

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA



**“SIMULACIÓN DEL DECAIMIENTO DE CLORO RESIDUAL UTILIZANDO
WATERGEMS Y COMPARACIÓN CON LA MEDICIÓN DIRECTA EN LA RED DE
DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DEL CASERIO
PARAPUQUIO, PROVINCIA DE CELENDÍN, CAJAMARCA, 2023”**

TESIS PARA OPTAR:

El Título Profesional de Ingeniero Sanitario

TESISTA:

Gonzales Salazar Keyko Sulamita

ASESOR:

Dr. Agustín Emerson Medina Chávez

CELENDÍN - PERÚ

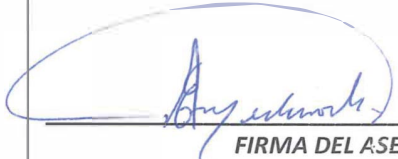
2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. **Investigador:** Keyko Sulamita Gonzales Salazar
DNI: 75968066
Escuela Profesional: Escuela Académico Profesional de Ingeniería Sanitaria
2. **Asesor:** Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez
Facultad: Ingeniería
3. **Grado académico o título profesional**
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad
☐ Maestro ☐ Doctor
4. **Tipo de Investigación:**
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional
☐ Trabajo académico
5. **Título de Trabajo de Investigación:**
"SIMULACIÓN DEL DECAIMIENTO DE CLORO RESIDUAL UTILIZANDO WATERGEMS Y
COMPARACIÓN CON LA MEDICIÓN DIRECTA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE
AGUA POTABLE DEL CASERIO PARAPUQUIO, PROVINCIA DE CELENDÍN, CAJAMARCA, 2023"
6. **Fecha de evaluación:** 16 de diciembre 2024
7. **Software antiplagio:** ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 11%
9. **Código Documento:** oid: 3117:416587082
10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 16 de diciembre 2024

 FIRMA DEL ASESOR Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez DNI: 27040564	 FIRMA DIGITAL Firmado digitalmente por: BAZAN DIAZ Laura Sofia FAU 20148258601 soft Motivo: En señal de conformidad Fecha: 16/12/2024 15:43:52-0500 UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI
---	---



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : "SIMULACIÓN DEL DECAIMIENTO DEL CLORO RESIDUAL UTILIZANDO WATERGEMS Y COMPARACIÓN CON LA MEDICIÓN DIRECTA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DEL CASERÍO PARAPUQUIO, PROVINCIA DE CELENDÍN, CAJAMARCA, 2023."

ASESOR : Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0102-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 31 de enero de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **seis días del mes de febrero de 2025**, siendo las once horas (11:00 a.m.) en la Sala de Audiovisuales (Ambiente 1A - Segundo Piso), de la facultad de Ingeniería, se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Vocal : Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz.
Secretario : Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada "SIMULACIÓN DEL DECAIMIENTO DEL CLORO RESIDUAL UTILIZANDO WATERGEMS Y COMPARACIÓN CON LA MEDICIÓN DIRECTA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DEL CASERÍO PARAPUQUIO, PROVINCIA DE CELENDÍN, CAJAMARCA, 2023", presentado por la Bachiller en Ingeniería Sanitaria KEYKO SULAMITA GONZALES SALAZAR, asesorada por el Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron a la sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y la evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA :07..... PTS.

EVALUACIÓN PÚBLICA :09..... PTS.

EVALUACIÓN FINAL :16..... PTS

.....D.I.E.C.I.S.E.I.S..... (En letras)

En consecuencia, se la declara APROBADA con el calificativo de D.I.E.C.I.S.E.I.S. (16)... acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 13:00 horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. José Francisco Huamán Vidaurre.
Presidente

Dr. Ing. Gaspar Virilo Méndez Cruz.
Vocal

Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez.
Secretario

Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez.
Asesor

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por la sabiduría, la voluntad y la fuerza que me ha dado para cumplir este objetivo. A mis padres y hermanos; a mi esposo e hijo, su confianza en mí, su amor y sus palabras me alentaron para cumplir este sueño. A la universidad Nacional de Cajamarca y docentes de la escuela académico profesional de ingeniería sanitaria que contribuyeron en mi formación profesional en especial a mi asesor Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez, por su paciencia y disposición para la culminación de este trabajo. Finalmente, al comité de calidad y jurado, por su tiempo y contribuciones para mejorar la calidad de esta tesis.

