....	29
5.7.1.	Nodos.....	29
5.7.2.	Tuberías .....	30
5.7.3.	Resumen del modelo hidráulico.....	31
5.7.4.	Perfil de consumo .....	31
5.7.5.	Datos de campo .....	32
5.7.6.	Prueba de caudal .....	33
5.7.7.	Prueba de presión.....	34
5.7.8.	Prueba de nivel de tanque .....	34
5.7.9.	Parámetros de calibración.....	35
5.7.10.	Herramienta de calibración automática: Darwin Calibrator .....	35
6	Resultados y discusión.....	37
6.1	Calibración del modelo .....	37
6.1.1.	Calibración Manual.....	37
6.1.1.1.	Análisis de sensibilidad .....	37
6.1.1.2.	Coefficiente horario (K) en el patrón de consumo .....	46
6.1.1.3.	Justificación del Método de Incremento por Porcentaje .....	46
6.1.1.4.	Fundamento técnico .....	47
6.1.1.5.	Aplicación práctica en el proyecto.....	47
6.1.2.	Comprobación del modelo con la herramienta Darwin Calibration .....	49
6.1.3.	Consideraciones para la calibración automática con Darwin Calibration .....	50
6.1.4.	Orientar esta metodología para alcanzar los objetivos investigados .....	56
6.1.5.	Resultados del Análisis de sensibilidad del coeficiente de Rugosidad.....	57
6.1.6.	Resultados del análisis de sensibilidad del coeficiente horario (k) en el patrón de consumo .....	59
6.1.7.	Digitalización del modelo hidráulico en WaterGEMS .....	64
6.1.8.	Calibración del modelo de manera manual verificando parámetros sensibles .....	64
6.1.8.1.	Comparación entre caudal medido y simulado .....	65
6.1.8.2.	Promedios de caudal en el ciclo de simulación .....	66
6.1.9.	Rango general de presiones .....	66
6.1.10.	Evaluación de presiones en nodos con demanda.....	67

---

6.1.11.	Diagnóstico técnico y recomendaciones .....	67
6.1.12.	Calibración automática mediante Darwin Calibrator .....	68
6.1.13.	Evaluación de precisión: comparación de resultados medidos y simulados	68
7	Conclusiones y Recomendaciones.....	75
	Referencias .....	77
	Anexos .....	79

## Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1 Área de estudio.....	24
Ilustración 2 Parámetros de cálculo hidráulico .....	27
Ilustración 3 Tipo de cálculo y método de fricción.....	29
Ilustración 4 Tipo de análisis en el tiempo .....	29
Ilustración 5 Nodos del sistema hidráulico .....	29
Ilustración 6 Tabla de coeficientes horarios asignados al patrón de consumo (PERFIL MC) .....	31
Ilustración 7 Perfil horario de consumo en el modelo hidráulico (PERFIL MC) .....	32
Ilustración 8 Prueba de caudal .....	33
Ilustración 9 Prueba de presión.....	34
Ilustración 10 Prueba de nivel de tanque.....	34
Ilustración 11 Serie de caudal horario asignada al tramo PR-CAUDAL (Pipe 54) en WaterGEMS .....	41
Ilustración 12 Comparación gráfica de caudales simulados vs medidos para distintos niveles de rugosidad .....	43
Ilustración 13 Acceso a la herramienta Darwin Calibrator en WaterGEMS para calibración automática .....	51
Ilustración 14 Creación de un nuevo estudio de calibración en Darwin Calibrator.....	51
Ilustración 15 Configuración del escenario de calibración automática con alternativa de demanda en Darwin Calibrator .....	51
Ilustración 16 Configuración de 50 grupos de demanda individual en Darwin Calibrator .....	52
Ilustración 17 Resultados de ajuste de demanda por grupo tras la calibración automática con Darwin Calibrator .....	53
Ilustración 18 Soluciones óptimas generadas por Darwin Calibrator con sus respectivos valores de fitness.....	55
Ilustración 19 Análisis de sensibilidad del caudal simulado para valores de rugosidad entre $C = 140$ y $C = 152$ – etapa 2.....	59
Ilustración 20 Comparación gráfica de caudal simulado en PR-CAUDAL para cada incremento de K frente al caudal medido.....	63
Ilustración 21 Modelo hidráulico digitalizado del sector Pastor Vera en WaterGEMS .	64
Ilustración 22 Comparación gráfica de caudal horario: medido vs. simulado en escenario base y calibrado final .....	65
Ilustración 23 Curva comparativa del caudal medido vs. calibrado en el escenario final. ....	66

## Índice de Tablas

Tabla 1. Dotación .....	16
Tabla 2. Viscosidad .....	18
Tabla 3. Rugosidad absoluta .....	18
Tabla 4. Datos de medición en campo .....	28
Tabla 5 Determinación del coeficiente de rugosidad C según la edad de las tuberías..	38
Tabla 6 Comparación de caudales horarios simulados y medidos para distintos escenarios de rugosidad (etapa 1) .....	39
Tabla 7. Resultados del indicador Raíz del Error Cuadrático Medio .....	40
Tabla 8 Tabla de simulación horaria por escenarios de rugosidad .....	45
Tabla 9 Escenarios generados por incrementos porcentuales del patrón horario de consumo (coeficiente K) .....	47
Tabla 10 Coeficientes horarios del patrón de consumo generados por incrementos del 10% al 100%.....	49
Tabla 11 Comparación de caudales horarios simulados con coeficientes de rugosidad entre C = 140 y C = 152 .....	58
Tabla 12. Resultados y errores de K para el patrón de consumo.....	60
Tabla 13 Tabla de resultados del caudal simulado en cada escenario de K durante las 24 horas. ....	63
Tabla 14 Comparación horaria de caudal promedio medido y caudal simulado calibrado. ....	66
Tabla 15 Comparación entre calibración manual y calibración automática con Darwin Calibrator .....	69
Tabla 16 Calculo de errores cuadráticos .....	70
Tabla 17 <i>RMSE del caudal simulado con C de 146.4 para 24 h de observación</i> .....	71
Tabla 18 <i>RMSE del caudal simulado con K de 10% para 24 h de observación</i> .....	72
Tabla 19 <i>RMSE del caudal simulado con K de 60% para 24 h de observación</i> .....	73
Tabla 20 <i>RMSE del caudal simulado con K de 20% para 24 h de observación</i> .....	74

## Resumen

*El presente estudio se enmarca en el área de la ingeniería civil, específicamente en la hidráulica aplicada a redes de abastecimiento de agua potable. El proyecto aborda la problemática de la baja eficiencia operativa en el suministro de agua en sectores densamente poblados y sin micro medición, como la Cooperativa Pastor Vera, ubicada al noroeste de Guayaquil. El objetivo principal fue calibrar numéricamente un modelo hidráulico de la red de distribución del sector, utilizando tanto métodos manuales como automáticos, para determinar cuáles parámetros influyen con mayor sensibilidad en el ajuste del modelo. Se realizó un levantamiento topográfico con herramientas digitales, se digitalizó la red en el software WaterGEMS, y se ejecutaron simulaciones con patrones horarios y caudales medidos en campo. Para efectuar la calibración, se desarrollaron análisis de sensibilidad y se escogieron el coeficiente de rugosidad y el coeficiente horario de demanda como parámetros de calibración. En la calibración manual se logró una alta correspondencia entre el caudal simulado y el medido, mientras que en la calibración automática mediante Darwin Calibrator se validó la capacidad del software para ajustar la demanda con base en datos limitados. Entre los principales hallazgos, se identificó que el parámetro con mayor impacto en la simulación del caudal fue la rugosidad, y que el modelo responde de forma sensible a variaciones de hasta  $\pm 10$  unidades en el coeficiente  $C$ . Se concluye que es posible alcanzar una calibración eficiente del modelo hidráulico, incluso en contextos con escasa información, si se aplican metodologías estructuradas y se aprovechan herramientas como Darwin Calibrator para automatizar el proceso y reducir la incertidumbre en la asignación de consumos.*

### **Palabras clave:**

*Abastecimiento de agua; Hidráulica; Modelos matemáticos; Caudal; Simulación por computadora.*

## Abstract

---

*This study is framed within the field of civil engineering, specifically in hydraulics applied to potable water distribution networks. The project addresses the problem of low operational efficiency in water supply in densely populated areas without micrometering, such as the Pastor Vera Cooperative, located in the northwest of Guayaquil. The main objective was to numerically calibrate a hydraulic model of the distribution network using both manual and automatic methods, in order to determine which parameters have the greatest sensitivity in the model's adjustment. A topographic survey was carried out using digital tools, the network was digitized in the WaterGEMS software, and simulations were executed based on hourly demand patterns and field-measured flow rates. To perform the calibration, sensitivity analyses were developed, and the roughness coefficient and hourly demand coefficient were selected as calibration parameters. In the manual calibration, a high correlation was achieved between simulated and measured flow rates, while the automatic calibration using Darwin Calibrator validated the software's ability to adjust demand based on limited data. Among the main findings, roughness was identified as the parameter with the greatest impact on flow simulation, and the model was shown to respond sensitively to variations of up to  $\pm 10$  units in the C coefficient. It is concluded that effective hydraulic model calibration is achievable even in contexts with limited information, provided that structured methodologies are applied and tools like Darwin Calibrator are used to automate the process and reduce uncertainty in demand allocation.*

**.Palabras clave:**

*Hydraulic calibration, numerical model, flow rate, WaterGEMS, water distribution networks*

# 1 Introducción

---

El agua potable es un recurso vital fundamental para garantizar la calidad de vida y buen vivir de la población en áreas densamente pobladas, por lo que es indispensable que las redes de distribución aseguren el suministro de agua a todas las viviendas, garantizando una dotación y presión mínima.

El sector Pastor Vera, ubicado en la Parroquia Tarqui al noroeste de la ciudad de Guayaquil, es un sector popular que no cuenta con servicios públicos permanentes, debido a que es un asentamiento humano informal, el cual se está regularizando ante las autoridades competentes para poder ser atendidos de manera expedita en cuanto a dotación de agua potable y alcantarillado por parte del Municipio de Guayaquil.

Las redes que han sido implementadas en la década pasada, como medida paliativa ante la alta demanda de agua potable, presentan poca presión, lo que dificulta que el líquido vital pueda ser distribuido de manera eficiente a los residentes del sector en estudio. En este contexto, los modelos numéricos hidráulicos se constituyen en herramientas fundamentales para simular el comportamiento real del sistema, identificar deficiencias operativas y evaluar alternativas de mejora sin intervenir físicamente la red. Gracias a estas simulaciones, es posible anticipar el desempeño de la red bajo diferentes escenarios de demanda y condiciones operativas. Por tanto, se vuelve necesario desarrollar una calibración numérica que permita ajustar el modelo a las condiciones reales del sistema, de modo que los técnicos puedan tomar decisiones informadas y orientadas a proporcionar un servicio de calidad y oportuno.

La calibración numérica de los sistemas de distribución de agua potable juega un papel importante en este contexto, debido a que permite optimizar la distribución del agua, garantizando el funcionamiento eficaz de la red. A través de este proceso, se busca ajustar los parámetros del modelo hidráulico hasta lograr una representación lo más cercana posible a las condiciones reales del sistema. De este modo, se obtiene una herramienta confiable que no solo permite evaluar el desempeño actual, sino también proyectar y optimizar el comportamiento del sistema ante escenarios futuros.

Como parte de esta investigación aplicada se propone utilizar el programa de análisis y diseño WaterGems, el cual es un paquete desarrollado para el modelamiento hidráulico avanzado que ayuda a mejorar el conocimiento acerca del comportamiento de la infraestructura un sistema de distribución de agua potable, lo cual a su vez permite tomar decisiones sobre las estrategias operativas que deben implementarse a medida que aumenta la población y las demandas del líquido vital. La investigación consiste en hacer variaciones manuales en los parámetros del modelo numérico para que las mediciones in situ se asemejen a la realidad que alcancen las presiones y caudales. Por otro lado, comparar los resultados con la utilización de la herramienta Darwin Calibrator.

## 2 Determinación del Problema

---

En la ciudad de Guayaquil existen sectores en el norte de la ciudad que al tener una topografía irregular impide que se cumpla con la presión mínima de agua, para esa zona la presión mínima es de 15mca. Esto ocasiona que se requiera de bombeo y tanques elevados para poder cumplir con las necesidades de dotación de agua potable.

El caso de estudio que se analizará será el sector denominado Pastor Vera, que por su desordenado crecimiento poblacional, existen algunos predios asentados en zonas muy altas lo que ocasiona que las presiones sean menores, por lo que es necesario un análisis en el sistema existente para poder solucionar este problema.

Pastor Vera, ubicado en la Parroquia Tarqui al noroeste de la ciudad de Guayaquil, es un sector popular que no cuenta con servicios públicos permanentes, debido a que es un asentamiento humano informal. Desde el año 2022 el municipio se encuentra desarrollando proyectos para la dotación del servicio público a través de Interagua (operadora del servicio de agua potable y alcantarillado).

Debido al crecimiento demográfico desordenado en esta área de la ciudad, en el sector existen cientos de predios que fueron construidos en las cotas más altas (entre 60 y 65 m). Es por esto que con el fin de mejorar la calidad del servicio básico como lo es la

dotación de agua, es imperativo realizar un análisis mediante la modelación hidráulica de las redes. Para obtener un modelo hidráulico que sirva para optimación y toma de decisiones se realiza su respectiva modelación y calibración. Esto garantizará la calidad y continuidad del servicio de agua potable.

## 3 Objetivo

---

### Objetivo general

- Realizar la calibración numérica del sistema de agua potable, utilizando datos actuales medidos en puntos estratégicos mediante métodos manuales de calibración y métodos iterativos con Darwin Calibrator.

### Objetivos específicos

1. Digitalizar el Modelo en WaterGems con los datos recopilados del área de estudio, para poder realizar la simulación hidráulica.
2. Realizar la calibración del modelo de manera manual verificando parámetros sensibles.
3. Realizar la calibración del modelo con la herramienta Darwin Calibrator.
4. Evaluar la precisión del modelo comparando los datos medidos en los puntos estratégicos con los resultados simulados.

## 4 Marco teórico

---

Se ha establecido que para la calibración del modelo hidráulico se utilizará el software WaterGEMS, mediante el cual se realizarán variaciones manuales de los parámetros del modelo numérico con el objetivo de que los resultados simulados se asemejen a las mediciones in situ. Paralelamente, se empleará la herramienta Darwin Calibrator para comparar los resultados obtenidos a través de la calibración automática. Cabe señalar que el acceso a esta herramienta es posible gracias a la licencia académica proporcionada por la Universidad Politécnica Salesiana a través del programa Bentley Academic SELECT.

Para llevar a cabo un modelo robusto inicial, es esencial recopilar la información existente como las características demográficas, topografía, material de las tuberías existentes y mapeo de presiones. Posteriormente, con ayuda de los datos medidos en campo disponibles se realiza la calibración identificada con parámetros sensibles.

### 4.1 Normas

#### 4.2 MA-OED-004 (Manual de diseño de acueducto)

El manual de diseño de acueducto desarrollada por Interagua se asemeja a la norma INEN. Sin embargo, es importante destacar que Interagua, que es la concesionaria encargada de gestionar y distribuir el agua potable en Guayaquil, ha desarrollado su propia norma específica basada en investigación y análisis de las condiciones locales. Por más de 15 años la concesionaria ha recopilado información valiosa sobre factores hidráulicos, geográficos y demanda de consumo. Esto ha permitido que el manual de diseño de acueducto refleje las particularidades y necesidades específicas de la ciudad. Es por esto que para este caso de estudio se usará la norma MA-OED-004 (Manual de acueducto).

- Dotación

Según la norma MA-OED-004 (Manual de acueducto) “ La dotación se establecerá de acuerdo con la zona donde se encuentra ubicada la red en estudio, expresada en

litros por día y por habitante, sujeta al estrato social correspondiente a dicha zona, debiendo considerarse usos, costumbres, disponibilidades de recurso, niveles socioeconómicos, tipo de zona (*urbana, residencial, comercial*).

**Tabla 1. Dotación**

ZONA	2002	2010	2020	2030
A	72.8	120	130	150
B	67.1	108.7	130	140
C	120.5	140	150	150
D	185.5	180	175	170
E	159.6	160	170	165
F	326.2	320	300	280
General	126.6	157.3	177.2	168.9

*Nota: Dotaciones. Fuente: MA-OED-004, 2015.*

- Caudales

- **CAUDAL MEDIO**

Es el caudal promedio obtenido de un año de registros y es la base para la estimación del caudal máximo diario y del caudal máximo horario. Se debe calcular por la fórmula:

$$Q_m = \frac{D P}{86400}$$

En donde:

Q: Caudal medio de agua potable (L/s).

P: Población (hab).

D: Dotación unitaria de agua potable (L/hab/día).

- **CAUDAL MAXIMO DIARIO**

El requerimiento máximo correspondiente al mayor consumo diario, se debe calcular por la fórmula:

$$Q_{md} = K_{md} Q_m$$

Dónde:

Q<sub>md</sub>: Caudal máximo diario de agua potable (L/s).

K<sub>md</sub>: Coeficiente de variación de consumo máximo diario = 1.3 a 1.5

Q<sub>m</sub>: Caudal medio de agua potable (L/s).

- **CAUDAL MAXIMO HORARIO**

Corresponde a la demanda máxima que se presenta en una hora durante un año completo, se determina de la siguiente forma:

$$Q_{mh} = K_{mh} Q_m$$

Dónde:

$Q_{mh}$ : Caudal máximo horario de agua potable (L/s).

$K_{mh}$ : Coeficiente de variación de consumo máximo horario = 2.0 a 2.3

$Q_m$ : Caudal medio de agua potable (L/s).

- Presiones de servicio

El contrato de concesión establece que durante el primer quinquenio de la concesión, el operador deberá realizar el suministro de agua potable manteniendo una presión mínima de 8 mca (11,4 psi) en las zonas nor-este y nor-este de la ciudad y una presión mínima de 5 mca (7, 1 psi) en las zonas centro, sur y en las zonas más alejadas de la ciudad.

Antes de finalizar el segundo quinquenio de la concesión, el operador deberá realizar el suministro de agua potable, manteniendo una presión mínima de 15 mca (21,3 psi) en áreas urbanas. A este nivel de referencia se le denominará presión mínima admisible. Con este valor se pretende mantener el suministro seguro a un edificio de hasta 15 m de altura que no cuenta con bombas elevadoras. Para áreas urbano marginales, el valor de presión mínima deberá ser de 10 mca. (14.20 psi) en el extremo nor-oeste de la ciudad e Isla Trinitaria. (MA-OED-004, 2015).

- Detalles de la red

La localización de las tuberías principales y secundarias preferentemente se hará en los costados norte y este de las calzadas.

Se diseñarán obras de protección cuando las tuberías deben cruzar canales.

Se ubicarán válvulas de aire en los puntos altos de la red de distribución, particularmente en tramos con pendientes ascendentes, cambios de nivel o zonas elevadas donde favorece la acumulación de aire. Estas válvulas permiten evacuar el aire atrapado dentro de las tuberías, evitando obstrucciones y pérdidas de capacidad hidráulica.

Las tuberías de agua potable, deberán estar separadas de las de alcantarillado por lo menos 3 m horizontalmente y 30 cm verticalmente, entre sus superficies exteriores.

Las tuberías deberán estar instaladas a una profundidad mínima de 1 m sobre la corona del tubo.

Se utilizarán anclajes en todos los puntos en los que haya un desequilibrio de fuerzas. (MA-OED-004, 2015).

En la Tabla 2 se presentan los valores de viscosidad del agua para diferentes temperaturas, de acuerdo con la norma MA-OED-004 (2015).

Asimismo, en la Tabla 3 se detallan los valores de rugosidad absoluta para diversos materiales comúnmente empleados en sistemas de distribución de agua potable.

**Tabla 2. Viscosidad**

Temperatura (°C)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad (10 <sup>-3</sup> Pa.s)
0	999.9	1.792
5	1000	1.519
10	999.7	1.308
15	999.1	1.140
20	998.2	1.005
30	995.7	0.801
40	992.2	0.656
50	988.1	0.549

**Nota:** Viscosidad para diferentes temperaturas. **Fuente:** MA-OED-004, 2015.

**Tabla 3. Rugosidad absoluta**

Material	Ks(m)
Acero bridado	0.90 – 9.00
Acero comercial	0.45
Acero galvanizado	0.15
Concreto	0.30 – 3.00
Concreto bituminoso	0.25
GCP	0.25
Hierro forjado	0.06
Hierro fundido	0.15
Hierro dúctil	0.25
Hierro galvanizado	0.15
PRFV	0.05

PVC

0.0015

*Nota: Rugosidad absoluta para diferentes materiales. Fuente: MA-OED-004, 2015.*

- Velocidades admisibles

Para el cálculo de las tuberías de diámetro nominal (DN) sea igual o menos a 200 mm, las velocidades en esas tuberías estarán comprendidas entre los 0,40 m/s y 0,60 m/s.

El objetivo del cálculo con las velocidades mencionadas responde a mantener en las tuberías a instalar una capacidad de conducción remanente que permita cubrir picos inesperados o futuras situaciones de incrementos de caudal no tenidas en cuenta. (MA-OED-004, 2015).

- Pendientes

Se denomina pendiente a la inclinación que presenta una tubería respecto a la horizontal. Todas las tuberías que conforman la red maestra deben contar con una pendiente definida, ya que esta condición permite la evacuación del aire acumulado en su interior. El aire presente dentro de las conducciones proviene de distintas fuentes, está siempre presente y debe ser evacuado para evitar problemas hidráulicos.

Si se permite la acumulación de aire en la tubería, se reduce su capacidad de transporte, pudiendo incluso generar bloqueos en el flujo. (MA-OED-004, 2015).

La pendiente, considerada en el sentido del flujo del agua, puede ser ascendente o descendente. Cuando el aire circula en el mismo sentido del flujo, la pendiente ascendente mínima debe ser del 0,04 %. En cambio, cuando el aire circula en sentido contrario al flujo, la pendiente mínima debe ser del 0,1 %. En este último caso, la pendiente no debe ser menor que la pendiente de la línea piezométrica correspondiente al tramo de tubería. (MA-OED-004, 2015).

De manera ideal, la pendiente de cada tramo debe mantenerse uniforme y acompañar los quiebres naturales del terreno, a fin de minimizar los volúmenes de excavación. Siempre que sea posible, deben respetarse las profundidades de diseño y verificarse posteriormente que la pendiente de la tubería cumpla con los valores mínimos establecidos. (MA-OED-004, 2015).

### 4.3 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.)

Actualmente existen varias herramientas que permiten reproducir de forma rápida y eficaz el comportamiento de las redes de distribución. Se conoce varios paquetes computacionales como: EPANET, WaterCad, WaterGems, que permiten reproducir con funcionamiento de cualquier sistema de distribución sin importar el nivel de complejidad.

### 4.4 Elementos que intervienen en la simulación de redes de distribución

Las redes de distribución son sistemas que tienen gran cantidad de elementos como son tubos, válvulas de control, válvulas de aire, nodos, etc., los cuales son de suma importancia, pues estas en conjunto permiten brindar un servicio de calidad a los usuarios. De acuerdo con JURADO (2007) “Para conseguir que un modelo hidráulico digital represente adecuadamente el comportamiento del prototipo instalado en campo, se requiere que cada uno de estos elementos puedan ser simulados con suficiente precisión”. A continuación se presentan detalladamente las diferentes partes de una red de distribución:

#### 4.4.1. Tuberías

Son indispensables pues representan los conductos por el cual el fluido se desplaza a lo largo de la red, sus principales propiedades con: diámetro, longitud, rugosidad, velocidad, caudal y coeficientes de pérdidas.

#### 4.4.2. Nodos

Los nodos detallan la presión en distintos puntos analizados, es decir representan las uniones entre los tubos de la red de distribución. Propiedades: coordenadas x y y, cota, demanda y presión.

### 4.4.3. Reservorio

Representa la fuente de agua que alimenta a la red de distribución. Propiedades: coordenadas  $x$  y  $y$  y cota

### 4.4.4. Tanques de almacenamiento

Estos tanques están encargados de garantizar la disponibilidad de agua en todo momento. Durante las horas de bajo consumo almacena agua para poder satisfacer en las horas pico. Propiedades: coordenadas  $x$  y  $y$ , cota de fondo, nivel inicial, nivel máximo, nivel mínimo y geometría

### 4.4.5. Patrones de consumo

Los patrones de consumo son representaciones horarias del comportamiento de la demanda de agua a lo largo del día. Reflejan cómo varía el consumo en función de las horas, ya que el uso de agua potable no es constante durante las 24 horas. Por ejemplo, existen picos de demanda en horas de la mañana y la noche, y una disminución en la madrugada.

Estos patrones se construyen en base a mediciones reales o estimaciones estadísticas del consumo horario, y se representan mediante factores de demanda adimensionales, también llamados coeficientes horarios, los cuales multiplican la demanda base asignada a cada nodo.

Cada factor representa un porcentaje relativo del consumo respecto al valor medio diario, siguiendo esta fórmula:

$$\text{Demanda}_h = \text{Demanda base} \times \text{Coeficiente horario}_h$$

Donde:

$\text{Demanda}_h$ : demanda horaria simulada (L/s).

Demanda base: caudal asignado al nodo como valor medio diario (L/s).

Coeficiente horario $_h$ : factor adimensional que representa la variación relativa del consumo en la hora  $h$ .

Estos patrones se ingresan en el modelo hidráulico a través del módulo de “Demand Patterns” en el software WaterGEMS, y luego se asignan a los “Demand Collections” de cada nodo. De esta forma, el modelo puede simular el comportamiento dinámico de la red a lo largo del día, permitiendo analizar caudales y presiones en diferentes horas representativas.

## 4.5 Calibración de redes de distribución de agua potable

En los sistemas de redes de distribución existen varios parámetros que rigen el comportamiento hidráulico. La información de estos se conoce con exactitud en la etapa de diseño. Para redes existentes es imposible conocer con exactitud dichas variables por lo que es necesario calibrar el modelo hidráulico.

La calibración es el proceso en el que se realiza el ajuste de modelos hidráulicos con el fin de reproducir de manera real el funcionamiento de la red de distribución. Para lograr esto es necesario variar los parámetros que rigen el comportamiento hidráulico.

### 4.5.1. Variables que intervienen en la calibración

#### 4.5.1.1. Variables hidráulicas

Las demandas desconocidas hacen referencia al volumen de agua que no está contabilizado en los registros oficiales del sistema. Estas pueden deberse a conexiones ilegales, errores de lectura o manipulación de micromedidores, descalibración de los dispositivos de medición o problemas administrativos en el catastro de usuarios. Este componente de la demanda introduce una incertidumbre significativa en el balance hídrico de la red y puede afectar la precisión del modelo si no se detecta y corrige adecuadamente (Chin, 2013).

#### 4.5.1.2. Demandas Desconocidas

Están asociados a conexiones ilegales, descalibración de los micromedidores instalados o manipulación, errores en las mediciones.

#### 4.5.1.3. Emisores

En el contexto de redes hidráulicas, los emisores se interpretan como fugas o descargas no controladas dentro del sistema de distribución. Estas pérdidas pueden ser resultado de daños en las tuberías debido a variaciones de presión, envejecimiento de los materiales, errores de instalación o fallas en las uniones. Las fugas tienen un impacto directo en la eficiencia operativa, incrementan los costos de producción y disminuyen la presión disponible en sectores vulnerables de la red (Mays, 2000; Tchobanoglous & Schroeder, 1987). En modelación hidráulica, los emisores pueden ser representados como nodos con flujo saliente controlado por coeficientes empíricos.

#### 4.5.1.4. Variables topológicas

Las variables topológicas representan las características físicas del sistema de distribución de agua potable que influyen directamente en la dirección y velocidad del flujo. Estas variables son esenciales para la modelación hidráulica, ya que determinan el comportamiento del sistema en condiciones reales de operación (Mays, 2000; Chin, 2013).

#### 4.5.1.5. Diámetro

El diámetro interno de las tuberías es un parámetro fundamental que define la capacidad de conducción del sistema. Con el paso del tiempo, este puede verse reducido debido a la acumulación de incrustaciones, sedimentos o biopelículas, lo cual provoca una disminución de la sección efectiva y un incremento en las pérdidas por fricción (Mays, 2000). Este fenómeno afecta negativamente el desempeño hidráulico, especialmente en sectores con alta demanda o presión limitada.

#### 4.5.1.6. Rugosidad

La rugosidad hidráulica está directamente relacionada con el material de fabricación de la tubería y el estado de su superficie interna. Dado que las paredes no son completamente lisas, presentan irregularidades que generan resistencia al flujo. Además, con el paso del tiempo, la rugosidad tiende a aumentar, lo cual reduce el diámetro hidráulico efectivo y modifica el coeficiente de fricción (AWWA, 2009).

#### 4.5.1.7. Pérdidas menores

Las pérdidas menores corresponden a la pérdida de energía generada por turbulencias en puntos específicos de la red, como codos, válvulas, reducciones, tees y demás accesorios. Estas pérdidas se calculan utilizando coeficientes empíricos y pueden representar una proporción importante del total, especialmente en redes con múltiples conexiones o variaciones de dirección (Chin, 2013). Su estimación está sujeta a un grado significativo de incertidumbre, ya que depende de variables como el tipo de accesorio, la calidad de las uniones, el grado de apertura de válvulas y el estado del material.

## 5 Materiales y metodología

## 5.1 Área de estudio

El área de estudio corresponde al sector geográfico definido por la Pre-Cooperativa de Vivienda Pastor Vera, ubicada dentro de la Cooperativa de Vivienda Juan Montalvo, al norte de la ciudad de Guayaquil, la cual se describe en la Fig. 5.1.

El área corresponde a 45 hectáreas, en las cuales se aplicarán netamente una calibración hidráulica y no el diseño, ni solución en la red. Para tal fin, se utilizó el programa digital en línea *Google Earth* utilizando la herramienta “Ruta”, lo cual se generará un archivo KML con los puntos límite del sector.

Ilustración 1 Área de estudio



(a)



(b)

*Nota: (a) La flecha naranja indica la ubicación de la Coop. Juan Montalvo. (b) El sector demarcado en la ortofoto corresponde a Pastor Vera, dentro de la Coop. Juan Montalvo. Fuente: (M.I. Municipalidad de Guayaquil, 2020) y autora.*

## 5.2 METODOLOGIA

Para el proceso de calibración hidráulica, se utilizó como dato de referencia el caudal medido durante 24 horas continuas en una tubería principal del sistema (tramo PR-CAUDAL), obtenido mediante prueba de campo. Este valor sirvió como base comparativa para ajustar los parámetros del modelo tanto en la calibración manual como en la calibración automática mediante Darwin Calibrator. La elección del caudal como variable de ajuste responde a su disponibilidad y confiabilidad, y a la posibilidad de registrar su variación horaria con precisión

Los materiales utilizados son los descritos como técnicas e instrumentos, los cuales se describen a continuación:

## 5.3 MATERIALES

### 5.3.1. HERRAMIENTAS TECNOLOGICAS

- **Software:** WaterGEMS®.

- **Herramientas de optimización:** Darwin Calibrator®.

### 5.3.2. INSTRUMENTOS

- **Fuentes de datos:** Planos de redes, topografía, pruebas de caudal, pruebas de presión, nivel de tanque y la demanda

## 5.4 Recopilación de datos demográficos del área de estudio

La caracterización demográfica del área de estudio constituye una fase clave para definir el comportamiento de la demanda dentro del modelo hidráulico. En esta etapa se recopiló datos de usuarios correspondientes a predios ubicados dentro del sector Pastor Vera, con el objetivo de identificar tanto la cantidad de conexiones existentes como los patrones de consumo asociados a cada una de ellas.

La información fue obtenida a partir de registros históricos proporcionados por la operadora del servicio de agua potable de Guayaquil, los cuales incluyen detalles sobre la cantidad de usuarios conectados formalmente al sistema, así como las lecturas de consumo mensual de agua por predio. Esta base de datos permitió cuantificar la carga actual del sistema mediante la determinación del caudal promedio de entrada a la red, obtenido a partir de mediciones en campo. Este valor representativo del comportamiento global del sistema fue empleado como punto de partida para la distribución de las demandas individuales en los nodos del modelo hidráulico, conforme al patrón de consumo horario asignado. De esta manera, el caudal medio se constituyó en la referencia principal para el ajuste inicial del modelo.

Durante el proceso de sistematización, los consumos individuales fueron transformados en unidades de caudal (L/s), estandarizados mediante factores de conversión y coeficientes horarios de consumo, lo que permitió representar adecuadamente la variabilidad de la demanda a lo largo del día. De igual manera, se realizó una depuración de registros inconsistentes y duplicados, garantizando la confiabilidad de los datos empleados en la modelación.

Adicionalmente, se georreferenciaron los predios con consumo positivo mediante herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), permitiendo vincular cada usuario con un nodo específico del modelo. Este procedimiento fue fundamental para

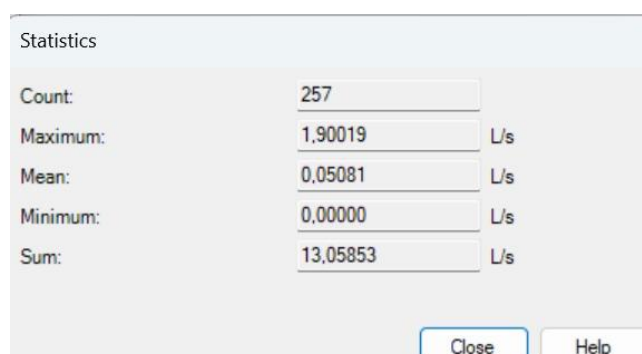
reflejar la distribución espacial real de la demanda, y para garantizar que el sistema hidráulico simulado responda a las condiciones actuales de consumo observadas en el sector.

La información procesada permitió no solo alimentar el modelo, sino también establecer criterios técnicos para la redistribución del caudal no contabilizado en etapas posteriores del análisis, en base al comportamiento real de los usuarios conectados al sistema.

## 5.5 Determinación de la demanda

Para el desarrollo del presente proyecto se contó con datos reales de demanda correspondientes al mes de septiembre del año 2021, registrándose un caudal promedio de 13,05 L/s para el sector en estudio. Este valor fue distribuido entre los nodos del modelo hidráulico, en función de su localización y características de consumo, permitiendo representar de forma realista las condiciones operativas de la red.

**Ilustración 2** *Parámetros de cálculo hidráulico*



Statistics		
Count:	257	
Maximum:	1,90019	L/s
Mean:	0,05081	L/s
Minimum:	0,00000	L/s
Sum:	13,05853	L/s

Close Help

La asignación de demandas a los nodos del modelo hidráulico se realizó a partir de los consumos mensuales por predio proporcionados por el Ing. Miguel Carvajal, quien facilitó los datos de facturación en metros cúbicos por mes ( $m^3/mes$ ) correspondientes a cada cuenta del sector en estudio. Estos valores fueron convertidos a litros por segundo (L/s) aplicando los factores de conversión respectivos. Para distribuir espacialmente los consumos, se empleó el método de los polígonos de Thiessen, el cual permite definir áreas de influencia en función de la cercanía de cada predio a un nodo de demanda. La delimitación se realizó en un entorno SIG (QGIS), asignando cada consumo al nodo geográficamente más próximo. Este procedimiento fue validado

previamente en reuniones técnicas y se consideró adecuado para representar de forma realista la distribución del consumo dentro del modelo hidráulico.

## 5.6 Parámetros de modelación

### 5.6.1. Archivos utilizados

La información técnica utilizada para el desarrollo de este estudio fue proporcionada por el Ing. Miguel Carvajal, quien compartió datos fundamentales con fines estrictamente educativos. Entre los insumos entregados se encuentran:

- Plano de la red de distribución del sector en estudio, que permitió comprender la configuración actual del sistema.
- Datos de medición en campo, esenciales para la calibración hidráulica del modelo. Caudal y Presión.

**Tabla 4.** Datos de medición en campo

	Time from Start (hours)	Flow (L/s)		Time from Start (hours)	Pressure (m H2O)
1	0,000	8,52	1	0,000	15,960
2	1,000	5,27	2	1,000	16,130
3	2,000	4,14	3	2,000	16,170
4	3,000	4,04	4	3,000	16,130
5	4,000	4,33	5	4,000	16,170
6	5,000	6,60	6	5,000	16,040
7	6,000	13,16	7	6,000	15,540
8	7,000	17,07	8	7,000	15,080
9	8,000	18,27	9	8,000	15,080
10	9,000	20,62	10	9,000	14,960
11	10,000	21,49	11	10,000	14,710
12	11,000	22,10	12	11,000	14,580
13	12,000	21,51	13	12,000	14,830
14	13,000	20,85	14	13,000	14,960
15	14,000	20,16	15	14,000	14,960
16	15,000	19,72	16	15,000	14,830
17	16,000	19,18	17	16,000	14,920
18	17,000	19,54	18	17,000	14,750
19	18,000	19,55	19	18,000	14,710
20	19,000	20,74	20	19,000	14,790
21	20,000	19,55	21	20,000	14,880
22	21,000	18,69	22	21,000	14,880
23	22,000	16,00	23	22,000	15,210
24	23,000	11,91	24	23,000	15,580

- Archivo PDF con curvas de nivel del sector, el cual facilitó el análisis topográfico y la correcta asignación de elevaciones a los nodos del sistema.

Esta documentación ha sido empleada exclusivamente con propósitos académicos en el marco de la presente investigación, respetando la confidencialidad y el uso ético de la información proporcionada

### 5.6.2. Criterios de Cálculos Utilizados para este estudio

Tipo de cálculo y método de fricción

**Ilustración 3** Tipo de cálculo y método de fricción

Friction Method	Hazen-Williams
Output Selection Set	<All>
Calculation Type	Hydraulics Only

Tipo de análisis en el tiempo

**Ilustración 4** Tipo de análisis en el tiempo

Calculation Times	
Simulation Start Date	24/5/2025
Time Analysis Type	EPS
Start Time	0:00:00
Duration (hours)	24,000
Hydraulic Time Step (hours)	1,000
Reporting Time Step	Constant
Reporting Time Step (hours)	1,000

## 5.7 Descripción del modelo

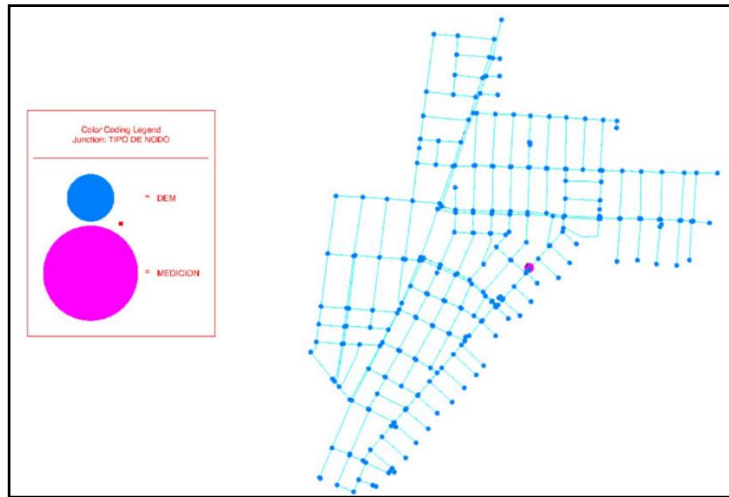
### 5.7.1. Nodos

El modelo hidráulico está compuesto por **268 nodos**, los cuales representan puntos clave de la red, tales como derivaciones, intersecciones de tuberías y conexiones de demanda. Cada nodo fue georreferenciado con base en la topografía del área de estudio, garantizando la coherencia altimétrica del sistema modelado.

Desde el punto de vista altitudinal, los nodos presentan una variación de cotas que **oscila entre los 30 y 63 metros sobre el nivel del mar**, de acuerdo con el modelo digital de elevaciones empleado. Esta diferencia topográfica influye directamente en el comportamiento hidráulico del sistema, siendo los **nodos localizados en cotas más altas (hasta 63 m) considerados hidráulicamente exigentes**, ya que requieren un mayor potencial energético para mantener condiciones de servicio adecuadas.

Por su parte, los **nodos en cotas más bajas (desde 30 m)** están sujetos a mayores cargas piezométricas, lo que implica un seguimiento técnico para asegurar que las condiciones de presión se mantengan dentro de rangos operativos seguro.

**Ilustración 5** Nodos del sistema hidráulico



En cada nodo del modelo hidráulico se ha asignado la elevación correspondiente, basada en el análisis topográfico del área de estudio. Para facilitar la interpretación visual de las diferencias altimétricas dentro de la red, se incorporó una simbología por rangos de color, la cual permite identificar de forma rápida las variaciones de cota entre los nodos.

La escala de colores utilizada en el modelo abarca desde la cota 30 m.s.n.m. hasta la cota 63 m.s.n.m., reflejando con precisión el relieve del terreno y sus implicaciones en el comportamiento hidráulico del sistema.

### 5.7.2. Tuberías

Con el objetivo de facilitar la interpretación del modelo hidráulico, se implementó un esquema cromático que representa visualmente los diámetros nominales de las tuberías. Esta codificación por colores fue aplicada dentro del entorno WaterGEMS®, permitiendo identificar fácilmente los distintos tramos según su tamaño y optimizar el análisis hidráulico.

Los diámetros incluidos en el modelo varían entre 90 mm y 200 mm, según la información recopilada en planos técnicos y validaciones realizadas con apoyo del Ing. Miguel Carvajal, quien proporcionó datos clave sobre la infraestructura existente.