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios que me dio la fuerza para no desistir a lo largo de este camino.

A mi hijo Thiagito y a mi esposo; que han sido la motivación más grande y el pilar
fundamental en este proceso.

A mis padres Damian y Justa, mi más sincero agradecimiento por su amor, su apoyo
incondicional y sacrificios que hicieron, para alcanzar mis sueños.

A mis hermanos, por creer mí y alentar cada uno de mis logros.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPITULO I.- INTRODUCCION	1
1.1 Planteamiento del Problema.....	2
1.1.1 Contextualización.....	2
1.1.2 Descripción del problema:	3
1.2 Formulación del Problema.	4
1.3 Justificación de la Investigación.....	4
1.3.1 Justificación Científica	4
1.3.2 Justificación Técnica Práctica.....	5
1.3.3 Justificación Institucional y personal	5
1.4 Delimitación de la Investigación	6
1.5 Limitaciones	6
1.6 Objetivo de la Investigación.....	7
1.6.1 General:.....	7
1.6.2 Específico.....	7
1.7 Hipótesis General.....	7
CAPITULO II.- MARCO TEORICO	8
2.1 Antecedentes Teóricos	8
2.1.1 Antecedentes internacionales	8
2.1.2 Antecedentes nacionales	9
2.2 Bases Teóricas	10
2.2.1 Sistema de abastecimiento en el ámbito rural.....	10
2.2.2 Desinfección de agua para consumo humano.....	10
2.2.3 Reglamento de la calidad del agua para consumo humano en el Perú.....	10
2.2.4 Desinfección y cloración	10
2.2.5 Dosificación de cloro.....	11
2.2.6 Subproductos de la desinfección por cloración (SPD).....	12
2.2.7 Medición de cloro residual libre a través del método DPD.....	13
2.2.8 Zonas críticas de concentraciones de cloro.....	13
2.2.9 Efectos del PH del agua en la desinfección con cloro.....	13
2.2.10 Influencia de la dureza, el manganeso y el hierro en la eficacia de la cloración....	14
2.2.11 Elaboración de un modelo hidráulico para sistema de agua potable	15

2.2.11.1	Modelación hidráulica de sistemas de agua potable	15
2.2.11.2	WaterGEMS como herramienta para modelamiento	16
2.2.11.3	Componentes de diseño en WaterGEMS	16
2.2.11.4	Construcción y calibración de un modelo hidráulico en WaterGEMS	17
2.2.11.5	Importancia de los patrones de consumo para modelos hidráulicos	18
2.2.12	Elaboración de un modelo de decaimiento de cloro para sistema de agua potable	18
2.2.12.1	Modelo de decaimiento de cloro	18
2.2.12.2	WaterGEMS como herramienta para modelar el decaimiento del cloro.....	19
2.2.12.3	Decaimiento de cloro en las redes de distribución de agua potable.....	20
2.2.12.4	Donde medir el cloro en una red de distribución.....	21
2.2.12.5	Principio de la mezcla de solutos en los nodos de la red de distribución.....	21
2.2.12.6	Coeficiente de reacción del cloro con el agua, kb.....	22
2.2.12.7	Coeficiente de reacción del cloro con la pared de la tubería, kw	22
2.2.12.8	Datos para determinar los coeficientes de decaimiento de cloro en WaterGEMS	23
2.2.12.9	Muestreo distribuido para coeficientes de decaimiento de cloro.....	23
2.2.12.10	Influencia temporal de los coeficientes de decaimiento de cloro.....	24
2.2.13	Eficiencia estadística del modelo de decaimiento de cloro: Índice de nash-sutcliffe y Error cuadrático medio normalizado (RSR).....	24
2.2.14	Concentración optima inicial de cloro en el reservorio	24
2.3	Definición de Términos Básicos.....	25
CAPITULO III.- MATERIALES Y MÉTODOS		26
3.1	Ubicación Geográfica	26
3.2	Aspectos Socioeconómicos y Características Físicas	26
3.2.1	Accesibilidad.....	26
3.2.2	Demografía	27
3.2.3	Geología.....	27
3.2.4	Clima	28
3.2.5	Hidrología	28
3.2.6	Actividades económicas	28
3.2.7	Celebraciones y festividades.....	30
3.2.8	Acceso a servicios básicos	30
3.3	Materiales y Equipos.....	31
3.4	Metodología del trabajo	32