En cuanto a los materiales, se identificó el uso predominante de PVC, PEAD y HD (hierro dúctil), los cuales fueron asignados a los tramos correspondientes con base en la información técnica disponible. Estos materiales influyen directamente en los parámetros hidráulicos del modelo, como el coeficiente de rugosidad empleado durante el proceso de calibración.

Respecto a la antigüedad del sistema, se estimó que las tuberías poseen aproximadamente 25 años de operación, conforme a la referencia proporcionada por el Ing. Carvajal. Esta estimación fue fundamental para establecer los escenarios de análisis de deterioro y ajustar los valores del coeficiente de Hazen-Williams en función del envejecimiento.

### 5.7.3. Resumen del modelo hidráulico

Componente del modelo	Descripción
<b>Tuberías</b>	Elementos de distintos diámetros y materiales que conforman la red de conducción del sistema.
<b>Nodos</b>	Representan puntos de consumo (demanda) y de control (medición) en la red hidráulica.
<b>Válvulas de paso</b>	Incorporadas estratégicamente para permitir la operación, regulación y sectorización del sistema de distribución.
<b>Tanque elevado</b>	Actúa como componente de regulación hidráulica y almacenamiento intermedio.
<b>Reservorio</b>	Fuente principal de abastecimiento; suministra agua al tanque, el cual distribuye el caudal hacia la red.
<b>Propósito del modelo</b>	Replicar fielmente el comportamiento hidráulico del sistema, simular distintos escenarios operativos y ejecutar procesos de calibración.

### 5.7.4. Perfil de consumo

El modelo hidráulico incorpora un perfil de consumo horario que representa la variación de la demanda a lo largo del día. Este patrón ha sido ingresado como coeficientes horarios aplicados sobre la demanda base en los nodos correspondientes.

La información utilizada para construir este perfil fue proporcionada por el Ing. Carvajal, y refleja el comportamiento típico del consumo en el sector en estudio. Este patrón es esencial para simular correctamente las condiciones reales de operación del sistema y evaluar el desempeño hidráulico en distintos momentos del día.

A continuación, se presenta el perfil utilizado:

**Ilustración 6** *Tabla de coeficientes horarios asignados al patrón de consumo (PERFIL MC)*

Pattern Library Notes

Start Time: 0:00:00

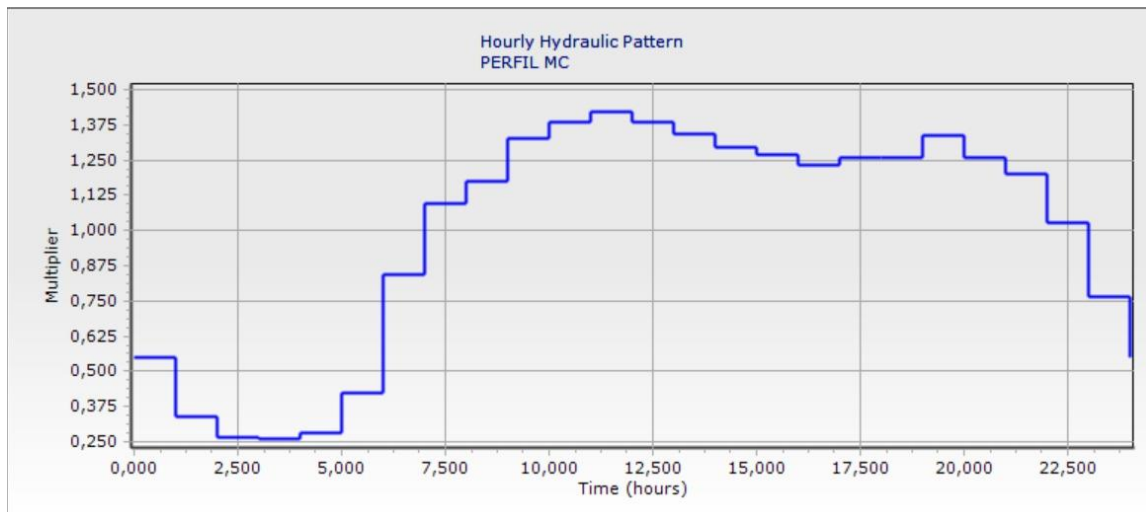
Starting Multiplier: 0,548

Pattern Format: Stepwise

Hourly Daily Factors Monthly Factors

	Time from Start (hours)	Multiplier
1	1,000	0,339
2	2,000	0,266
3	3,000	0,260
4	4,000	0,279
5	5,000	0,424
6	6,000	0,846
7	7,000	1,098
8	8,000	1,176
9	9,000	1,326
10	10,000	1,383
11	11,000	1,422
12	12,000	1,384
13	13,000	1,342
14	14,000	1,297
15	15,000	1,269
16	16,000	1,234
17	17,000	1,257
18	18,000	1,258
19	19,000	1,335
20	20,000	1,258
21	21,000	1,203
22	22,000	1,029
23	23,000	0,766
24	24,000	0,548
*		

Ilustración 7 Perfil horario de consumo en el modelo hidráulico (PERFIL MC)



### 5.7.5. Datos de campo

Los datos de campo proporcionados corresponden a una prueba de campo de Caudal y Presión, ubicada dentro del área de estudio, cuyas coordenadas aproximadas son: 620352.00 m E y 9764481.00 m S.

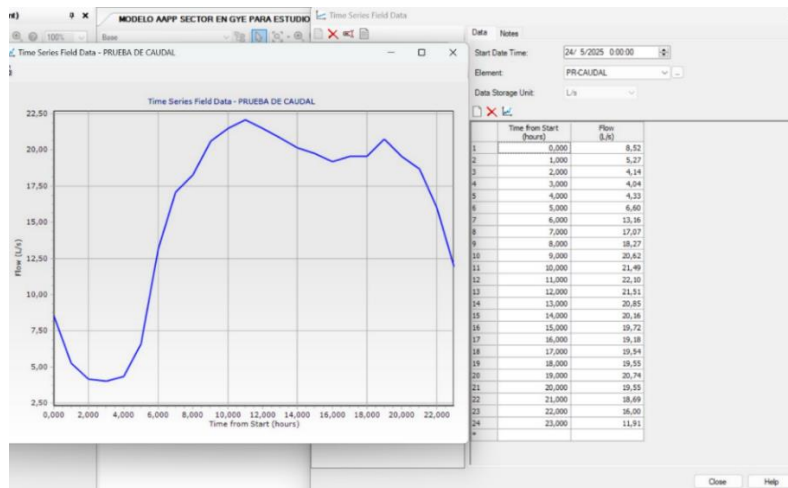
Ilustración 8 Coordenadas



### 5.7.6. Prueba de caudal

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento real del sistema, se realizó una prueba de caudal en campo. Los datos obtenidos fueron registrados a lo largo de un período de 24 horas con un intervalo horario de una hora. Estos datos fueron ingresados al modelo como una serie temporal bajo el nombre "PR-CAUDAL".

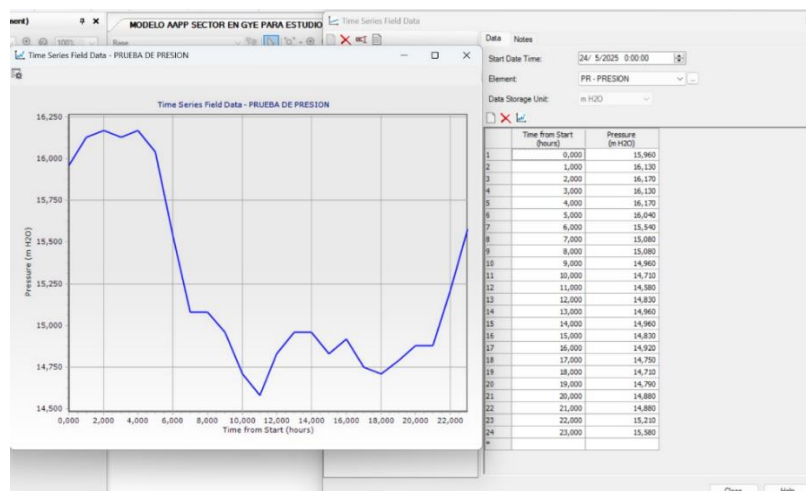
Ilustración 9 Prueba de caudal



### 5.7.7. Prueba de presión

De manera complementaria, se ejecutó una prueba de presión en campo durante el mismo periodo, utilizando un registrador automático de presión conectado a un nodo específico de la red. Los resultados fueron cargados en el modelo como una serie de datos temporales bajo el nombre "PR-PRESION".

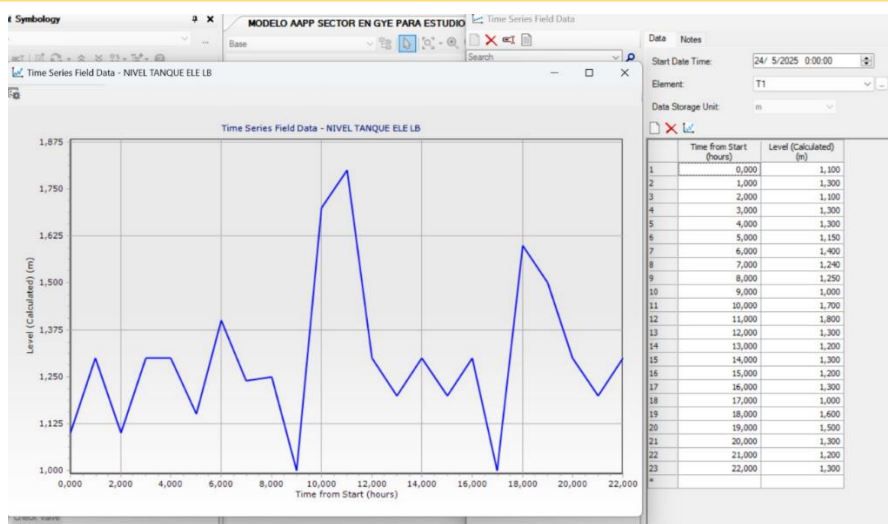
**Ilustración 10** Prueba de presión



### 5.7.8. Prueba de nivel de tanque

Nivel del tanque elevado durante un periodo continuo de 24 horas. La información fue registrada y asociada al elemento T1 en el modelo, bajo la serie temporal titulada "NIVEL TANQUE ELE LB".

**Ilustración 11** Prueba de nivel de tanque



### 5.7.9. Parámetros de calibración

#### Parámetros considerados en la calibración del modelo

Para el proceso de calibración del modelo hidráulico se identificaron y ajustaron los parámetros más sensibles que afectan directamente el comportamiento del sistema, con el objetivo de lograr una mejor concordancia entre los valores simulados y los datos reales medidos en campo. Los principales parámetros calibrados fueron:

- Coeficiente de rugosidad (C): Asociado a la fricción interna de las tuberías. Se calibró considerando la edad, material y estado de conservación de las conducciones, con base en referencias técnicas de AWWA y Bentley.
- Patrón horario de consumo (coeficiente K): Representa la variación horaria del caudal consumido. Se ajustó para reflejar los hábitos de consumo reales del sector y su impacto sobre las condiciones de presión y caudal en la red.
- Demanda nodal: Si bien se mantuvo constante durante el proceso de sensibilidad, su distribución se ajustó inicialmente mediante polígonos de Thiessen en QGIS, utilizando datos de consumo mensual por predio.

Estos parámetros fueron calibrados mediante un enfoque manual iterativo y, posteriormente, mediante la herramienta Darwin Calibrator, lo que permitió comparar ambas metodologías.

#### 5.7.10. Herramienta de calibración automática: Darwin Calibrator

Darwin Calibrator es una herramienta integrada en el software WaterGEMS que permite realizar la calibración automática de modelos hidráulicos mediante algoritmos de optimización. Su función principal es ajustar ciertos parámetros del modelo (como el

coeficiente de rugosidad, las demandas en nodos o los coeficientes de emisividad de válvulas) para que los resultados simulados se acerquen lo más posible a los datos medidos en campo.

Este módulo utiliza métodos evolutivos y técnicas de búsqueda heurística para evaluar múltiples combinaciones de parámetros dentro de un rango definido por el usuario. A través de un proceso iterativo, Darwin Calibrator selecciona las soluciones más prometedoras, compara los resultados con las observaciones reales y ajusta automáticamente los valores del modelo para minimizar el error, usualmente expresado como RMSE o MAE.

Gracias a esta funcionalidad, el proceso de calibración se vuelve más eficiente, sistemático y reproducible, especialmente útil cuando se dispone de grandes volúmenes de datos o redes complejas.

## 6 Resultados y discusión

---

### 6.1 Calibración del modelo

#### 6.1.1. Calibración Manual

#### 6.1.2. Análisis de sensibilidad

Una vez construido el modelo hidráulico base, se procedió a la calibración manual del sistema mediante un proceso iterativo de ajuste de parámetros sensibles. Esta calibración busca reducir la diferencia entre los valores simulados por el modelo y las mediciones reales tomadas en campo, especialmente en cuanto a presiones y caudales.

En sistemas hidráulicos, este tipo de análisis permite identificar qué variables tienen mayor influencia en el comportamiento del sistema, y por tanto, deben ser calibradas con mayor precisión.

El análisis de sensibilidad consiste en modificar sistemáticamente uno o más parámetros dentro de un rango determinado, mientras se mantienen constantes los demás, con el objetivo de observar el impacto que estos cambios generan en los resultados simulados, tales como presiones, caudales o velocidades. Este enfoque permite priorizar qué parámetros requieren mayor atención en el proceso de calibración y mejora la comprensión del modelo.

#### **Resultados de Calibración**

El coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams, comúnmente conocido como coeficiente C, es un parámetro clave en los modelos hidráulicos. Este valor representa la fricción que se genera dentro de las tuberías y, por tanto, tiene un impacto directo en la pérdida de carga y en el comportamiento del caudal dentro del sistema. Su valor depende del material del conducto, del estado de conservación y de los años de funcionamiento.

En este estudio, se definió un rango de valores para el coeficiente de rugosidad C con base en la literatura técnica y la vida útil estimada de las tuberías del sistema. Considerando que la red está compuesta principalmente por tuberías de PVC, PEAD y HD, con una antigüedad aproximada de 25 años, se tomaron como referencia los rangos indicados por la American Water Works Association (AWWA, 2002) y el manual de

Bentley (2023), los cuales sitúan los valores de C entre 130 y 155 para PVC dependiendo del grado de deterioro.

Luego, para este estudio se optó por analizar la rugosidad de la red en dos etapas. En la primera, se trabajó con valores obtenidos desde una tabla técnica referenciada en el Manual AWWA M32, la cual presenta valores típicos del coeficiente de rugosidad (C) para distintos materiales y edades de tuberías. Con base en esta tabla se crearon cinco escenarios representando una red con 5, 10, 15, 20 y 25 años de antigüedad.

En todos los escenarios se mantuvieron constantes tanto el patrón horario de consumo como las demandas asignadas a los nodos, modificando únicamente el valor del coeficiente de rugosidad C como variable independiente.

**Tabla 5** *Determinación del coeficiente de rugosidad C según la edad de las tuberías.*

DETERMINACION DE LA RUGOSIDAD EN BASE A LA EDAD DEL TUBO						
Material	0 años	5 años	10 años	15 años	20 años	25 años
PVC	150	146,4	142,3	137,1	131,6	126,2
PEAD	150	146,4	142,3	137,1	131,6	126,2
HD	140	135	130	120	110	95

Aunque la red del sector en estudio (Coop. Pastor Vera) tiene una edad aproximada de 25 años, los primeros resultados mostraron que el escenario correspondiente a los 5 años arrojaba un mejor comportamiento hidráulico en relación al caudal medido. Esto sugiere que, pese a su antigüedad, las tuberías presentan un estado relativamente favorable.

Lo que se obtuvo fue el caudal horario simulado en la tubería PR-CAUDAL, donde esta colocada la prueba de caudal para cada uno de los cinco escenarios definidos, frente al caudal medido en campo durante un período de 24 horas. El análisis permitió identificar los siguientes comportamientos:

- Todos los escenarios comparten la misma curva de consumo, ya que se utilizó un patrón horario común. Sin embargo, la magnitud del caudal varía en función del coeficiente de rugosidad asignado.

- A menor antigüedad (mayor C), el caudal simulado se acerca más al valor medido. Este comportamiento es evidente en el escenario RUG 5 AÑOS, que presenta una curva muy próxima a la medición real.
- Por el contrario, los escenarios correspondientes a 20 y 25 años tienden a subestimar el caudal en la mayor parte del día, debido al aumento de fricción asociado con los valores más bajos de C.

**Tabla 6** Comparación de caudales horarios simulados y medidos para distintos escenarios de rugosidad (etapa 1)

TIME (HORA)	CAUDAL PROMEDIO MEDIDO L/s	ESCENARIO RUG 5 AÑOS	ESCENARIO RUG 10 AÑOS	ESCENARIO RUG 15 AÑOS	ESCENARIO RUG 20 AÑOS	ESCENARIO RUG 25 AÑOS
0	8,517416667	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16
1	5,271333333	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43
2	4,14175	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47
3	4,03975	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
4	4,334416667	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64
5	6,596833333	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54
6	13,15591667	11,05	11,05	11,05	11,05	11,05
7	17,071	14,34	14,34	14,34	14,34	14,34
8	18,272	15,36	15,36	15,36	15,36	15,36
9	20,616	17,32	17,32	17,32	17,32	17,32
10	21,49333333	18,06	18,06	18,06	18,06	18,06
11	22,10333333	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57
12	21,50558333	18,07	18,07	18,07	18,07	18,07
13	20,85425	17,52	17,52	17,52	17,52	17,52
14	20,15958333	16,94	16,94	16,94	16,94	16,94
15	19,71991667	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57
16	19,17983333	16,11	16,11	16,11	16,11	16,11
17	19,53525	16,41	16,41	16,41	16,41	16,41
18	19,55183333	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43
19	20,74258333	17,43	17,43	17,43	17,43	17,43
20	19,54941667	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43
21	18,69383333	15,71	15,71	15,71	15,71	15,71
22	15,99641667	13,44	13,44	13,44	13,44	13,44
23	11,905	10	10	10	10	10

Los resultados muestran que, a pesar de que la red tiene una antigüedad real de aproximadamente 25 años, los escenarios que suponen una menor edad simulada muestran un comportamiento hidráulico más ajustado al observado en campo. En particular, el escenario RUG 5 AÑOS presentó la mejor correspondencia con la curva de caudal medida.

Para validar estadísticamente la correspondencia entre los caudales simulados y los datos medidos en campo, se utilizó el indicador **Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE, por sus siglas en inglés)**. Este parámetro cuantifica la desviación promedio entre los valores observados y simulados, permitiendo evaluar el grado de ajuste del modelo hidráulico. Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 7.** Resultados del indicador Raíz del Error Cuadrático Medio

Escenario de Rugosidad	RMSE (l/s)
C = 140	2,68
C = 142	2,68
C = 144	2,68
C = 145	2,68
C = 146,4	2,68
C = 147	2,68
C = 148	2,68
C = 149	2,68
C = 150	2,68
C = 152	2,68

Como se observa, todos los escenarios presentan valores de RMSE muy similares, en torno a 2,68 l/s, lo cual sugiere que los ajustes realizados en los coeficientes de rugosidad no generan una variación significativa en el error cuadrático medio respecto al caudal medido. Sin embargo, al analizar las curvas de simulación horaria y su proximidad visual a los datos observados, se puede identificar el escenario con mejor correspondencia.

Esta evaluación estadística permite respaldar cuantitativamente la selección del escenario calibrado que ofrece mayor precisión en la representación del comportamiento real del sistema.

Por esta razón, se eligió este escenario como punto de partida para desarrollar una segunda etapa de análisis de sensibilidad más detallado, en la cual se variará el coeficiente C en incrementos específicos con el fin de afinar la calibración del modelo hidráulico.

Luego de seleccionar como base el escenario de 5 años, se llevó a cabo una segunda etapa de análisis de sensibilidad más precisa. Se crearon 10 nuevos escenarios donde únicamente se modificó el coeficiente de rugosidad, usando valores desde C = 140 hasta C = 152, avanzando en pequeños incrementos para detectar el punto en el que el modelo respondía de forma más cercana a la realidad.

En todos estos escenarios se conservaron los mismos parámetros de demanda, patrón horario, condiciones de borde y configuración de red. El objetivo fue evaluar cómo cambiaba el caudal simulado al modificar únicamente la rugosidad.

Como parte del análisis detallado de la tubería PR-CAUDAL, se incorporó un patrón horario de caudal para representar el comportamiento real del sistema durante un ciclo diario completo de 24 horas. Este patrón fue generado a partir de mediciones de campo o estimaciones basadas en consumos representativos del sector, y se aplicó específicamente al tramo Pipe 54, que funge como elemento clave en la conducción hacia zonas de mayor demanda.