3.4.1	Tipo, nivel y diseño de investigación.....	32
3.4.2	Población de estudio.....	32
3.4.3	Muestra	32
3.4.4	Unidad de análisis	33
3.5	Fase inicial en gabinete.....	33
3.5.1	Revisión Bibliográfica.....	33
3.6	Fase de recolección de datos en campo	33
3.6.1	Recopilación de información de la red de distribución	33
3.6.2	Análisis de la topología de la red y levantamiento topográfico de la zona de estudio.	35
3.6.3	Procesamiento de datos y elaboración del plano red de distribución.....	36
3.7	Elaboración del modelo hidráulico.....	37
3.7.1	Metodología para el modelado de la red de distribución de agua.....	37
3.7.2	Selección de puntos para medición de presiones.....	38
3.7.3	Medición de caudales de consumo (Patterns).....	39
3.7.4	Configuración del modelo hidráulico.....	40
3.7.5	Asignación de parámetros hidráulicos a la red de distribución	41
3.7.6	Asignación de patrones de demanda	42
3.7.7	Calibración del modelo hidráulico	43
3.7.7.1	Configuración de presiones y caudales para calibración del modelo.....	43
3.7.7.2	Estimación del nuevo coeficiente de rugosidad.....	45
3.7.7.3	Variación de patrones de consumo.....	46
3.7.7.4	Evaluación de la eficiencia del modelo	46
3.8	Elaboración del modelo de decaimiento de cloro.....	47
3.8.1	Monitoreo del Ph del agua.....	47
3.8.2	Determinación de dureza, manganeso y hierro.....	48
3.8.2.1	Determinación de la dureza del agua	48
3.8.2.2	Determinación de la concentración de manganeso en el agua.....	49
3.8.2.3	Determinación de la concentración de concentración de hierro en el agua.....	51
3.8.3	Selección de puntos de monitoreo de cloro	52
3.8.4	Monitoreo de cloro residual	53
3.8.5	Monitoreo de cloro residual en la red de distribución.....	53
3.8.6	Determinación de zonas críticas.....	55
3.8.7	Determinación del orden de la reacción	55

3.8.8	Determinación de kb.....	55
3.8.9	Simulación inicial del modelo de decaimiento de cloro.....	56
3.8.10	Etapas de calibración.....	56
3.8.11	Validación del modelo de decaimiento de cloro	57
3.8.12	Análisis del grado de similitud del modelo de decaimiento de cloro	57
3.8.13	Método de análisis de datos.....	58
CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS		60
4.1	Modelo hidráulico de la red de distribución de agua.....	60
4.1.1	Descripción de la red de distribución	60
4.1.2	Modelo hidráulico obtenido en WaterGEMS	60
4.1.3	Mediciones de presiones y caudales.....	61
4.1.4	Simulación inicial.....	62
4.1.5	Comparación inicial de presiones medidas y simuladas	64
4.1.6	Calibración del modelo hidráulico	65
4.1.6.1	Estimación del nuevo coeficiente de rugosidad para calibración del modelo	65
4.1.6.2	Variación de patrones de consumo para calibración del modelo.....	67
4.1.6.3	Eficiencia del modelo hidráulico	69
4.2	Evaluación del Modelo de Decaimiento de Cloro.....	70
4.2.1	Monitoreo del PH del agua	70
4.2.2	Resultados de dureza, manganeso y hierro.....	71
4.2.3	Monitoreo de Cloro residual	71
4.2.4	Identificación de puntos críticos	74
4.2.5	Determinación del coeficiente de reacción del cloro con la masa del agua	78
4.2.6	Estimación del coeficiente de reacción en la pared de la tubería “Kw”.....	80
4.2.7	Simulación Inicial	81
4.2.8	Calibración del modelo de decaimiento de cloro residual.....	82
4.2.9	Validación del modelo de decaimiento de cloro residual.....	84
4.2.10	Análisis de sensibilidad del modelo.....	94
4.2.11	Determinación de concentración de cloro.....	95
4.3	Validación de las hipótesis	98
4.3.1	Validación de hipótesis general	98
4.3.2	Validación de hipótesis específica 1	102
4.4	Discusión de resultados.....	104
4.4.1	Discusión de resultados de objetivo general.....	104

4.4.2	Discusión de resultados de objetivo específico 1.....	105
4.4.3	Discusión de resultados de objetivo específico 2.....	107
4.4.4	Discusión de resultados de objetivo específico 3.....	107
4.4.5	Discusión de resultados de objetivo específico 4.....	108
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		109
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		113
VI. ANEXOS		119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Puntos de monitoreo de presiones	39
Tabla 2	Valores sugeridos para medir el rendimiento de modelos hidráulicos	47
Tabla 3	Puntos de monitoreo de PH.....	47
Tabla 4	Puntos de monitoreo de cloro	52
Tabla 5	Características del análisis y pruebas paramétricas y no paramétricas.....	59
Tabla 6	Resumen de modelo hidráulico	60
Tabla 7	Registro de caudales de consumo	61
Tabla 8	Media de presiones registradas.....	62
Tabla 9	Patrones de consumo iniciales para modelo hidráulico	63
Tabla 10	Comparativa entre las presiones medidas y las presiones simuladas inicialmente ..	64
Tabla 11	Intervalo de variación horaria para patrones de consumo.....	67
Tabla 12	Patrones de consumo finales usados para el modelo calibrado	68
Tabla 13	Resultados de calibración de modelo hidráulico	69
Tabla 14	Índices de eficiencia de la calibración hidráulico.....	70
Tabla 15	Resultados de monitoreo de PH.....	70
Tabla 16	Resultados de dureza, hierro y manganeso	71
Tabla 17	Coefficientes de decaimiento de cloro libre (Kb) en puntos de muestreo.....	80
Tabla 18	Comparación inicial de cloro medido y simulado	81
Tabla 19	Valores comparativos de calibración	82
Tabla 20	Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 16.....	84
Tabla 21	Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 7.....	85
Tabla 22	Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 4.....	86
Tabla 23	Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 10.....	87
Tabla 24	Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 13.....	88
Tabla 25	Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 25.....	89
Tabla 26	Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 28.....	90
Tabla 27	Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 36.....	91
Tabla 28	Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 43.....	92
Tabla 29	Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 45.....	93
Tabla 30	Variación de la concentración del cloro en base al coeficiente Kb	94
Tabla 31	Variación de la concentración del cloro en base al coeficiente Kw	95
Tabla 32	Valores validados de cloro simulado y medio en el modelo de decaimiento de cloro.	

.....	99
Tabla 33 Prueba de normalidad para hipótesis general	100
Tabla 34 Resultados de prueba de correlación de Pearson para hipótesis General.....	101
Tabla 35 Valores para validación de hipótesis específica 2	102
Tabla 36 Prueba de normalidad para hipótesis específica 2	103
Tabla 37 Resultados de prueba de correlación de Pearson para hipótesis específica	103
Tabla 40 Presiones horarias registradas durante los 7 días de monitoreo de presiones (m.c.a.)	131
Tabla 41 Valores promedio de cloro residual medidos en campo a partir de la activación del sistema de cloración	133