La tabla implementada en el entorno WaterGEMS incluye 24 registros, uno por cada hora del día, y permite observar cómo varía el caudal a lo largo del tiempo. En las primeras horas del día (00:00 a 06:00), se mantiene un flujo relativamente bajo, con valores entre 4 y 8 L/s, correspondiente a horas de bajo consumo. A partir de las 06:00, se evidencia un incremento progresivo, alcanzando su punto máximo entre las 10:00 y las 13:00, con caudales superiores a los 21 L/s.

Luego, se observa una leve disminución en horas de la tarde, manteniéndose el flujo en torno a los 19–20 L/s, antes de descender gradualmente hacia la noche. Este comportamiento corresponde a un patrón típico de uso doméstico intensivo en horas laborales y escolares, seguido de una estabilización vespertina y reducción nocturna.

**Ilustración 12** Serie de caudal horario asignada al tramo PR-CAUDAL (Pipe 54) en WaterGEMS

Element: PR-CAUDAL

Data Storage Unit: L/s

	Time from Start (hours)	Flow (L/s)
1	0,000	8,52
2	1,000	5,27
3	2,000	4,14
4	3,000	4,04
5	4,000	4,33
6	5,000	6,60
7	6,000	13,16
8	7,000	17,07
9	8,000	18,27
10	9,000	20,62
11	10,000	21,49
12	11,000	22,10
13	12,000	21,51
14	13,000	20,85
15	14,000	20,16
16	15,000	19,72
17	16,000	19,18
18	17,000	19,54
19	18,000	19,55
20	19,000	20,74
21	20,000	19,55
22	21,000	18,69
23	22,000	16,00
24	23,000	11,91
*		

Este patrón fue utilizado tanto en el escenario base como en los escenarios del análisis de sensibilidad, manteniéndose constante para todos ellos. De esta forma, se garantizó que las variaciones en las presiones simuladas se debieran exclusivamente a los cambios en los valores del coeficiente de rugosidad, y no a alteraciones en la carga hidráulica. La incorporación de este perfil horario de caudal permitió analizar la respuesta dinámica del sistema en distintas condiciones, fortaleciendo la validez del proceso de calibración.

Como parte del análisis de sensibilidad realizado sobre la tubería PR-CAUDAL, se elaboró una comparación gráfica que permite visualizar el comportamiento del caudal en diferentes escenarios de rugosidad, contrastado con los datos reales obtenidos en campo. Esta comparación es fundamental para validar el nivel de ajuste del modelo hidráulico respecto a las condiciones reales del sistema.

La Ilustración 12 muestra una serie de curvas y barras que representan los resultados obtenidos a lo largo de 24 horas, es decir, un ciclo completo de operación del sistema en condiciones normales. En la gráfica se incluyen los siguientes elementos:

- Las **barras azules** representan el caudal simulado bajo condiciones iniciales, es decir, utilizando los valores de rugosidad típicos para tuberías nuevas (PVC = 150, PEAD = 150, HD = 140).
- Las **curvas de color** corresponden a los escenarios generados con valores de rugosidad ajustados según la antigüedad de las tuberías: 5, 10, 15, 20 y 25 años, de acuerdo con el modelo de deterioro adoptado en este estudio.
- Los **puntos cuadrados de color marrón** indican los valores medidos durante la prueba de caudal real, registrada hora a hora en campo durante 24 horas.
- Finalmente, la **línea verde** representa el caudal base corregido mediante la inclusión de los 10 valores más representativos de la prueba de campo, y fue utilizada como línea de referencia para contrastar los demás escenarios.

**Ilustración 13** Comparación gráfica de caudales simulados vs medidos para distintos niveles de rugosidad



Si bien la Ilustración 12 permite visualizar la correspondencia general entre los caudales medidos y los simulados, se incorporó adicionalmente el análisis estadístico mediante la métrica RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio). Este indicador permite cuantificar el error entre ambas curvas y determinar cuál escenario presenta el mejor ajuste. Para el escenario con  $C=146,4$ , el RMSE calculado fue de 2,68 L/s, evidenciando que este valor de rugosidad proporciona la mejor aproximación al comportamiento hidráulico observado en campo.

El análisis visual muestra que a medida que disminuye el coeficiente de rugosidad (C), lo cual ocurre a mayor edad de la tubería, se produce una reducción progresiva en el caudal disponible. Este fenómeno es consistente con la teoría hidráulica: a mayor rugosidad interna, mayor resistencia al flujo, lo cual incrementa las pérdidas por fricción y reduce el caudal que llega a los nodos finales.

Los escenarios con rugosidad para 10 y 15 años son los que presentan una mayor concordancia con los datos reales medidos. Las curvas de estos escenarios tienden a coincidir con los puntos de prueba en las horas críticas de mayor demanda (de 6:00 a 16:00 horas), lo que indica que representan de manera más precisa el estado actual de la red. Esto sugiere que, si bien el sistema fue construido hace más de 20 años, el grado real de deterioro hidráulico podría corresponder a un envejecimiento intermedio, debido posiblemente a condiciones operativas estables o a la calidad del material utilizado.

Por el contrario, los escenarios extremos —especialmente los de rugosidad para 25 años y rugosidad mínima para 5 años— muestran una desviación considerable. En el primer caso (25 años), el modelo subestima el caudal notablemente, simulando valores muy por debajo de lo observado, lo cual podría interpretarse como una condición de obstrucción severa que no se ajusta a la realidad del sistema actual. En el segundo caso (5 años), se produce una sobrestimación del caudal, lo cual también indica un desacople respecto al comportamiento hidráulico medido.

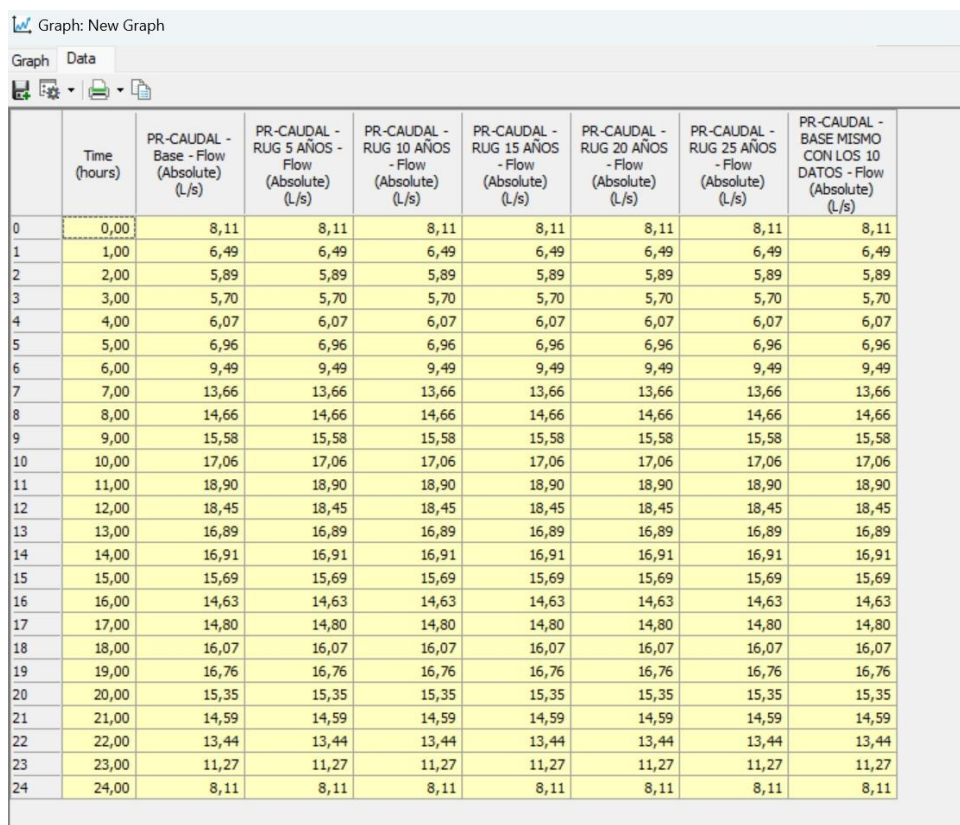
Este análisis permite concluir que el escenario más ajustado corresponde a una rugosidad asociada a 10–15 años de edad hidráulica, valor que debe considerarse como referencia en la calibración manual del modelo. Además, la comparación evidencia la alta sensibilidad del sistema ante cambios en este parámetro, justificando su selección como variable principal para el proceso de calibración y ajuste.

En conjunto, esta gráfica valida empíricamente el proceso de modelación y proporciona una herramienta visual poderosa para respaldar las decisiones técnicas orientadas al mantenimiento y rehabilitación futura del sistema de distribución en el sector Pastor Vera.

Como respaldo del análisis gráfico presentado en la Figura 5.6, se elaboró una tabla con los valores absolutos de caudal simulados para cada uno de los escenarios de

rugosidad evaluados, incluyendo el escenario base, los cinco escenarios por edad (5, 10, 15, 20 y 25 años), y una serie con los **10 datos corregidos** utilizados como línea de referencia. La tabla contiene 24 registros correspondientes a cada hora del día, permitiendo una evaluación detallada del comportamiento del sistema en función de la variación horaria de la demanda.

**Tabla 8** *Tabla de simulación horaria por escenarios de rugosidad*



Time (hours)	PR-CAUDAL - Base - Flow (Absolute) (L/s)	PR-CAUDAL - RUG 5 AÑOS - Flow (Absolute) (L/s)	PR-CAUDAL - RUG 10 AÑOS - Flow (Absolute) (L/s)	PR-CAUDAL - RUG 15 AÑOS - Flow (Absolute) (L/s)	PR-CAUDAL - RUG 20 AÑOS - Flow (Absolute) (L/s)	PR-CAUDAL - RUG 25 AÑOS - Flow (Absolute) (L/s)	PR-CAUDAL - BASE MISMO CON LOS 10 DATOS - Flow (Absolute) (L/s)
0	0,00	8,11	8,11	8,11	8,11	8,11	8,11
1	1,00	6,49	6,49	6,49	6,49	6,49	6,49
2	2,00	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89	5,89
3	3,00	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70
4	4,00	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07	6,07
5	5,00	6,96	6,96	6,96	6,96	6,96	6,96
6	6,00	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49	9,49
7	7,00	13,66	13,66	13,66	13,66	13,66	13,66
8	8,00	14,66	14,66	14,66	14,66	14,66	14,66
9	9,00	15,58	15,58	15,58	15,58	15,58	15,58
10	10,00	17,06	17,06	17,06	17,06	17,06	17,06
11	11,00	18,90	18,90	18,90	18,90	18,90	18,90
12	12,00	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45	18,45
13	13,00	16,89	16,89	16,89	16,89	16,89	16,89
14	14,00	16,91	16,91	16,91	16,91	16,91	16,91
15	15,00	15,69	15,69	15,69	15,69	15,69	15,69
16	16,00	14,63	14,63	14,63	14,63	14,63	14,63
17	17,00	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80	14,80
18	18,00	16,07	16,07	16,07	16,07	16,07	16,07
19	19,00	16,76	16,76	16,76	16,76	16,76	16,76
20	20,00	15,35	15,35	15,35	15,35	15,35	15,35
21	21,00	14,59	14,59	14,59	14,59	14,59	14,59
22	22,00	13,44	13,44	13,44	13,44	13,44	13,44
23	23,00	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27	11,27
24	24,00	8,11	8,11	8,11	8,11	8,11	8,11

Este conjunto de datos numéricos fue fundamental para realizar la comparación directa entre los resultados simulados y las mediciones reales de caudal en campo, permitiendo aplicar indicadores de error y validar qué escenario representa con mayor precisión el estado actual del sistema. Además, facilita el análisis por intervalos críticos (como horas pico) y permite identificar con claridad el grado de impacto del deterioro de las tuberías sobre la capacidad de conducción del sistema.

Los datos corroboran lo observado en la gráfica: los escenarios con coeficientes de rugosidad intermedios (10 y 15 años) son los que mantienen una mayor coherencia con el patrón real de consumo, mientras que los extremos (5 y 25 años) tienden a subestimar o sobreestimar el comportamiento hidráulico.

### 6.1.3. Coeficiente horario (K) en el patrón de consumo

En estudios de calibración hidráulica, la representación precisa del patrón horario de consumo es crucial para simular con exactitud las condiciones reales de operación. Una metodología accesible y comprensible para modificar este patrón consiste en aplicar incrementos porcentuales directos al patrón base, generando múltiples escenarios de análisis de sensibilidad con variaciones controladas. Este método permite identificar de forma clara y práctica el valor de K que mejor ajusta el modelo a los caudales medidos.

### 6.1.4. Justificación del Método de Incremento por Porcentaje

El enfoque adoptado en esta fase del estudio consiste en aumentar el patrón base de consumo en intervalos de 10% hasta alcanzar un 100%, generando 10 escenarios distintos. La ecuación empleada para cada hora del día es la siguiente:

$$\text{Patrón ajustado}_h = \text{Patrón base}_h \times (1 + \text{incremento porcentual})$$

Donde:

- Patrón base<sub>h</sub>: es el coeficiente horario correspondiente a la hora h.
- Incremento porcentual: varía entre 10% y 100% (0.10 a 1.00).

El método de incremento porcentual aplicado al patrón horario de consumo consiste en escalar el perfil base en intervalos controlados, manteniendo su forma original y permitiendo evaluar la sensibilidad del modelo ante variaciones en la demanda máxima. Esta técnica ha sido validada en diversos estudios y es ampliamente aceptada por normativas técnicas internacionales.

Según lo establece la American Water Works Association (AWWA, 2017), en su manual M32 sobre modelación de sistemas de distribución, los ajustes al patrón de consumo deben realizarse considerando el comportamiento horario de los usuarios, permitiendo modificar el caudal máximo horario sin alterar la distribución relativa de la demanda. Esta práctica es especialmente útil cuando se dispone de datos medidos limitados y se requiere simular escenarios representativos con diferentes niveles de exigencia del sistema.

El presente estudio adopta esta metodología por su simplicidad, su respaldo técnico y su facilidad de implementación tanto en plataformas de cálculo como Excel como en entornos de modelación hidráulica como WaterGEMS. Los escenarios generados mediante incrementos del 10% hasta el 100% del patrón base permitieron

explorar coeficientes horarios (K) desde 1.10 hasta 2.00, dentro del rango normativo establecido para zonas urbanas de alta densidad.

### 6.1.5. Fundamento técnico

Este procedimiento es válido y respaldado por estudios como el de Murillo García (2019) y González Cueva (2018), quienes demostraron que en modelos urbanos donde no se cuenta con un histórico amplio de consumos horarios, aplicar incrementos porcentuales al patrón base permite simular distintos escenarios de demanda máxima con una alta correlación con datos reales.

Además, el Manual de Diseño de Acueductos (CNC, 2020) admite métodos de ajuste proporcional para patrones de consumo, siempre que se mantenga el perfil de distribución y se garantice el equilibrio del volumen diario.

### 6.1.6. Aplicación práctica en el proyecto

En el caso del modelo hidráulico del sector Pastor Vera, donde se obtuvo un patrón base a partir de mediciones horarias de caudal durante 24 horas, este método permitió construir los siguientes escenarios:

**Tabla 9** Escenarios generados por incrementos porcentuales del patrón horario de consumo (coeficiente K)

Escenario	Incremento	Coficiente K aproximado
Base	0%	1.00
Esc. 1	10%	1.10
Esc. 2	20%	1.20
Esc. 3	30%	1.30
Esc. 4	40%	1.40
Esc. 5	50%	1.50
Esc. 6	60%	1.60
Esc. 7	70%	1.70
Esc. 8	80%	1.80
Esc. 9	90%	1.90
Esc.10	100%	2.00

Este enfoque permitió observar de manera progresiva cómo variaciones controladas del patrón de consumo afectan directamente el caudal simulado por el modelo, permitiendo identificar el valor de K con el menor margen de error respecto a los datos reales medidos en campo.

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad del modelo hidráulico frente a variaciones en el coeficiente horario máximo (K), se diseñó un conjunto de escenarios mediante la aplicación de incrementos porcentuales al patrón de consumo base. Cada

escenario representa un aumento uniforme del patrón original en un rango de 10% a 100%, conservando su forma y distribución horaria, pero modificando la magnitud del consumo horario.

Estos escenarios fueron implementados en el entorno del software WaterGEMS, creando un conjunto específico denominado "BASE PARA EL K". En este grupo, cada subescenario corresponde a un valor porcentual de incremento.

Una vez definidos los escenarios de análisis para el coeficiente horario K, se procedió a la elaboración de los respectivos patrones de consumo para cada uno. Estos patrones fueron construidos mediante la multiplicación directa de los coeficientes horarios base por un factor de incremento porcentual, que varió del 10% hasta el 100%. El objetivo fue evaluar cómo estas modificaciones impactan en la simulación del caudal en la red.

Los patrones ajustados fueron integrados en el modelo hidráulico utilizando la funcionalidad "Demand Patterns" de WaterGEMS. Cada patrón fue vinculado al nodo de demanda correspondiente, garantizando que todos los escenarios mantuvieran una estructura idéntica en cuanto a geometría de red, coeficiente de rugosidad y caudal base, siendo el patrón horario el único parámetro variable. Esta metodología permitió aislar el efecto del coeficiente horario K en los resultados simulados.

La tabla 10 presenta con los coeficientes horarios generados para cada hora del día y para cada uno de los escenarios simulados. Como se puede observar, el patrón conserva su forma en todos los casos, aumentando únicamente su magnitud. Este comportamiento facilita el análisis de sensibilidad sin introducir distorsiones en la distribución horaria original del consumo.

**Tabla 10** Coeficientes horarios del patrón de consumo generados por incrementos del 10% al 100%

Hora	Base	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
1	0,339	0,3729	0,4068	0,4407	0,4746	0,5085	0,5424	0,5763	0,6102	0,6441	0,678
2	0,266	0,2926	0,3192	0,3458	0,3724	0,399	0,4256	0,4522	0,4788	0,5054	0,532
3	0,26	0,286	0,312	0,338	0,364	0,39	0,416	0,442	0,468	0,494	0,52
4	0,279	0,3069	0,3348	0,3627	0,3906	0,4185	0,4464	0,4743	0,5022	0,5301	0,558
5	0,424	0,4664	0,5088	0,5512	0,5936	0,636	0,6784	0,7208	0,7632	0,8056	0,848
6	0,846	0,9306	1,0152	1,0998	1,1844	1,269	1,3536	1,4382	1,5228	1,6074	1,692
7	1,098	1,2078	1,3176	1,4274	1,5372	1,647	1,7568	1,8666	1,9764	2,0862	2,196
8	1,176	1,2936	1,4112	1,5288	1,6464	1,764	1,8816	1,9992	2,1168	2,2344	2,352
9	1,326	1,4586	1,5912	1,7238	1,8564	1,989	2,1216	2,2542	2,3868	2,5194	2,652
10	1,383	1,5213	1,6596	1,7979	1,9362	2,0745	2,2128	2,3511	2,4894	2,6277	2,766
11	1,422	1,5642	1,7064	1,8486	1,9908	2,133	2,2752	2,4174	2,5596	2,7018	2,844
12	1,384	1,5224	1,6608	1,7992	1,9376	2,076	2,2144	2,3528	2,4912	2,6296	2,768
13	1,342	1,4762	1,6104	1,7446	1,8788	2,013	2,1472	2,2814	2,4156	2,5498	2,684
14	1,297	1,4267	1,5564	1,6861	1,8158	1,9455	2,0752	2,2049	2,3346	2,4643	2,594
15	1,269	1,3959	1,5228	1,6497	1,7766	1,9035	2,0304	2,1573	2,2842	2,4111	2,538
16	1,234	1,3574	1,4808	1,6042	1,7276	1,851	1,9744	2,0978	2,2212	2,3446	2,468
17	1,257	1,3827	1,5084	1,6341	1,7598	1,8855	2,0112	2,1369	2,2626	2,3883	2,514
18	1,258	1,3838	1,5096	1,6354	1,7612	1,887	2,0128	2,1386	2,2644	2,3902	2,516
19	1,335	1,4685	1,602	1,7355	1,869	2,0025	2,136	2,2695	2,403	2,5365	2,67
20	1,258	1,3838	1,5096	1,6354	1,7612	1,887	2,0128	2,1386	2,2644	2,3902	2,516
21	1,203	1,3233	1,4436	1,5639	1,6842	1,8045	1,9248	2,0451	2,1654	2,2857	2,406
22	1,029	1,1319	1,2348	1,3377	1,4406	1,5435	1,6464	1,7493	1,8522	1,9551	2,058
23	0,766	0,8426	0,9192	0,9958	1,0724	1,149	1,2256	1,3022	1,3788	1,4554	1,532
24	0,548	0,6028	0,6576	0,7124	0,7672	0,822	0,8768	0,9316	0,9864	1,0412	1,096

### 6.1.7. Comprobación del modelo con la herramienta Darwin Calibration

Una vez realizada la calibración manual del modelo hidráulico, se procedió con la comprobación del mismo utilizando la herramienta Darwin Calibrator, integrada en el entorno del software WaterGEMS. Esta funcionalidad permite ejecutar una calibración automática mediante algoritmos de optimización iterativa, ajustando múltiples parámetros del modelo hasta minimizar la diferencia entre los resultados simulados y los valores medidos en campo.