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Curva de demanda de cloro.....	11
Figura 2	Nodo de red de distribución con tres entradas y salidas donde ocurre una mezcla de soluto	21
Figura 3	Vista satelital de la zona de estudio.....	26
Figura 4	Vista satelital de la ruta de acceso a la zona de estudio.....	27
Figura 5	Cultivo de maíz y chochos en la zona de estudio.....	29
Figura 6	Animales Obvinos y equinos	29
Figura 7	Animales bovinos	30
Figura 8	Recorrido de la red de distribución	34
Figura 9	Recolección de información con operario de la Jass Parapuquio	34
Figura 10	Levantamiento topográfico vivienda 32	35
Figura 11	Procesamiento de datos en software Civil 3D.....	36
Figura 12	Datos de entrada para una Simulación en periodo extendido	38
Figura 13	Datos de entrada para modelo hidráulico de caudales y presiones simultaneas	38
Figura 14	Configuración de unidades de trabajo	40
Figura 15	Importación de curvas de nivel con la herramienta TRex	41
Figura 16	Configuración de diámetros y coeficientes de rugosidad inicial.....	42
Figura 17	Asignación de patrones de demanda (Pattern)	43
Figura 18	Creación de nuevo estudio de calibración.....	44
Figura 19	Creación de data para calibración basado en presiones	44
Figura 20	Asignación de presiones horarias medidas en campo para la calibración del modelo	45
Figura 21	Metodología para ensayo de manganeso en espectrofotómetro.....	50
Figura 22	Metodología para ensayo de hierro en espectrofotómetro	51
Figura 23	Monitoreo de cloro en el reservorio de Parapuquio	54
Figura 24	Monitoreo de cloro en red de distribución vivienda 37	54
Figura 25	Grafica de patrones de consumo.....	63
Figura 26	Asignación de nuevos coeficientes estimados de rugosidad de Hazen-Williams al modelo hidráulico.....	66
Figura 27	Grafico de resultados de monitoreo de cloro residual en las viviendas ubicadas extremos de la red.....	72
Figura 28	Grafico de resultados de monitoreo de cloro residual en los nodos extremos de la	

red.....	73
Figura 29 Monitoreo de cloro en viviendas 9,14,8,15,26 en zona intermedia de la red	73
Figura 30 Monitoreo de cloro en viviendas 31,33,35,36,38 y 41 en zona intermedia de la red	74
Figura 31 Análisis del punto crítico en la vivienda N° 19.....	75
Figura 32 Concentraciones de cloro en vivienda 1, 46 y 44.....	77
Figura 33 Orden de reacción 1 del nodo 1,3 y 4	79
Figura 34 Valores de Kb y Kw establecidos en WaterGEMS	83
Figura 35 Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 16	84
Figura 36 Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 7	85
Figura 37 Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 4.....	86
Figura 38 Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 10	87
Figura 39 Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 13	88
Figura 40 Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 25	89
Figura 41 Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 28.....	90
Figura 42 Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 36	91
Figura 43 Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 43	92
Figura 44 Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 45	93
Figura 45 Análisis de sensibilidad del modelo	95
Figura 46 Perfil de concentración de cloro simulado a las 7:00 am.....	96
Figura 47 Perfil de concentración de cloro simulado a las 9:00 am.....	96
Figura 48 Perfil de concentración de cloro simulado 3:00 pm	97
Figura 49 Perfil de concentración de cloro simulado 6:00 pm	97
Figura 50 Obtención de equipo para el levantamiento topográfico	120

Figura 51 Levantamiento de punto de entrega de agua en Escuela Primaria (C-33 en plano)	120
Figura 52 Medidor instalado en línea de aducción.....	120
Figura 53 Toma de muestras en vivienda 37	120
Figura 54 Monitoreo de cloro en el nodo 8.....	121
Figura 55 Manómetros para monitoreo de presiones	121
Figura 56 Capacitación para monitoreo de presiones.....	121
Figura 57 Capacitación e instalación de manómetro en vivienda C1	121
Figura 58 Monitoreo de cloro vivienda 8	122
Figura 59 Verificación de válvulas de control	122
Figura 60 Lectura de presiones	122
Figura 61 Vista panorámica de parapuquio	122
Figura 62 Resultados de monitoreo de PH en reservorio	123
Figura 63 Monitoreo de PH en la vivienda 17	123
Figura 64 Kit multiparámetros laboratorio UNC-Celendín.....	123
Figura 65 Comparador visual de PH	123
Figura 66 Visita a captación tres melones en compañía de responsables de ATM	124
Figura 67 Muestreo para determinación de parámetros de dureza, hierro y manganeso	124

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo elaborar un modelo de decaimiento de cloro, en WaterGEMS que sirva como herramienta para analizar y optimizar el proceso de cloración, a partir de concentraciones de cloro simuladas y medidas en campo de la red de distribución del sistema de agua potable del caserío Parapuquio, provincia de Celendín, Cajamarca. Se elaboró un modelo hidráulico calibrado mediante patrones de consumo horario y mediciones de presión en ocho nodos representativos, a su vez se monitoreo el cloro residual en el reservorio y en 18 viviendas durante los meses de junio a septiembre del año 2023. Los resultados del modelo mostraron una precisión superior al 80%, se encontró la existencia de sobrepresiones de hasta 70 m.c.a y unas concentraciones de cloro residual de 0.45 mg/l en el reservorio, 0.2 mg/l en viviendas intermedias y 0.05 mg/l en las viviendas más alejadas y puntos críticos. Al utilizar el modelo se determinó que al aumentar la concentración de cloro en el reservorio a 1.8 mg/l, garantiza una concentración superior a 0.5 mg/l en el 95% de los nodos de la red de distribución de agua, los resultados de esta investigación confirman la efectividad de la simulación del decaimiento de cloro residual y la comprensión del comportamiento de la red de distribución de agua, destacando la utilidad del modelo como herramienta de evaluación y ajuste en la gestión de sistemas de agua potable en este tipo de contexto.

Palabras claves: decaimiento de cloro, modelo hidráulico, coeficientes de decaimiento, cloro residual.

ABSTRACT

The study aimed to develop a chlorine decay model in WaterGEMS as a tool to analyze and optimize the chlorination process based on simulated chlorine concentrations and field measurements in the distribution network of the Parapuquio hamlet's drinking water system in Celendín, Cajamarca province. A calibrated hydraulic model was developed using patterns of hourly consumption and pressure measurements at eight representative nodes. The residual chlorine in the reservoir and 18 households was monitored from June to September 2023. The model results showed an accuracy of over 80%, identifying overpressures up to 70 m.c.a and residual chlorine concentrations of 0.45 mg/l in the reservoir, 0.2 mg/l in intermediate households, and 0.05 mg/l in the farthest households and critical points. By increasing the chlorine concentration in the reservoir to 1.8 mg/l, the model determined that a concentration above 0.5 mg/l could be ensured in 95% of the distribution network nodes. The research results confirm the effectiveness of simulating residual chlorine decay and understanding the behavior of the water distribution network, emphasizing the utility of the model as an assessment and adjustment tool in managing drinking water systems in this context

Key words: chlorine decay, hydraulic model, decay coefficients, residual chlorine.

CAPITULO I.- INTRODUCCION

En el Perú la deficiente calidad del agua es un problema constante, pues en las zonas más alejadas del país, no cuentan con una calidad adecuada de agua, y la que tampoco está bajo vigilancia permanente sobre posibles problemas relacionados con la calidad de agua, por lo que es común que se evidencien enfermedades de origen hídrico en las zonas rurales y más distantes del país (OMS, 2006). Las enfermedades más comunes relacionadas con la calidad del agua son, gastroenteritis viral, amebiasis, hepatitis, salmonelosis, cólera, shigelosis, entre otras.

Para el año 2023 en el Perú, se han informado sobre un total de 378 628 incidentes de enfermedades diarreicas agudas (EDAs), el 35,17% de estos casos fueron reportados en niños menores de 5 años y un 64,83% en individuos mayores a 5 años. Asimismo, se tiene reportes de 2 057 hospitalizaciones por EDAs, siendo mayor en el grupo de menores de 5 años. Además, se han notificado 14 defunciones, de las cuales 10 muertes se dieron en el grupo de menores de 5 años y 04 en el grupo de 5 años a más (MINSA, 2023).

En relación a esto, el Ministerio de Salud señala que antes de llevar a cabo la distribución de agua a la población, el proveedor responsable de suministrar el servicio debe llevar a cabo una desinfección para eliminar todos los microorganismos, empleando un desinfectante efectivo. De esta manera, si se utiliza cloro o solución clorada como desinfectante, las muestras recolectadas en cualquier lugar de la red de distribución no deben ser menor a 0.5 mg/l (DIGESA, 2010).