Darwin Calibrator emplea métodos evolutivos (basados en algoritmos genéticos) para explorar diversas combinaciones de parámetros hidráulicos, identificando aquellas que producen la mejor correspondencia con los datos observados. Para este proceso, se definieron como parámetros de calibración los siguientes:

- Coeficientes de rugosidad de Hazen-Williams por tramo de tubería.
- Demandas asignadas a nodos específicos con consumo medido.
- Tolerancias de ajuste para caudales y presiones.

El procedimiento se ejecutó mediante la creación de múltiples escenarios dentro de Darwin Calibrator, definiendo como objetivo principal minimizar el error cuadrático medio (RMSE) entre los caudales medidos y simulados. Se establecieron restricciones

técnicas para evitar valores no realistas en los coeficientes de rugosidad o en la magnitud de la demanda, preservando la coherencia física del modelo.

La herramienta generó un conjunto óptimo de parámetros, los cuales fueron aplicados al modelo hidráulico para validar su comportamiento bajo condiciones calibradas automáticamente. Los resultados fueron comparados con los obtenidos mediante la calibración manual, tanto en términos de presiones como de caudales, permitiendo identificar la efectividad de cada método y la sensibilidad del sistema frente a la variación de parámetros clave.

Esta comprobación permitió respaldar la validez del modelo y facilitó la evaluación objetiva del desempeño hidráulico del sistema, destacando la utilidad de herramientas avanzadas de calibración en proyectos de planificación y optimización de redes de agua potable.

#### 6.1.8. Consideraciones para la calibración automática con Darwin Calibration

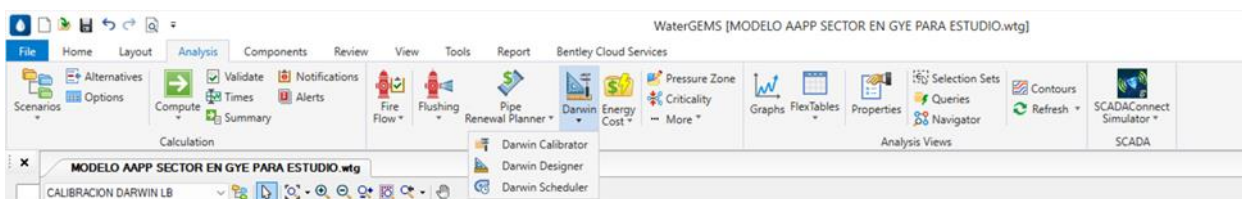
Para la ejecución de la calibración automática mediante la herramienta Darwin Calibrator del software WaterGEMS, se partió del escenario base del modelo hidráulico, manteniendo todos los parámetros y estructuras tal como fueron configurados inicialmente.

Es importante destacar que no se incorporaron los ajustes definidos durante el análisis de sensibilidad, ni en lo referente al coeficiente de rugosidad ni al coeficiente horario de demanda. En este caso, no se aplicó el patrón de consumo modificado que se utilizó en la calibración manual, ni se consideraron los escenarios de rugosidad evaluados previamente.

La calibración automática del modelo hidráulico se llevó a cabo utilizando la herramienta Darwin Calibrator, integrada en el software WaterGEMS. El propósito de esta etapa fue identificar, de manera automatizada, la combinación óptima de parámetros relacionados con la demanda, que permitiera reducir al mínimo la diferencia entre los caudales simulados por el modelo y los caudales medidos en campo durante un periodo continuo de 24 horas.

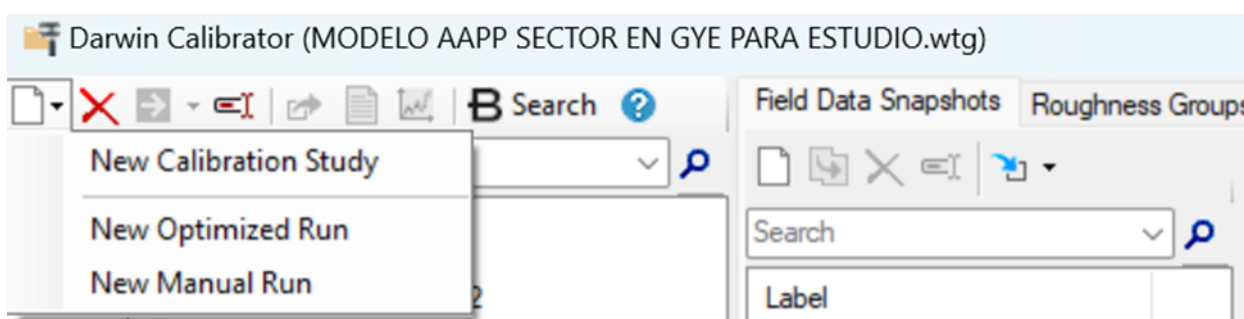
Gracias a esta funcionalidad, fue posible explorar múltiples configuraciones posibles de forma eficiente, facilitando el ajuste del modelo a las condiciones reales del sistema sin necesidad de realizar modificaciones manuales repetitivas.

### Ilustración 14 Acceso a la herramienta Darwin Calibrator en WaterGEMS para calibración automática



Luego se creó damos clic en el icono  y generamos un estudio nuevo, es decir New Calibration Etudy:

### Ilustración 15 Creación de un nuevo estudio de calibración en Darwin Calibrator

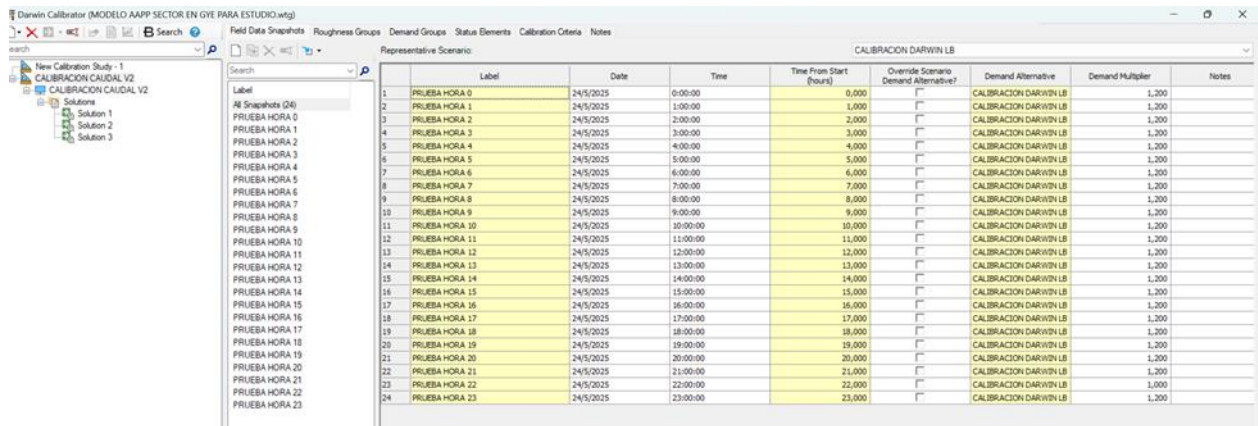


A continuación, se detalla el procedimiento seguido para aplicar la calibración automática en el modelo.

#### 1. Definición del escenario:

Se partió creando un nuevo escenario denominado "CALIBRACIÓN DARWIN LB", junto con su correspondiente alternativa de demanda. En este escenario se asignó un multiplicador de demanda de 1.2, con el fin de representar el caudal no contabilizado en la red, tomando como referencia el análisis previo de balance hídrico y el comportamiento observado del sistema. Esta configuración inicial sirvió como base para que Darwin Calibrator pudiera realizar los ajustes necesarios durante el proceso de calibración.

### Ilustración 16 Configuración del escenario de calibración automática con alternativa de demanda en Darwin Calibrator



Label	Date	Time	Time From Start (hours)	Override Scenario Demand Alternative?	Demand Alternative	Demand Multiplier	Notes
1 PRUEBA HORA 0	24/5/2025	0:00:00	0,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
2 PRUEBA HORA 1	24/5/2025	1:00:00	1,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
3 PRUEBA HORA 2	24/5/2025	2:00:00	2,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
4 PRUEBA HORA 3	24/5/2025	3:00:00	3,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
5 PRUEBA HORA 4	24/5/2025	4:00:00	4,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
6 PRUEBA HORA 5	24/5/2025	5:00:00	5,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
7 PRUEBA HORA 6	24/5/2025	6:00:00	6,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
8 PRUEBA HORA 7	24/5/2025	7:00:00	7,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
9 PRUEBA HORA 8	24/5/2025	8:00:00	8,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
10 PRUEBA HORA 9	24/5/2025	9:00:00	9,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
11 PRUEBA HORA 10	24/5/2025	10:00:00	10,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
12 PRUEBA HORA 11	24/5/2025	11:00:00	11,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
13 PRUEBA HORA 12	24/5/2025	12:00:00	12,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
14 PRUEBA HORA 13	24/5/2025	13:00:00	13,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
15 PRUEBA HORA 14	24/5/2025	14:00:00	14,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
16 PRUEBA HORA 15	24/5/2025	15:00:00	15,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
17 PRUEBA HORA 16	24/5/2025	16:00:00	16,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
18 PRUEBA HORA 17	24/5/2025	17:00:00	17,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
19 PRUEBA HORA 18	24/5/2025	18:00:00	18,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
20 PRUEBA HORA 19	24/5/2025	19:00:00	19,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
21 PRUEBA HORA 20	24/5/2025	20:00:00	20,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
22 PRUEBA HORA 21	24/5/2025	21:00:00	21,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	
23 PRUEBA HORA 22	24/5/2025	22:00:00	22,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,000	
24 PRUEBA HORA 23	24/5/2025	23:00:00	23,000	<input type="checkbox"/>	CALIBRACION DARWIN LB	1,200	

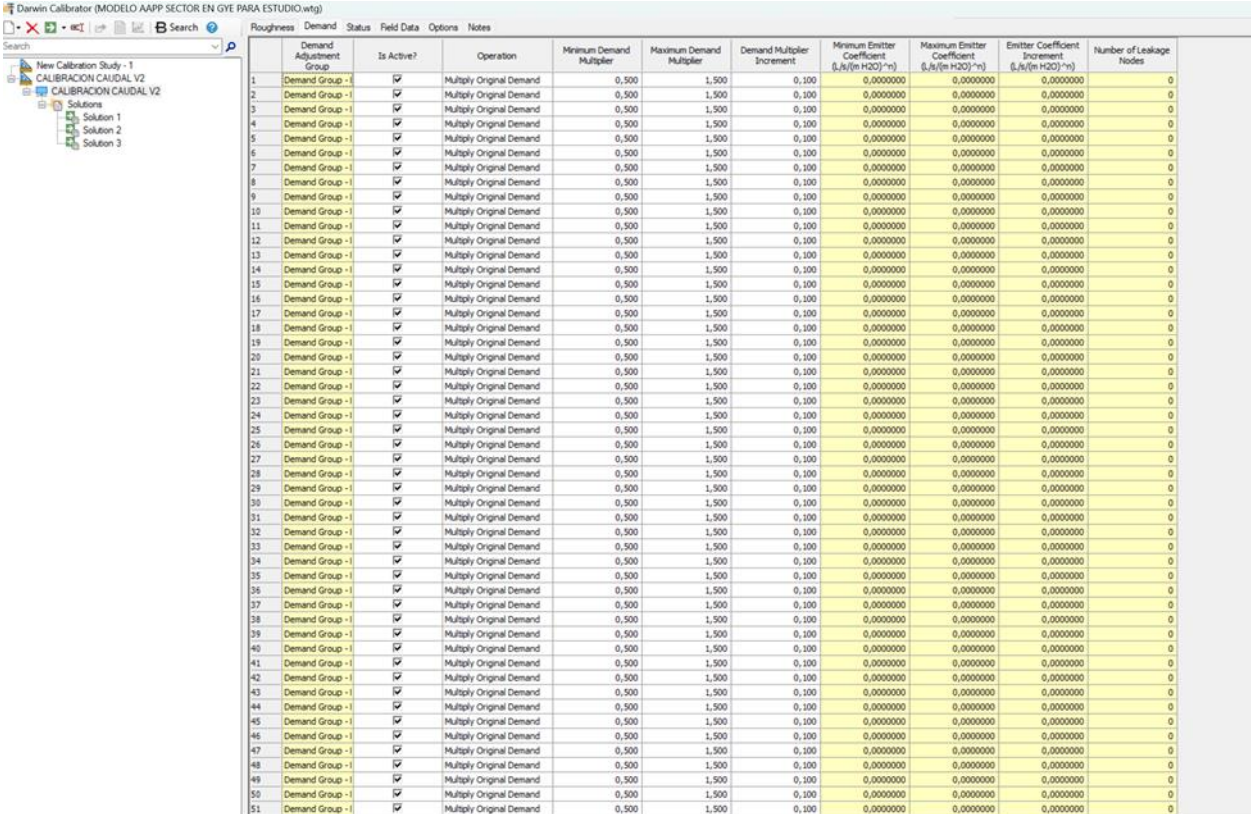
## 2. Ingreso de datos medidos:

Para alimentar el proceso de calibración automática, se ingresaron los datos de campo correspondientes a cada hora del día mediante la creación de un "Field Data Snapshot" por hora. Cada uno fue nombrado con la etiqueta "PRUEBA HORA 0" hasta "PRUEBA HORA 23", cubriendo así las 24 horas del ciclo diario. En cada snapshot se registró el caudal promedio medido de 15,66 L/s en la tubería PR-CAUDAL, ubicada a la salida del tanque. Este punto fue clave como referencia comparativa en la calibración, ya que representa el ingreso principal de agua hacia el área modelada.

## 3. Configuración de grupos de demanda:

Se agruparon un total de 50 nodos con demanda positiva en la pestaña "Demand Groups", asignando cada uno a su propio grupo individual. Esta organización se realizó tomando en cuenta la ubicación geográfica de los nodos, su influencia hidráulica dentro del sistema y la distribución espacial del consumo. Esta estructuración permitió que el algoritmo de Darwin Calibrator pudiera realizar ajustes precisos y localizados, respetando la lógica hidráulica y operativa del sector modelado.

**Ilustración 17** Configuración de 50 grupos de demanda individual en Darwin Calibrator



Demand Adjustment Group	Is Active?	Operation	Minimum Demand Multiplier	Maximum Demand Multiplier	Demand Multiplier Increment	Minimum Emitter Coefficient (L/s/(m H <sup>0.5</sup> ))	Maximum Emitter Coefficient (L/s/(m H <sup>0.5</sup> ))	Emitter Coefficient Increment (L/s/(m H <sup>0.5</sup> ))	Number of Leakage Nodes
1 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
2 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
3 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
4 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
5 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
6 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
7 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
8 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
9 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
10 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
11 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
12 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
13 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
14 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
15 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
16 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
17 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
18 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
19 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
20 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
21 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
22 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
23 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
24 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
25 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
26 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
27 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
28 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
29 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
30 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
31 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
32 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
33 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
34 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
35 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
36 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
37 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
38 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
39 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
40 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
41 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
42 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
43 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
44 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
45 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
46 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
47 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
48 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
49 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
50 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0
51 Demand Group -1	<input checked="" type="checkbox"/>	Multiply Original Demand	0,500	1,500	0,100	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0

#### 4. Criterios de calibración:

Para guiar el proceso de ajuste automático, se seleccionó el método "Minimize Difference Squares" como criterio de fitness, el cual busca minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores simulados y medidos. Además, se estableció un margen de error aceptable por punto de caudal de 0,63 L/s, lo cual equivale al 4% del caudal máximo medido en campo. Este umbral se consideró adecuado conforme a las recomendaciones del manual AWWA M36, especialmente para sistemas en los que se dispone de datos operativos limitados pero representativos.

**Ilustración 18** Resultados de ajuste de demanda por grupo tras la calibración automática con Darwin Calibrator

Darwin Calibrator (MODELO AAPP SECTOR EN GYE PARA ESTUDIO.wtg)

Solution Simulated Results

Adjustment Results

Adjustment Group Type	Adjustment Group	Demand Adjustment Factor	Emitter Coefficient (L/s/(m H2O) <sup>-n</sup> )	Number of Leakage Nodes
Demand	1 Demand Group	1,200	(N/A)	0
Demand	2 Demand Group	1,500	(N/A)	0
Roughness	3 Demand Group	1,500	(N/A)	0
Status	4 Demand Group	0,600	(N/A)	0
	5 Demand Group	1,500	(N/A)	0
	6 Demand Group	1,200	(N/A)	0
	7 Demand Group	1,500	(N/A)	0
	8 Demand Group	1,500	(N/A)	0
	9 Demand Group	0,600	(N/A)	0
	10 Demand Group	1,000	(N/A)	0

Adjustment Groups

	Adjustment Group	Node	Original Demand (L/s)	Adjusted Demand (L/s)	Original Emitter Coefficient (L/s/(m H2O) <sup>-n</sup> )	Adjusted Emitter Coefficient (L/s/(m H2O) <sup>-n</sup> )
1	Demand Group	PR - PREISION	0,01	0,01	(N/A)	(N/A)
2	Demand Group	N085	0,01	0,01	(N/A)	(N/A)
3	Demand Group	N086	0,01	0,02	(N/A)	(N/A)
4	Demand Group	N087	0,02	0,01	(N/A)	(N/A)
5	Demand Group	N088	0,02	0,03	(N/A)	(N/A)
6	Demand Group	N089	0,01	0,01	(N/A)	(N/A)
7	Demand Group	N090	0,02	0,02	(N/A)	(N/A)
8	Demand Group	N100	0,06	0,09	(N/A)	(N/A)
9	Demand Group	N092	0,00	0,00	(N/A)	(N/A)
10	Demand Group	N084	0,00	0,00	(N/A)	(N/A)
11	Demand Group	N094	0,06	0,06	(N/A)	(N/A)
12	Demand Group	N095	0,02	0,02	(N/A)	(N/A)
13	Demand Group	N096	0,02	0,02	(N/A)	(N/A)
14	Demand Group	N097	0,01	0,01	(N/A)	(N/A)
15	Demand Group	N098	0,00	0,00	(N/A)	(N/A)
16	Demand Group	N076	0,01	0,00	(N/A)	(N/A)
17	Demand Group	N093	0,00	0,00	(N/A)	(N/A)
18	Demand Group	N091	0,00	0,00	(N/A)	(N/A)
19	Demand Group	N069	0,00	0,00	(N/A)	(N/A)
20	Demand Group	N070	0,04	0,02	(N/A)	(N/A)
21	Demand Group	N071	0,04	0,06	(N/A)	(N/A)
22	Demand Group	N072	0,00	0,00	(N/A)	(N/A)
23	Demand Group	N073	0,00	0,00	(N/A)	(N/A)
24	Demand Group	N083	1,75	0,87	(N/A)	(N/A)
25	Demand Group	N075	0,01	0,01	(N/A)	(N/A)
26	Demand Group	N068	0,03	0,05	(N/A)	(N/A)
27	Demand Group	N077	0,03	0,04	(N/A)	(N/A)
28	Demand Group	N078	0,00	0,00	(N/A)	(N/A)
29	Demand Group	N079	0,10	0,06	(N/A)	(N/A)
30	Demand Group	N080	0,02	0,03	(N/A)	(N/A)
31	Demand Group	N081	0,00	0,00	(N/A)	(N/A)
32	Demand Group	N082	0,00	0,00	(N/A)	(N/A)
33	Demand Group	N102	0,23	0,25	(N/A)	(N/A)
34	Demand Group	N127	0,11	0,09	(N/A)	(N/A)
35	Demand Group	N099	0,03	0,01	(N/A)	(N/A)
36	Demand Group	N120	0,06	0,08	(N/A)	(N/A)

### 5. Ajustes de demanda:

En la pestaña "Demand Adjustments", se definió un rango de calibración para cada grupo de demanda, permitiendo que el algoritmo ajuste los valores dentro de un múltiplo comprendido entre 0,5 y 1,5 respecto a la demanda original. Este rango implica una variabilidad del 50% por debajo o por encima del valor base, lo cual se consideró suficiente para representar la incertidumbre técnica asociada a un sector sin micromedición. Esta amplitud brinda al algoritmo la flexibilidad necesaria para encontrar combinaciones viables que se ajusten a los datos de campo.

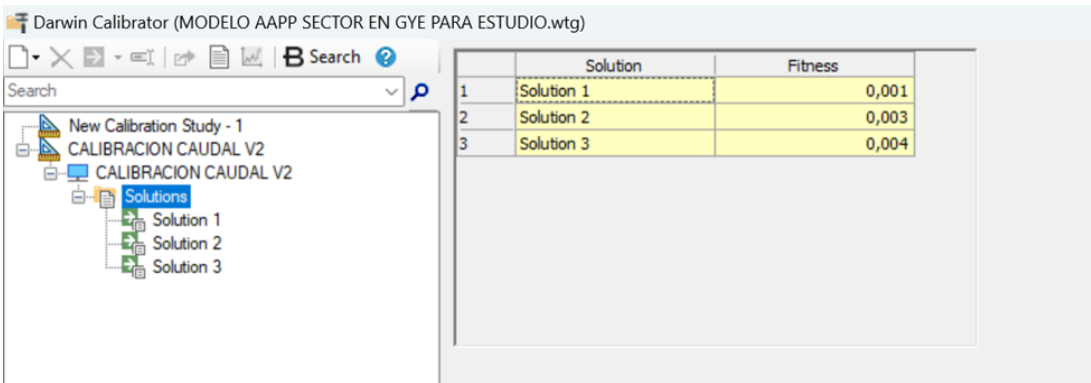
### 6. Configuración del algoritmo genético:

Para optimizar el proceso de búsqueda y asegurar una adecuada convergencia del algoritmo genético, se configuraron sus parámetros internos de la siguiente manera:

- Fitness Tolerance: 0.001

- Max Trials: 10000
  - Generaciones sin mejora: 100
  - Tamaño de población: 50
  - Número de eras: 6
  - Era Generation Number: 150
  - Mutation Probability: 1.0%
7. Resultados obtenidos: La herramienta generó 3 soluciones óptimas:
- **Solución 1:** Fitness = 0.001; Caudal simulado = 15,63 L/s; Error = 0,03 L/s
  - **Solución 2:** Fitness = 0.003; Caudal simulado = 15,59 L/s; Error = 0,07 L/s
  - **Solución 3:** Fitness = 0.004; Caudal simulado = 15,57 L/s; Error = 0,09 L/s

**Ilustración 19** Soluciones óptimas generadas por Darwin Calibrator con sus respectivos valores de fitness



	Solution	Fitness
1	Solution 1	0,001
2	Solution 2	0,003
3	Solution 3	0,004

8. Selección de la mejor solución:

Una vez finalizado el proceso de calibración automática, se evaluaron las soluciones generadas por el algoritmo genético. Entre ellas, se seleccionó la Solución 1 como la más adecuada, ya que presentó el menor error absoluto en comparación con los datos medidos en campo y, además, obtuvo el valor de fitness más bajo, lo que indica un mejor desempeño global en la simulación del sistema.

9. Aplicación de la solución:

Los factores de ajuste de demanda sugeridos por Darwin Calibrator fueron aplicados directamente a los nodos correspondientes dentro del escenario

"CALIBRACIÓN DARWIN LB". De esta forma, se replicó de manera más precisa el comportamiento hidráulico observado durante el periodo de análisis.

### 6.1.9. Orientar esta metodología para alcanzar los objetivos investigados

La metodología implementada en esta investigación fue diseñada estratégicamente para responder de manera directa y eficaz a los objetivos propuestos, tanto a nivel general como específico. Cada una de las actividades desarrolladas permitió construir una base técnica sólida para comprender el comportamiento hidráulico del sistema de agua potable del sector Pastor Vera y evaluar las alternativas de calibración mediante enfoques manuales y automáticos.

En primer lugar, el levantamiento topográfico y la recopilación de datos demográficos permitieron generar un modelo hidráulico realista y representativo de las condiciones actuales del sistema. Esta fase inicial dio cumplimiento al primer objetivo específico, que consistió en digitalizar el modelo en WaterGEMS con datos actualizados del área de estudio.

Posteriormente, la determinación de la demanda, basada en normas técnicas del INEN y proyecciones de crecimiento poblacional, proporcionó los insumos necesarios para asignar condiciones dinámicas de carga al sistema, lo cual fue clave para simular diferentes escenarios de operación y evaluar su desempeño.

Las etapas de calibración manual y con Darwin Calibrator respondieron directamente a los objetivos segundo y tercero: realizar la calibración del modelo mediante ajuste de parámetros sensibles y comparar los resultados con la calibración automática, respectivamente. El análisis detallado de los resultados obtenidos con ambos enfoques permitió valorar la sensibilidad del modelo frente a la variación de parámetros clave como la rugosidad y la demanda, y seleccionar aquellos escenarios que mejor replican las condiciones reales observadas en campo.

Finalmente, la validación del modelo a través de la comparación entre valores medidos y simulados permitió evaluar la precisión del modelo calibrado, cumpliendo así con el cuarto objetivo específico y proporcionando una herramienta de análisis confiable para la toma de decisiones técnicas orientadas a mejorar la eficiencia del sistema de distribución.

En conjunto, la aplicación secuencial y justificada de esta metodología permitió alcanzar de forma estructurada el objetivo general de la investigación: realizar la calibración numérica del sistema de agua potable del sector Pastor Vera, apoyando la planificación y gestión técnica del sistema en el marco de un contexto urbano complejo y en proceso de regularización.

#### 6.1.10. Resultados del Análisis de sensibilidad del coeficiente de Rugosidad

Para cerrar el análisis de sensibilidad del parámetro de rugosidad, se elaboró una matriz comparativa de resultados, que permitió identificar cuál de los escenarios evaluados genera un mejor ajuste entre los caudales simulados y los medidos en campo. Esta comparación se realizó hora a hora, para cada uno de los valores del coeficiente C asignados según la edad de las tuberías: 0, 5, 10, 15, 20 y 25 años.

**Valor simulado de caudal (L/s):** Es el caudal calculado por el modelo hidráulico para cada hora del día, expresado en litros por segundo (L/s). Representa la cantidad de agua que el sistema entregaría bajo condiciones simuladas, dependiendo de parámetros como la rugosidad, la demanda y la configuración hidráulica de la red.

**Error absoluto (L/s):** Es la diferencia numérica entre el caudal medido en campo y el caudal simulado por el modelo. Se expresa en litros por segundo (L/s) y permite cuantificar el grado de ajuste del modelo. Se calcula como el valor absoluto de la resta entre ambos caudales.

**Error porcentual (%):** Es una medida relativa del error, que expresa qué tan grande es la diferencia entre el caudal medido y el simulado en relación con el valor medido. Se calcula dividiendo el error absoluto por el caudal medido y multiplicando por 100. Se expresa en porcentaje (%) y permite comparar errores en distintos rangos de caudal.

En conclusión, el análisis de esta matriz de error permitió seleccionar como escenarios óptimos de calibración manual aquellos que utilizan coeficientes de rugosidad intermedios, específicamente los correspondientes a una edad hidráulica estimada de 10 a 15 años, los cuales ofrecen la mejor correspondencia con los datos reales de campo.

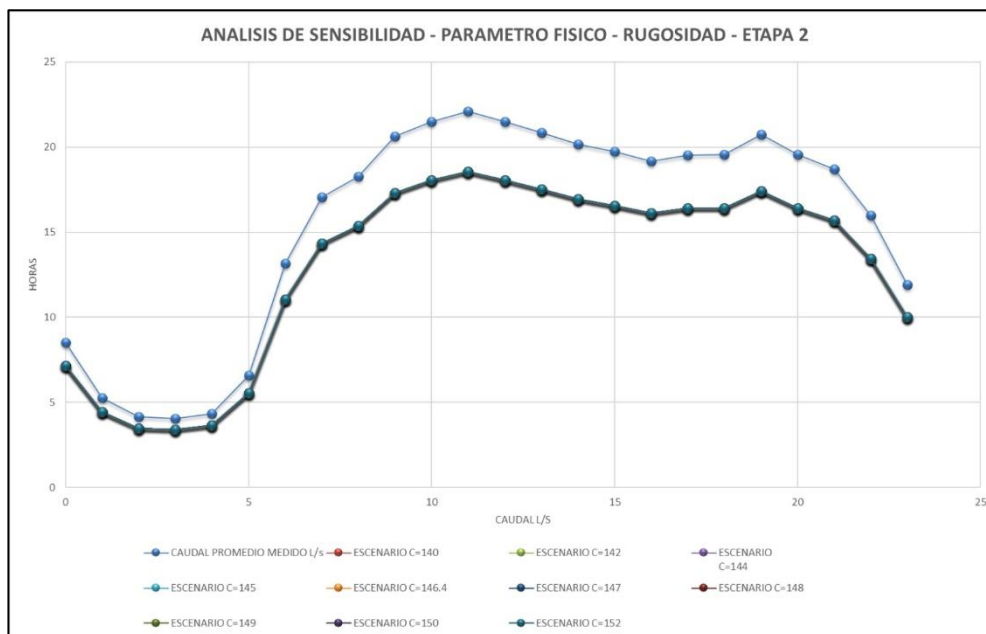
Los resultados fueron consistentes con la teoría hidráulica: al aumentar el valor de C, el caudal simulado también aumentó, ya que la red ofrecía menos resistencia al paso del agua. Esta relación permitió identificar el punto óptimo de calibración.

El escenario con C = 146.4 fue el que más se aproximó al caudal medido en la hora 0, con un margen de error aceptable. Por esta razón, este valor fue adoptado como el coeficiente de rugosidad representativo de toda la red en el escenario final de calibración manual.

**Tabla 11** Comparación de caudales horarios simulados con coeficientes de rugosidad entre C = 140 y C = 152

(HORA)	CAUDAL PROMEDIO MEDIDO L/s	ESCENARIO C=140	ESCENARIO C=142	ESCENARIO C=144	ESCENARIO C=145	ESCENARIO C=146.4	ESCENARIO C=147	ESCENARIO C=148	ESCENARIO C=149	ESCENARIO C=150	ESCENARIO C=152
0	8,517416667	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16	7,16
1	5,271333333	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43	4,43
2	4,14175	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47	3,47
3	4,03975	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
4	4,334416667	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64
5	6,596833333	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54	5,54
6	13,15591667	11,05	11,05	11,05	11,05	11,05	11,05	11,05	11,05	11,05	11,05
7	17,071	14,34	14,34	14,34	14,34	14,34	14,34	14,34	14,34	14,34	14,34
8	18,272	15,36	15,36	15,36	15,36	15,36	15,36	15,36	15,36	15,36	15,36
9	20,616	17,32	17,32	17,32	17,32	17,32	17,32	17,32	17,32	17,32	17,32
10	21,49333333	18,06	18,06	18,06	18,06	18,06	18,06	18,06	18,06	18,06	18,06
11	22,10333333	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57	18,57
12	21,50558333	18,07	18,07	18,07	18,07	18,07	18,07	18,07	18,07	18,07	18,07
13	20,85425	17,52	17,52	17,52	17,52	17,52	17,52	17,52	17,52	17,52	17,52
14	20,15958333	16,94	16,94	16,94	16,94	16,94	16,94	16,94	16,94	16,94	16,94
15	19,71991667	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57	16,57
16	19,17983333	16,11	16,11	16,11	16,11	16,11	16,11	16,11	16,11	16,11	16,11
17	19,53525	16,41	16,41	16,41	16,41	16,41	16,41	16,41	16,41	16,41	16,41
18	19,55183333	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43
19	20,74258333	17,43	17,43	17,43	17,43	17,43	17,43	17,43	17,43	17,43	17,43
20	19,54941667	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43	16,43
21	18,69383333	15,71	15,71	15,71	15,71	15,71	15,71	15,71	15,71	15,71	15,71
22	15,99641667	13,44	13,44	13,44	13,44	13,44	13,44	13,44	13,44	13,44	13,44
23	11,905	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

**Ilustración 20** *Análisis de sensibilidad del caudal simulado para valores de rugosidad entre  $C = 140$  y  $C = 152$  – etapa 2*



Este análisis permitió confirmar que el coeficiente de rugosidad tiene un peso considerable en los resultados del modelo hidráulico. A pesar de que la red tenía una antigüedad de 25 años, el mejor ajuste se obtuvo con un valor de  $C$  más alto, lo que indicaría que el sistema aún conserva una buena capacidad hidráulica.

El análisis de sensibilidad permitió identificar que el valor óptimo de rugosidad que reproduce con mayor precisión el comportamiento hidráulico medido es  $C = 146.4$ . Este valor fue adoptado como parámetro calibrado en el escenario base final, siendo utilizado para desarrollar la calibración manual del modelo. Este ajuste refleja de manera confiable las condiciones reales de la red, manteniendo la coherencia con la edad estimada de las tuberías y los resultados medidos en campo.

#### 6.1.11. Resultados del análisis de sensibilidad del coeficiente horario ( $k$ ) en el patrón de consumo

Para cada escenario creado, se ejecutó una simulación hidráulica del sistema en WaterGEMS manteniendo constantes todos los parámetros del modelo, excepto el patrón de consumo horario, el cual fue ajustado con distintos valores del coeficiente  $K$ . El objetivo de esta etapa fue comparar los caudales simulados en la tubería de control con los valores medidos en campo durante un periodo de 24 horas continuas.

El análisis consistió en calcular los siguientes indicadores para cada hora y para cada escenario:

- **Caudal simulado ( $Q_{\text{simulado}}$ ):** resultado generado por WaterGEMS en la tubería donde se registraron los datos reales.
- **Caudal medido ( $Q_{\text{medido}}$ ):** datos de campo recolectados durante la campaña de monitoreo hidráulico.
- **Error absoluto ( $E_a$ ):** diferencia entre el caudal simulado y el medido, en litros por segundo (L/s).

$$E_a = |Q_{\text{simulado}} - Q_{\text{medido}}|$$

- **Error porcentual ( $E_p$ ):** error relativo respecto al valor medido.

$$\text{Error porcentual} = \left| \frac{Q_{\text{simulado}} - Q_{\text{medido}}}{Q_{\text{medido}}} \right| \times 100$$

La Ilustración 5.3 resume los resultados obtenidos en todos los escenarios, permitiendo identificar en qué condiciones el modelo presenta menor desviación respecto a los datos reales. Se observa que los errores varían significativamente en las horas de mayor y menor consumo, lo cual es esperado en redes de abastecimiento urbano densamente pobladas, donde las variaciones horarias son más marcadas

**Tabla 12.** Resultados y errores de  $K$  para el patrón de consumo

RESULTADOS Y ERRORES DEL K PARA EL PATRON DE CONSUMO																														
Hora	10%			20%			30%			40%			50%			60%			70%			80%			90%			100%		
	10%	Q medido (l/s)	Porcentaje de Error	20%	Q medido (l/s)	Porcentaje de Error (%)	30%	Q medido (l/s)	Porcentaje de Error	40%	Q medido (l/s)	Porcentaje de Error	50%	Q medido (l/s)	Porcentaje de Error	60%	Q medido (l/s)	Porcentaje de Error	70%	Q medido (l/s)	Porcentaje de Error	80%	Q medido (l/s)	Porcentaje de Error	90%	Q medido (l/s)	Porcentaje de Error	100%	Q medido (l/s)	Porcentaje de Error
0	7,87	8,517416667	7,6%	8,59	8,517416667	0,9%	9,3	8,517416667	9,2%	10,02	8,517416667	17,6%	10,73	8,517416667	26,0%	11,45	8,517416667	34,4%	12,17	8,517416667	42,9%	12,88	8,517416667	51,2%	13,6	8,517416667	59,7%	14,31	8,517416667	68,0%
1	4,87	5,271333333	7,6%	5,31	5,271333333	0,7%	5,75	5,271333333	9,1%	6,2	5,271333333	17,6%	6,64	5,271333333	26,0%	7,08	5,271333333	34,3%	7,53	5,271333333	42,8%	7,97	5,271333333	51,2%	8,41	5,271333333	59,5%	8,85	5,271333333	67,9%
2	3,82	4,14175	7,8%	4,17	4,14175	0,7%	4,52	4,14175	9,1%	4,86	4,14175	17,3%	5,21	4,14175	25,8%	5,56	4,14175	34,2%	5,91	4,14175	42,7%	6,25	4,14175	50,9%	6,6	4,14175	59,4%	6,95	4,14175	67,8%
3	3,73	4,03975	7,7%	4,07	4,03975	0,7%	4,41	4,03975	9,2%	4,75	4,03975	17,6%	5,09	4,03975	26,0%	5,43	4,03975	34,4%	5,77	4,03975	42,8%	6,11	4,03975	51,2%	6,45	4,03975	59,7%	6,79	4,03975	68,1%
4	4,01	4,334416667	7,5%	4,37	4,334416667	0,8%	4,74	4,334416667	9,4%	5,1	4,334416667	17,7%	5,47	4,334416667	26,2%	5,83	4,334416667	34,5%	6,19	4,334416667	42,8%	6,56	4,334416667	51,3%	6,92	4,334416667	59,7%	7,29	4,334416667	68,2%
5	6,09	6,596833333	7,7%	6,64	6,596833333	0,7%	7,2	6,596833333	9,1%	7,75	6,596833333	17,5%	8,31	6,596833333	26,0%	8,86	6,596833333	34,3%	9,41	6,596833333	42,6%	9,97	6,596833333	51,1%	10,52	6,596833333	59,5%	11,07	6,596833333	67,8%
6	12,15	13,15591667	7,6%	13,26	13,15591667	0,8%	14,36	13,15591667	9,2%	15,47	13,15591667	17,6%	16,57	13,15591667	26,0%	17,68	13,15591667	34,4%	18,78	13,15591667	42,7%	19,89	13,15591667	51,2%	20,99	13,15591667	59,5%	22,1	13,15591667	68,0%
7	15,77	17,071	7,6%	17,21	17,071	0,8%	18,64	17,071	9,2%	20,07	17,071	17,6%	21,51	17,071	26,0%	22,94	17,071	34,4%	24,38	17,071	42,8%	25,81	17,071	51,2%	27,24	17,071	59,6%	28,68	17,071	68,0%
8	16,89	18,272	7,6%	18,43	18,272	0,9%	19,96	18,272	9,2%	21,5	18,272	17,7%	23,04	18,272	26,1%	24,57	18,272	34,5%	26,11	18,272	42,9%	27,64	18,272	51,3%	29,18	18,272	59,7%	30,71	18,272	68,1%
9	19,05	20,616	7,6%	20,78	20,616	0,8%	22,51	20,616	9,2%	24,24	20,616	17,6%	25,97	20,616	26,0%	27,7	20,616	34,4%	29,44	20,616	42,8%	31,17	20,616	51,2%	32,9	20,616	59,6%	34,63	20,616	68,0%
10	19,87	21,49333333	7,6%	21,67	21,49333333	0,8%	23,48	21,49333333	9,2%	25,28	21,49333333	17,6%	27,09	21,49333333	26,0%	28,9	21,49333333	34,5%	30,7	21,49333333	42,8%	32,51	21,49333333	51,3%	34,31	21,49333333	59,6%	36,12	21,49333333	68,1%
11	20,43	22,10333333	7,6%	22,28	22,10333333	0,8%	24,14	22,10333333	9,2%	26	22,10333333	17,6%	27,85	22,10333333	26,0%	29,71	22,10333333	34,4%	31,57	22,10333333	42,8%	33,42	22,10333333	51,2%	35,28	22,10333333	59,6%	37,14	22,10333333	68,0%
12	19,88	21,50558333	7,6%	21,69	21,50558333	0,9%	23,49	21,50558333	9,2%	25,3	21,50558333	17,6%	27,11	21,50558333	26,1%	28,92	21,50558333	34,5%	30,72	21,50558333	42,8%	32,53	21,50558333	51,3%	34,34	21,50558333	59,7%	36,15	21,50558333	68,1%
13	19,28	20,85425	7,5%	21,03	20,85425	0,8%	22,78	20,85425	9,2%	24,53	20,85425	17,6%	26,29	20,85425	26,1%	28,04	20,85425	34,5%	29,79	20,85425	42,8%	31,54	20,85425	51,2%	33,3	20,85425	59,7%	35,05	20,85425	68,1%
14	18,63	20,15958333	7,6%	20,32	20,15958333	0,8%	22,02	20,15958333	9,2%	23,71	20,15958333	17,6%	25,41	20,15958333	26,0%	27,1	20,15958333	34,4%	28,79	20,15958333	42,8%	30,49	20,15958333	51,2%	32,18	20,15958333	59,6%	33,87	20,15958333	68,0%
15	18,23	19,71991667	7,6%	19,89	19,71991667	0,9%	21,54	19,71991667	9,2%	23,2	19,71991667	17,6%	24,86	19,71991667	26,1%	26,51	19,71991667	34,4%	28,17	19,71991667	42,9%	29,83	19,71991667	51,3%	31,49	19,71991667	59,7%	33,14	19,71991667	68,1%
16	17,73	19,17983333	7,6%	19,34	19,17983333	0,8%	20,95	19,17983333	9,2%	22,56	19,17983333	17,6%	24,17	19,17983333	26,0%	25,78	19,17983333	34,4%	27,39	19,17983333	42,8%	29,01	19,17983333	51,3%	30,62	19,17983333	59,6%	32,23	19,17983333	68,0%
17	18,06	19,53525	7,6%	19,7	19,53525	0,8%	21,34	19,53525	9,2%	22,98	19,53525	17,6%	24,62	19,53525	26,0%	26,26	19,53525	34,4%	27,9	19,53525	42,8%	29,55	19,53525	51,3%	31,19	19,53525	59,7%	32,83	19,53525	68,1%
18	18,07	19,55183333	7,6%	19,71	19,55183333	0,8%	21,36	19,55183333	9,2%	23	19,55183333	17,6%	24,64	19,55183333	26,0%	26,28	19,55183333	34,4%	27,93	19,55183333	42,9%	29,57	19,55183333	51,2%	31,21	19,55183333	59,6%	32,86	19,55183333	68,1%
19	19,18	20,74258333	7,5%	20,92	20,74258333	0,9%	22,66	20,74258333	9,2%	24,41	20,74258333	17,7%	26,15	20,74258333	26,1%	27,89	20,74258333	34,5%	29,64	20,74258333	42,9%	31,38	20,74258333	51,3%	33,12	20,74258333	59,7%	34,87	20,74258333	68,1%
20	18,07	19,54941667	7,6%	19,71	19,54941667	0,8%	21,36	19,54941667	9,3%	23	19,54941667	17,7%	24,64	19,54941667	26,0%	26,28	19,54941667	34,4%	27,93	19,54941667	42,9%	29,57	19,54941667	51,3%	31,21	19,54941667	59,6%	32,86	19,54941667	68,1%
21	17,28	18,69383333	7,6%	18,85	18,69383333	0,8%	20,42	18,69383333	9,2%	21,99	18,69383333	17,6%	23,56	18,69383333	26,0%	25,14	18,69383333	34,5%	26,71	18,69383333	42,9%	28,28	18,69383333	51,3%	29,85	18,69383333	59,7%	31,42	18,69383333	68,1%
22	14,78	15,99641667	7,6%	16,12	15,99641667	0,8%	17,47	15,99641667	9,2%	18,81	15,99641667	17,6%	20,16	15,99641667	26,0%	21,5	15,99641667	34,4%	22,84	15,99641667	42,8%	24,19	15,99641667	51,2%	25,53	15,99641667	59,6%	26,87	15,99641667	68,0%
23	11	11,905	7,6%	12	11,905	0,8%	13	11,905	9,2%	14	11,905	17,6%	15	11,905	26,0%	16	11,905	34,4%	17	11,905	42,8%	18,01	11,905	51,3%	19,01	11,905	59,7%	20,01	11,905	68,1%
PROM	14,4	15,5	7,6%	15,7	15,5	0,8%	17,0	15,5	9,2%	18,3	15,5	17,6%	19,6	15,5	26,0%	20,9	15,5	34,4%	22,2	15,5	42,8%	23,5	15,5	51,2%	24,8	15,5	59,6%	26,1	15,5	68,0%
MAX	20,4	22,1	7,6%	22,3	22,1	0,8%	24,1	22,1	9,2%	26,0	22,1	17,6%	27,9	22,1	26,0%	29,7	22,1	34,4%	31,6	22,1	42,8%	33,4	22,1	51,2%	35,3	22,1	59,6%	37,1	22,1	68,0%
MIN	3,7	4,0	7,7%	4,1	4,0	0,7%	4,4	4,0	9,2%	4,8	4,0	17,6%	5,1	4,0	26,0%	5,4	4,0	34,4%	5,8	4,0	42,8%	6,1	4,0	51,2%	6,5	4,0	59,7%	6,8	4,0	68,1%

Luego de haber definido como base el coeficiente de rugosidad óptimo ( $C = 146,4$ ), se procedió a desarrollar un análisis de sensibilidad para el parámetro horario  $K$ , con el objetivo de evaluar la influencia del patrón de consumo horario sobre los caudales simulados en el modelo hidráulico. Este análisis permitió identificar el valor de ajuste que mejor representa las condiciones reales del sistema.

El patrón base utilizado, denominado PERFIL MC, fue ajustado mediante incrementos porcentuales progresivos en el coeficiente horario  $K$ , generando diez escenarios adicionales con los siguientes valores:

$$K = 10\%, 20\%, 30\%, \dots, 100\%$$

El cálculo del patrón modificado para cada hora del día se realizó a partir de la siguiente expresión:

$$K_h = K_{base,h} \times (1 + \text{incremento porcentual})$$

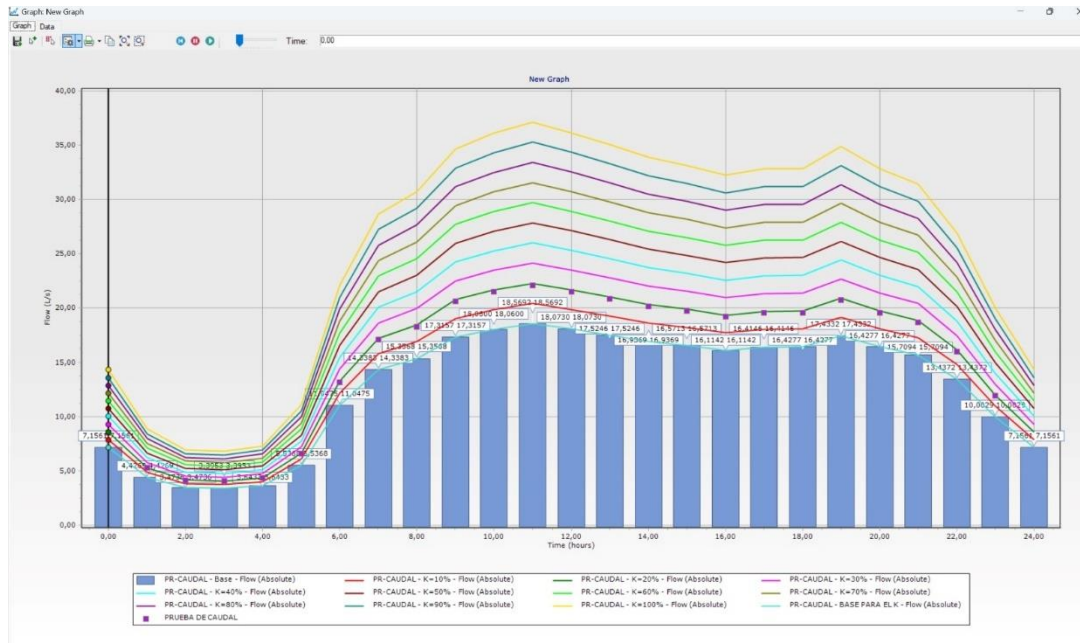
Donde  $h$  representa la hora del día, y el patrón ajustado fue asignado de forma uniforme a todos los nodos con demanda positiva. Cabe destacar que el coeficiente de rugosidad  $C$  se mantuvo constante ( $C = 146,4$ ) para que las variaciones observadas respondan exclusivamente a los cambios en el parámetro  $K$ .

Donde  $h$  representa la hora del día, y el patrón ajustado fue asignado de forma uniforme a todos los nodos con demanda positiva. Cabe destacar que el coeficiente de rugosidad  $C$  se mantuvo constante ( $C = 146,4$ ) para que las variaciones observadas respondan exclusivamente a los cambios en el parámetro  $K$ .

$$\text{Error Relativo (\%)} = \left| \frac{Q_{\text{simulado}} - Q_{\text{medido}}}{Q_{\text{medido}}} \right| \times 100$$

El escenario con menor error relativo promedio fue  $K = 20\%$ , con un valor de apenas **0,79%**, significativamente inferior al del resto de escenarios. Esto indica que el patrón de consumo original subestimaba ligeramente los valores reales, y que un incremento del 20% permite una mejor correspondencia entre la simulación y la realidad.

**Ilustración 21** Comparación gráfica de caudal simulado en PR-CAUDAL para cada incremento de K frente al caudal medido.



**Tabla 13** Tabla de resultados del caudal simulado en cada escenario de K durante las 24 horas.

Time (hours)	PR-CAUDAL - Base - Flow (Absolute) (l/s)	PR-CAUDAL - K=10% - Flow (Absolute) (l/s)	PR-CAUDAL - K=20% - Flow (Absolute) (l/s)	PR-CAUDAL - K=30% - Flow (Absolute) (l/s)	PR-CAUDAL - K=40% - Flow (Absolute) (l/s)	PR-CAUDAL - K=50% - Flow (Absolute) (l/s)	PR-CAUDAL - K=60% - Flow (Absolute) (l/s)	PR-CAUDAL - K=70% - Flow (Absolute) (l/s)	PR-CAUDAL - K=80% - Flow (Absolute) (l/s)	PR-CAUDAL - K=90% - Flow (Absolute) (l/s)	PR-CAUDAL - K=100% - Flow (Absolute) (l/s)	PR-CAUDAL - BASE PARA EL K - Flow (Absolute) (l/s)	
0	0,00	7,16	7,87	8,59	9,30	10,02	10,73	11,45	12,17	12,88	13,60	14,31	7,16
1	1,00	4,43	4,87	5,31	5,75	6,20	6,64	7,08	7,53	7,97	8,41	8,85	4,43
2	2,00	3,47	3,82	4,17	4,52	4,86	5,21	5,56	5,91	6,25	6,60	6,95	3,47
3	3,00	3,40	3,73	4,07	4,41	4,75	5,09	5,43	5,77	6,11	6,45	6,79	3,40
4	4,00	3,64	4,01	4,37	4,74	5,10	5,47	5,83	6,19	6,56	6,92	7,29	3,64
5	5,00	5,54	6,09	6,64	7,20	7,75	8,31	8,86	9,41	9,97	10,52	11,07	5,54
6	6,00	11,05	12,15	13,26	14,36	15,47	16,57	17,68	18,78	19,89	20,99	22,10	11,05
7	7,00	14,34	15,77	17,21	18,64	20,07	21,51	22,94	24,38	25,81	27,24	28,68	14,34
8	8,00	15,36	16,89	18,43	19,96	21,50	23,04	24,57	26,11	27,64	29,18	30,71	15,36
9	9,00	17,32	19,05	20,78	22,51	24,24	25,97	27,70	29,44	31,17	32,90	34,63	17,32
10	10,00	18,06	19,87	21,67	23,48	25,28	27,09	28,90	30,70	32,51	34,31	36,12	18,06
11	11,00	18,57	20,43	22,28	24,14	26,00	27,85	29,71	31,57	33,42	35,28	37,14	18,57
12	12,00	18,07	19,88	21,69	23,49	25,30	27,11	28,92	30,72	32,53	34,34	36,15	18,07
13	13,00	17,52	19,28	21,03	22,78	24,53	26,29	28,04	29,79	31,54	33,30	35,05	17,52
14	14,00	16,94	18,63	20,32	22,02	23,71	25,41	27,10	28,79	30,49	32,18	33,87	16,94
15	15,00	16,57	18,23	19,89	21,54	23,20	24,86	26,51	28,17	29,83	31,49	33,14	16,57
16	16,00	16,11	17,73	19,34	20,95	22,56	24,17	25,78	27,39	29,01	30,62	32,23	16,11
17	17,00	16,41	18,06	19,70	21,34	22,98	24,62	26,26	27,90	29,55	31,19	32,83	16,41
18	18,00	16,43	18,07	19,71	21,36	23,00	24,64	26,28	27,93	29,57	31,21	32,86	16,43
19	19,00	17,43	19,18	20,92	22,66	24,41	26,15	27,89	29,64	31,38	33,12	34,87	17,43
20	20,00	16,43	18,07	19,71	21,36	23,00	24,64	26,28	27,93	29,57	31,21	32,86	16,43
21	21,00	15,71	17,28	18,85	20,42	21,99	23,56	25,14	26,71	28,28	29,85	31,42	15,71
22	22,00	13,44	14,78	16,12	17,47	18,81	20,16	21,50	22,84	24,19	25,53	26,87	13,44
23	23,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,01	19,01	20,01	10,00
24	24,00	7,16	7,87	8,59	9,30	10,02	10,73	11,45	12,17	12,88	13,60	14,31	7,16

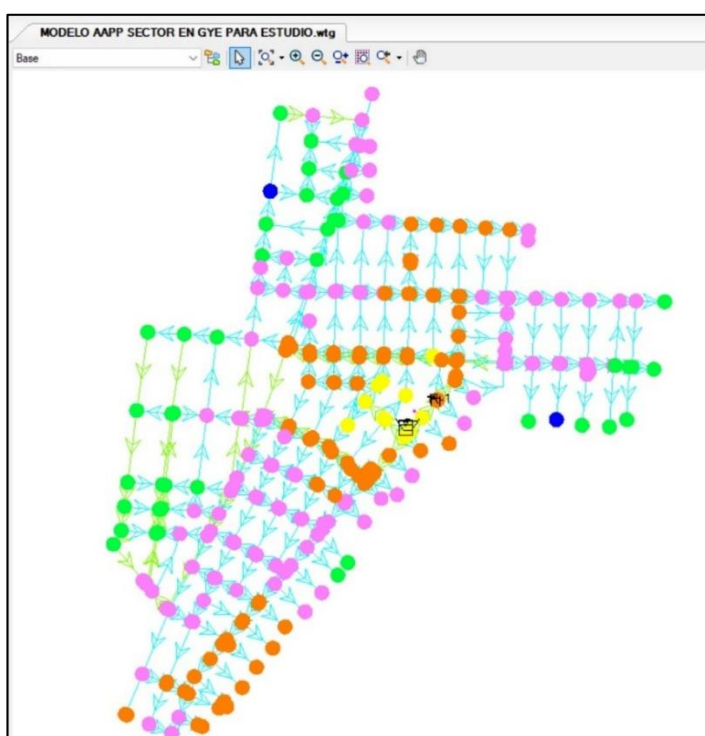
El análisis demostró que el valor de **K = 20%** logra replicar con mayor precisión el comportamiento horario del sistema real, tanto en forma como en magnitud. Por tanto, este valor fue adoptado como el **coeficiente horario definitivo** en la calibración manual final del modelo hidráulico.

### 6.1.12. Digitalización del modelo hidráulico en WaterGEMS

El proceso de digitalización inició con la incorporación de la red de distribución del área de estudio en el software Bentley WaterGEMS CONNECT Edition. Para ello, se utilizaron datos recopilados en campo y fuentes complementarias como planos de redes existentes y de curvas de nivel. La red fue conformada por 268 nodos, 352 tramos de tubería y un tanque de almacenamiento que abastece al sector en análisis.

La geometría fue verificada con herramientas de validación del software, y se configuraron las propiedades hidráulicas esenciales: material, diámetro, rugosidad inicial (basada en Hazen-Williams), cota del terreno, y patrón horario de consumo ajustado. Se ingresó un patrón horario con incremento del 20% sobre la curva base, justificado mediante un análisis de sensibilidad. La demanda total fue distribuida entre los nodos con consumo positivo.

*Ilustración 22 Modelo hidráulico digitalizado del sector Pastor Vera en WaterGEMS*



### 6.1.13. Calibración del modelo de manera manual verificando parámetros sensibles

Una vez finalizado el análisis de sensibilidad para los parámetros físicos y operativos del sistema, se procedió a ejecutar la calibración manual del modelo

hidráulico, considerando como variable principal de ajuste el caudal, en concordancia con lo establecido por el docente tutor.

Con base en los resultados obtenidos en las etapas anteriores, se seleccionaron los siguientes parámetros para el escenario de calibración final:

- Coeficiente de rugosidad (C): 146,4
- Coeficiente horario de demanda (K): incremento del 20% respecto al patrón base

Estos valores fueron implementados en un escenario denominado CALIBRACIÓN MANUAL FINAL, sobre el cual se simuló un ciclo completo de 24 horas, aplicando el patrón de consumo medido en campo como base de comparación.

#### 6.1.14. Comparación entre caudal medido y simulado

La Ilustración 22 muestra la comparación gráfica entre el caudal medido en campo (línea roja), el caudal simulado en el escenario base (puntos verdes) y el caudal simulado en el escenario calibrado final (barras azules). Puede observarse que la simulación ajustada logra una mejor representación del comportamiento real, especialmente en las horas de mayor demanda.

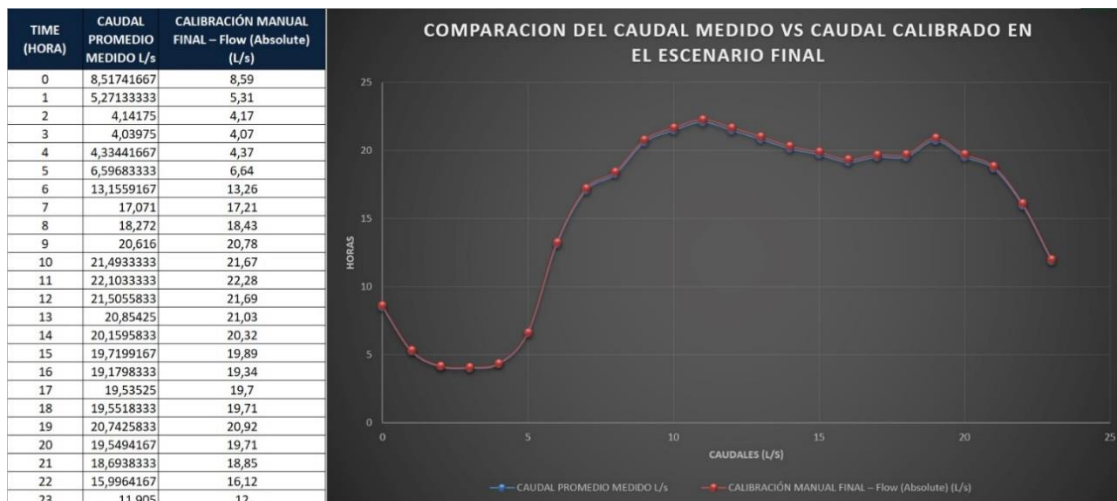
**Ilustración 23** Comparación gráfica de caudal horario: medido vs. simulado en escenario base y calibrado final



Asimismo, se elaboró una tabla comparativa con los valores medidos y simulados hora por hora, complementada con una gráfica que evidencia la cercanía entre ambas curvas a lo largo del día.

**Tabla 14** Comparación horaria de caudal promedio medido y caudal simulado calibrado.

**Ilustración 24** Curva comparativa del caudal medido vs. calibrado en el escenario final.



### 6.1.15. Promedios de caudal en el ciclo de simulación

Caudal promedio medido (24 h): 15,66 L/s

Caudal promedio simulado (escenario calibrado): 15,64 L/s

Esta proximidad en los valores promedio, junto con la similitud en las curvas horarias, valida la eficacia de los parámetros seleccionados para replicar el comportamiento hidráulico real del sistema.

#### Evaluación del ajuste

El ajuste logrado con  $C = 146,4$  y  $K = 20\%$  representa una calibración satisfactoria del modelo, al reproducir con precisión tanto la forma como la magnitud del caudal medido en campo. Este escenario será considerado como base de referencia para la comparación posterior con la calibración automática mediante Darwin Calibrator, permitiendo contrastar los resultados y evaluar el desempeño de ambas metodologías.

### 6.1.16. Rango general de presiones

Los resultados de la simulación muestran que las presiones registradas en los nodos del sistema presentan una dispersión significativa. Se obtuvo una presión mínima de 7.44 m.c.a. y una presión máxima de 46.33 m.c.a., con un valor promedio de 23.36 m.c.a.

Con base en los criterios técnicos establecidos (rango óptimo de 15 a 45 m.c.a.), se identificaron:

- 38 nodos con presiones inferiores a 15 m.c.a., lo cual representa un problema crítico de supresión, especialmente si se trata de nodos con demanda.
- 1 nodo con presión superior a 45 m.c.a., lo que indica una posible sobrepresión localizada.

#### 6.1.17. Evaluación de presiones en nodos con demanda

Del total de nodos con presión fuera del rango óptimo:

- 30 nodos con presión baja (menor a 15 m.c.a.) tienen demanda asignada, lo que representa una afectación directa al servicio de abastecimiento de los usuarios en esos puntos.
- 1 nodo con presión alta tiene también demanda, pero al estar apenas por encima del límite, no se considera un caso crítico inmediato, aunque sí debe ser monitoreado.

#### 6.1.18. Diagnóstico técnico y recomendaciones

El comportamiento del sistema refleja una necesidad de ajustes finos en los parámetros del modelo, particularmente para mejorar las condiciones en los nodos con baja presión sin incurrir en rediseños estructurales de la red. Se proponen las siguientes acciones:

- Ajuste del patrón de consumo: Reducir el incremento aplicado al patrón de consumo del 10% actual a un 5%, permitiendo una modulación más suave de la demanda sin forzar el sistema hidráulicamente.
- Prueba de variación en la rugosidad (C): Actualmente se utiliza un coeficiente promedio de  $C = 146.4$ . Se recomienda probar con  $C = 150$  o  $155$  (valores de tubería PVC nueva), pero únicamente en tramos principales, para reducir las pérdidas de carga y mejorar la presión aguas abajo.
- Verificación de condiciones de entrada: Evaluar la posibilidad de incrementar ligeramente la presión de entrada en válvulas o tanques, si las condiciones lo

permiten, para mejorar la presión en sectores afectados sin alterar significativamente el equilibrio hidráulico.

- Ajuste en válvulas modeladas: En caso de que existan válvulas de control ya modeladas en el sistema, se sugiere revisar su configuración para mitigar pérdidas de carga localizadas.
- Priorización de nodos críticos: Los 30 nodos con demanda y presión deficiente deben ser el foco principal de las acciones de ajuste. Se puede obtener un listado detallado desde el modelo para facilitar su intervención.

#### 6.1.19. Calibración automática mediante Darwin Calibrator

Una vez calibrado el modelo manualmente, se utilizó Darwin Calibrator para validar los resultados mediante una calibración automática. Esta herramienta aplica algoritmos genéticos para buscar combinaciones óptimas de parámetros que reduzcan el error entre los datos medidos y simulados.

Se preparó un escenario específico llamado “Calibración Darwin LB”, empleando 24 Field Data Snapshots correspondientes a cada hora del día. En ellos se registró el caudal medido a la salida del tanque, replicando las condiciones del escenario manual. El caudal facturado fue ajustado a 13 L/s, pero se simuló con el patrón incrementado para reflejar la demanda real.

Se definieron grupos de demanda y se ajustaron los coeficientes de rugosidad y multiplicadores de demanda como variables de optimización. Se seleccionó como solución final aquella con mejor valor de fitness, coincidente con los valores de  $C = 146.4$  y  $K = 1.2$ , corroborando así la calibración manual previa.

#### 6.1.20. Evaluación de precisión: comparación de resultados medidos y simulados

La validación del modelo hidráulico se basó en la comparación entre el caudal simulado y el medido en campo a la salida del tanque, punto representativo del sistema.

En el presente estudio, la calibración manual del modelo hidráulico se enfocó exclusivamente en el caudal medido a la salida del tanque, ya que este parámetro representa de forma directa la respuesta del sistema ante las variaciones horarias de demanda. Si bien la presión es un parámetro relevante, su calibración no se incluyó en esta etapa debido a la limitada disponibilidad de mediciones en nodos internos de la

red. No obstante, la validación de presiones fue tratada posteriormente como análisis complementario.

En la calibración manual, el escenario óptimo ( $C = 146.4$  y un incremento del 20% en el patrón de consumo) logró reproducir un caudal de 15 L/s, coincidente con el valor medido, lo que demuestra una buena representación del comportamiento horario.

En el caso de Darwin Calibrator, aunque fue aplicado inicialmente para una hora específica, el escenario resultante con  $C \approx 147.2$  se extendió a las 24 horas, mostrando un comportamiento similar al de la calibración manual. Esto evidencia que ambos métodos permiten ajustar el modelo con precisión, siendo el caudal el principal criterio de evaluación, dado que no se dispuso de mediciones de presión para este estudio. Por tanto, se concluye que el modelo calibrado es confiable para analizar el desempeño del sistema en el sector estudiado.

**Tabla 15** Comparación entre calibración manual y calibración automática con Darwin Calibrator

Cuadro comparativo entre Calibración Manual y Calibración con Darwin Calibrator		
Criterio de Comparación	Calibración Manual	Calibración con Darwin Calibrator
Parámetros ajustados	Rugosidad $C = 146.4 +$ Coeficiente horario $K = 20\%$	Rugosidad $C \approx 147.2$ (valor óptimo estimado por Darwin)
Método	Ensayo y error sobre 10 escenarios con análisis de sensibilidad	Optimización automática mediante algoritmo genético
Resultado final	Caudal simulado $\approx 15$ L/s (ajustado al medido)	Caudal simulado $\approx 15$ L/s (ajuste automático con mínima diferencia respecto al medido)
Tiempo y esfuerzo requerido	Alto (requiere múltiples simulaciones, análisis técnico y validación)	Bajo (ajuste eficiente con menor intervención del usuario)
Ajuste horario (24h)	Simulación completa y validada durante las 24 horas del día	Simulación completa y validada durante las 24 horas del día

Para complementar la comparación entre los métodos de calibración manual y automática, se calculó el **RMSE (Root Mean Square Error)** como medida estadística que cuantifica la diferencia entre los caudales simulados y los medidos en campo. Este valor permite evaluar objetivamente el nivel de ajuste de cada modelo respecto a la realidad observada.

Los resultados muestran que el método de **calibración manual alcanzó un RMSE de 0,138 L/s**, mientras que la calibración automática mediante Darwin Calibrator obtuvo un RMSE de 2,681 L/s. Esta diferencia evidencia que, al menos para este tramo representativo (PR-CAUDAL), el modelo calibrado manualmente logra una mejor aproximación a los valores reales, con errores considerablemente menores a lo largo de las 24 horas evaluadas.

La tabla incluye el cálculo detallado de los errores cuadráticos individuales por hora y los valores de RMSE finales, los cuales fueron formulados directamente en Excel para mantener la trazabilidad y transparencia.

**Tabla 16** *Calculo de errores cuadráticos*

Hora	Caudal Medido (L/s)	Calibración Manual (L/s)	Calibración Darwin (L/s)	(Error manual) <sup>2</sup>	(Error Darwin) <sup>2</sup>
0	8,52	8,59	7,16	0,005	1,850
1	5,27	5,31	4,43	0,002	0,706
2	4,14	4,17	3,47	0,001	0,449
3	4,04	4,07	3,4	0,001	0,410
4	4,33	4,37	3,64	0,002	0,476
5	6,6	6,64	5,54	0,002	1,124
6	13,16	13,26	11,05	0,010	4,452
7	17,07	17,21	14,34	0,020	7,453
8	18,27	18,43	15,36	0,026	8,468
9	20,62	20,78	17,32	0,026	10,890
10	21,49	21,67	18,06	0,032	11,765
11	22,1	22,28	18,57	0,032	12,461
12	21,51	21,69	18,07	0,032	11,834
13	20,85	21,03	17,52	0,032	11,089
14	20,16	20,32	16,94	0,026	10,368
15	19,72	19,89	16,57	0,029	9,922
16	19,18	19,34	16,11	0,026	9,425
17	19,54	19,7	16,41	0,026	9,797
18	19,55	19,71	16,43	0,026	9,734
19	20,74	20,92	17,43	0,032	10,956
20	19,55	19,71	16,43	0,026	9,734
21	18,69	18,85	15,71	0,026	8,880
22	16	16,12	13,44	0,014	6,554
23	11,91	12	10	0,008	3,648
RMSE				0,138	2,681

La calibración del modelo hidráulico mediante el método manual y mediante la herramienta Darwin Calibrator arrojó resultados similares en cuanto al caudal simulado final (15 L/s), evidenciando la validez de ambos procedimientos.

En el caso de Darwin Calibrator, aunque su función principal es optimizar los parámetros para un instante puntual del día, en este estudio se configuró el patrón de demanda horario en los nodos, lo que permitió evaluar posteriormente el comportamiento del modelo durante las 24 horas mediante simulación extendida.

Ambas metodologías permiten alcanzar una calibración aceptable, siendo la manual útil para realizar un análisis de sensibilidad detallado, mientras que Darwin ofrece eficiencia en la búsqueda de valores óptimos. El uso combinado de ambos enfoques fortalece la confiabilidad de los resultados.

En la Tabla 17 se presenta la validación de la calibración mediante el análisis estadístico de la raíz del error cuadrático medio RMSE, en este caso para el coeficiente C tomado como 146.4 L/s, el mismo que presenta un error promedio de  $\pm 2,68$ , el cual se encuentra dentro de la norma que es  $\leq 5\%$ . Walski et al. (2004) sugieren un rango del RMSE entre 2 % y 5 % como adecuado, dependiendo de la calidad de los datos y la complejidad del sistema, con lo cual se valida la calibración del modelo para el parámetro C (Walski et al., 2004).

**Tabla 17** RMSE del caudal simulado con C de 146.4 para 24 h de observación

Hora	Caudal Observado (L/s)	Caudal Simulado C=140 L/s	Desviación cuadrática (Obs. - Sim.) <sup>2</sup>
0	8,52	7,16	1,8496
1	5,27	4,43	0,7056
2	4,14	3,47	0,4489
3	4,04	3,4	0,4096
4	4,33	3,64	0,4761
5	6,6	5,54	1,1236
6	13,16	11,05	4,4521
7	17,07	14,34	7,4529
8	18,27	15,36	8,4681
9	20,62	17,32	10,89
10	21,49	18,06	11,7649
11	22,1	18,57	12,4609
12	21,51	18,07	11,8336
13	20,85	17,52	11,0889
14	20,16	16,94	10,3684
15	19,72	16,57	9,9225
16	19,18	16,11	9,4249
17	19,54	16,41	9,7969
18	19,55	16,43	9,7344
19	20,74	17,43	10,9561
20	19,55	16,43	9,7344
21	18,69	15,71	8,8804
22	16	13,44	6,5536

23	11,91	10	3,6481
<b>RMSE</b>			<b>2,680520006</b>

*Fuente: autora*

En las Tablas 18 y 19 se muestran los resultados comparativos de los valores observados y simulados con una K de 10% y de 60%, respectivamente. Como el RMSE es mayor del 5% con una K de 60%, se deduce que, para obtener un buen ajuste en el modelo calibrado, el valor de K debe ser menor de este último valor.

**Tabla 18** RMSE del caudal simulado con K de 10% para 24 h de observación

Hora	Caudal Observado (L/s)	Caudal Simulado K=10%	Desviación cuadrática (Obs. - Sim.) <sup>2</sup>
0,00	8,52	7,87	0,42
1,00	5,27	4,87	0,16
2,00	4,14	3,82	0,10
3,00	4,04	3,73	0,10
4,00	4,33	4,01	0,10
5,00	6,60	6,09	0,26
6,00	13,16	12,15	1,02
7,00	17,07	15,77	1,69
8,00	18,27	16,89	1,90
9,00	20,62	19,05	2,46
10,00	21,49	19,87	2,62
11,00	22,10	20,43	2,79
12,00	21,51	19,88	2,66
13,00	20,85	19,28	2,46
14,00	20,16	18,63	2,34
15,00	19,72	18,23	2,22
16,00	19,18	17,73	2,10
17,00	19,54	18,06	2,19
18,00	19,55	18,07	2,19
19,00	20,74	19,18	2,43
20,00	19,55	18,07	2,19
21,00	18,69	17,28	1,99
22,00	16,00	14,78	1,49
23,00	11,91	11,00	0,83
<b>RMSE</b>			<b>1,27</b>

*Fuente: autora*

**Tabla 19** RMSE del caudal simulado con K de 60% para 24 h de observación

Hora	Caudal Observado (L/s)	Caudal Simulado K=60%	Desviación cuadrática (Obs. - Sim.) <sup>2</sup>
0,00	8,52	11,45	8,58
1,00	5,27	7,08	3,28
2,00	4,14	5,56	2,02
3,00	4,04	5,43	1,93
4,00	4,33	5,83	2,25
5,00	6,60	8,86	5,11
6,00	13,16	17,68	20,43
7,00	17,07	22,94	34,46
8,00	18,27	24,57	39,69
9,00	20,62	27,70	50,13
10,00	21,49	28,90	54,91
11,00	22,10	29,71	57,91
12,00	21,51	28,92	54,91
13,00	20,85	28,04	51,70
14,00	20,16	27,10	48,16
15,00	19,72	26,51	46,10
16,00	19,18	25,78	43,56
17,00	19,54	26,26	45,16
18,00	19,55	26,28	45,29
19,00	20,74	27,89	51,12
20,00	19,55	26,28	45,29
21,00	18,69	25,14	41,60
22,00	16,00	21,50	30,25
23,00	11,91	16,00	16,73
<b>RMSE</b>			<b>5,78</b>

*Fuente: autora*

Para un valor de K de 20%, los resultados obtenidos de RMSE son los más bajos, por lo que este constituye un factor de relevancia, ya que permite disminuir la desviación de los resultados simulados con los observados en la red calibrada, tal como se puede ver en la Tabla 20

**Tabla 20** RMSE del caudal simulado con K de 20% para 24 h de observación

Hora	Caudal Observado (l/s)	Caudal Simulado K=20%	Desviación cuadrática (Obs. - Sim.) <sup>2</sup>
0,00	8,52	8,59	0,00
1,00	5,27	5,31	0,00
2,00	4,14	4,17	0,00
3,00	4,04	4,07	0,00
4,00	4,33	4,37	0,00
5,00	6,60	6,64	0,00
6,00	13,16	13,26	0,01
7,00	17,07	17,21	0,02
8,00	18,27	18,43	0,03
9,00	20,62	20,78	0,03
10,00	21,49	21,67	0,03
11,00	22,10	22,28	0,03
12,00	21,51	21,69	0,03
13,00	20,85	21,03	0,03
14,00	20,16	20,32	0,03
15,00	19,72	19,89	0,03
16,00	19,18	19,34	0,03
17,00	19,54	19,70	0,03
18,00	19,55	19,71	0,03
19,00	20,74	20,92	0,03
20,00	19,55	19,71	0,03
21,00	18,69	18,85	0,03
22,00	16,00	16,12	0,01
23,00	11,91	12,00	0,01
<b>RMSE</b>			<b>0,14</b>

*Fuente: autora*

## 7 Conclusiones y Recomendaciones

### Conclusiones

- La metodología aplicada permitió identificar parámetros sensibles como la rugosidad y el coeficiente horario de demanda, cuyo ajuste fue clave para lograr una calibración aceptable del modelo.
- La comparación de resultados evidenció que ambos métodos pueden alcanzar ajustes aceptables, pero el método manual proporcionó una visión más completa del comportamiento horario del sistema, siendo más útil para redes con variabilidad de consumo.
- El coeficiente horario de demanda (K) resultó ser un parámetro crítico para ajustar el perfil horario de consumo, siendo el valor  $K = 20\%$  el que mejor replicó la curva de caudal medido.
- La combinación de parámetros  $C = 146.4$  y  $K = 20\%$  fue la que permitió obtener el mejor ajuste del caudal simulado frente al medido, validando su selección para la calibración final del modelo.
- La metodología desarrollada es replicable en otros sectores urbanos de características similares, especialmente aquellos en proceso de regularización que presentan deficiencias en la dotación de agua potable.

### Recomendaciones

#### 1. Realizar un análisis previo de sensibilidad mejora la precisión del modelo

Antes de iniciar una calibración, es muy útil analizar cómo afectan al modelo ciertos parámetros como la rugosidad o el patrón horario. Esta práctica ayudó a identificar cuál de ellos tenía mayor influencia en los resultados del caudal simulado, y permitió enfocar los esfuerzos en los ajustes más importantes. Por eso, se recomienda aplicar esta estrategia en futuros estudios, ya que facilita la toma de decisiones y ahorra tiempo de simulación.

#### 2. Simular el comportamiento del sistema durante todo el día da resultados más completos

En este trabajo se simuló el modelo para las 24 horas del día, lo que permitió entender cómo varía el caudal a lo largo del tiempo. Esta visión global ayudó a lograr

una calibración más precisa, en comparación con enfoques que solo analizan una hora específica. Por ello, se sugiere que siempre se consideren simulaciones horarias completas, especialmente en zonas donde la demanda cambia mucho entre el día y la noche.

### **3. Combinar herramientas automáticas con revisión técnica mejora la confiabilidad del modelo**

Aunque usar Darwin Calibrator agiliza el proceso de calibración, es importante revisar los resultados obtenidos y verificar que los parámetros propuestos tengan sentido técnico. La experiencia de quien usa el programa, sigue siendo clave para garantizar que el modelo sea coherente con la realidad del sistema. Por lo tanto, se recomienda usar estas herramientas como apoyo, pero sin dejar de lado la validación manual.

## Referencias

---

- Cubillos, M. I. (2022). Modelo de deterioro en tuberías de agua potable con métodos probabilísticos e inteligencia artificial. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Civil.
- Interagua. (2022). Manual de Diseño de Sistemas de Acueducto MA-OED-004 (V-002). Concesionaria del Servicio de Agua Potable y Saneamiento – Guayaquil.
- González Cueva, J. (2018). Calibración hidráulica de sistemas de distribución con datos limitados. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Comisión Nacional del Agua Potable y Saneamiento – CNC. (2020). Manual de Diseño de Acueductos MA-OED-004 (Versión V-002). Interagua, Ecuador.
- American Water Works Association. (2017). M32: Computer modeling of water distribution systems (4th ed.). American Water Works Association.
- AWWA. (2009). Manual of Water Supply Practices M32: Distribution System Requirements for Fire Protection (3rd ed.). American Water Works Association.
- Chin, D. A. (2013). Water-Resources Engineering (3rd ed.). Pearson Education.
- Mays, L. W. (2000). Water Distribution Systems Handbook. McGraw-Hill.
- Tchobanoglous, G., & Schroeder, E. D. (1987). Water Quality: Characteristics, Modeling, and Modification. Addison-Wesley.
- Carbajal Sedano, P., & Loayza Pérez, V. M. (2023). Modelamiento del sistema de agua potable en épocas de avenida y estiaje mediante el uso del Software WaterGEMS-Pucapampa-Yauli, 2023 [Tesis de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Huancavelica]. <https://hdl.handle.net/20.500.14597/6192>
- EPA United States Environmental Protection Agency. (2025). EPANET Application for Modeling Drinking Water Distribution Systems. [www.epa.gov](http://www.epa.gov).
- Espinosa-Jiménez, C. F., Pérez-Montilla, M. A., & Medina-Padilla, M. E. (2019). Indicadores de gestión en sistemas de abastecimiento de agua potable. Experiencia internacional y la realidad en Venezuela. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 40(3), 297–302.
- Estévez Valencia, C., Herrera Ascencio, P., & Tiribocchi, A. (2019). Garantizar la disponibilidad de agua, su gestión sostenible y el saneamiento para todos\_

- implementación de políticas públicas en América Latina y el Caribe - UNESCO Biblioteca Digital. <https://n9.cl/j95mt>
- Flechas Hernández, R. A. (2010). Efecto del uso de la ecuación de Darcy-Weisbach vs la ecuación de Hazen-Williams sobre los costos de diseños optimizados de acueductos, teniendo en cuenta la rugosidad de las tuberías, línea del gradiente hidráulico y temperatura. [Tesis de Ingeniería Civil, Universidad de los Andes]. <https://n9.cl/5f72y5>
- Gómez Cortés, C. C. (2021). Calibración de redes de distribución de agua potable a través de inteligencia artificial [Tesis de Maestría en Ingeniería Civil, Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/d0fac154-3fd5-4963-bc2d-6dfb982c266a/content>
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). Metodología de la Investigación (M. Toledo-Castellanos & M. I. Rocha-Martínez, Eds.; 6th ed.). Mc Graw Hill.
- Hidalgo, D., Orozco, C., Velasco, C., Wong, N., & Jaramillo, J. J. (2022). Atlas estudio espacial de los asentamientos informales: Caso Monte Sinahí. <https://uees.edu.ec/descargas/libros/2022/atlas-estudio-espacial-de-los-asentamientos-informales.pdf>
- Interagua S.A. (2023). Ajuste y Revisión del Plan Maestro de los Servicios de Agua Potable, Alcantarillado Sanitario y Drenaje Pluvial de Guayaquil: Vol. Tomo I. Interagua S.A. [https://www.interagua.com.ec/sites/default/files/2023-03/tomo\\_i\\_vf\\_0.pdf](https://www.interagua.com.ec/sites/default/files/2023-03/tomo_i_vf_0.pdf)
- Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Bentley Institute Press.
- Lansey, K. E., & Awumah, K. (1994). *Calibration of pipe roughness coefficients*. *Journal of Hydraulic Engineering*, 120(4), 486–504. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1994\)120:4\(486\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1994)120:4(486))
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/water-research/epanet>

# Anexos

## 1. Carta de entrega de información por parte del Ing. Miguel Carvajal

Guayaquil 23 de Mayo del 2023

Ingeniera  
Luisa Barragán  
Estudiante de Maestría  
Universidad Politécnica Salesiana

De mi consideración:

Por medio de la presente me dirijo a usted para indicarle que la información tomada en campo (presión y caudal) para el Estudio de caso del Sector Pastor Vera será entregada el 15 de Junio del presente año, para que sea usada únicamente para su Tesis de Maestría, con la finalidad de obtener su título de Magister.

Atentamente,



---

Ing. Miguel Carvajal Campoverde  
Jefe de Departamento  
ANC - Territorios Zona Norte  
VRP - Acueductos Guayaquil  
INTERAGUA