En el caso del caserío Parapuquio por ser una zona rural, la institución encargada de administrar y operar el sistema de agua potable y saneamiento es la JASS (Juntas Administradoras de servicios de saneamiento), la misma que está constituida y formalizada en la Municipalidad provincial de Celendín y es la que brinda asistencia técnica de operación, mantenimiento y gestión del servicio de agua y una de sus funciones principales es asegurar que la JASS, cuente con un servicio de calidad y desinfección adecuada mediante cloro;

asimismo garantizar la inocuidad del agua potable que consumen en dicha comunidad.

1.1 Planteamiento del Problema.

1.1.1 Contextualización

En el Perú, la calidad del agua deficiente, la falta de tratamiento de agua, la mala operación y mantenimiento de los sistemas de agua potable ocasiona cada vez más muertes y enfermedades. En la zona rural del país, la calidad del agua en los sistemas de distribución de agua potable rural, enfrentan un desafío importante el cual es; asegurar la potabilidad del agua a lo largo de toda la red, pues solamente el 13.5% de agua es apta para el consumo humano, el 20% no es sometida a ningún proceso de purificación y el 66.5 % simplemente no es tratada en ninguna medida (Enríquez Hurtado, 2022).

La calidad del agua para consumo humano está directamente relacionada con la salud de las personas, por lo que brindar un proceso de desinfección es indispensable para garantizar su potabilización. El uso de un desinfectante como el cloro es esencial para prevenir la contaminación por microorganismos (bacterias y virus) presentes en el agua; sin embargo, después de ser añadido como medio antiséptico su concentración tiende a disminuir debido a factores químicos, físicos y biológicos que pueden estar presentes en los sistemas de distribución de agua. En las zonas rurales garantizar una cloración y monitoreo adecuado de manera constante es un desafío significativo, debido a la falta de personal capacitado, el difícil acceso a las comunidades y la dispersión geográfica de las viviendas. Estas limitaciones aumentan la complejidad del control de calidad del agua y el costo de la gestión técnica y operativa de los sistemas de agua. Además, la gran cantidad de Juntas Administradoras de Servicios de Saneamiento (JASS) en el país dificulta una supervisión constante y equitativa, dejando a muchas comunidades con monitoreos escasos y limitados, poniendo en riesgo la salud de la población en las comunidades (Unidad de epidemiología y salud ambiental, 2022).

En la provincia de Celendín existe un total de 38 JASS debidamente formalizadas, cada una cuenta con un operario designado para la activación del sistema de cloración, esta cantidad es un desafío para el Área Técnica de Saneamiento. El caserío de Parapuquio, cuenta con un sistema de distribución de agua alimentado por un reservorio de 18 m³, sometido a un proceso de cloración por goteo mediante el compuesto de hipoclorito de calcio granular al 70% utilizando 1065 gramos de este agente oxidante disuelto en 18 litros de agua y es agregado en el tanque de polietileno de 600 litros para la dosificación. El operario de la JASS realiza la dosificación cada 7 días y es supervisada por el Área Técnica de Saneamiento (ATM). El monitoreo se limita solamente a tres puntos de la red (cercano al reservorio, intermedio y el más lejano), dejando posibles puntos críticos sin control. Además, la baja dosificación, está condicionada por el aspecto social, según algunos pobladores se percibe el olor y sabor del cloro, esto dificulta alcanzar el mínimo de 0.5 mg/l establecido por el DS N° 031-2010-SA. El agua es exclusivamente para consumo humano, prohibiéndose su uso en riego con multas en caso de incumplimiento, lo que plantea importantes desafíos para garantizar su calidad y desinfección continua.

1.1.2 Descripción del problema:

Según la DIRESA – Cajamarca, a través del MINSA; en la localidad de Celendín en el reporte del boletín informativo sobre EDAs, casos notificados de enfermedades diarreicas agudas, se tiene datos de incidencia de enfermedades diarreicas acuosas con un promedio de nueve casos por mes en la zona rural de la localidad, resaltando 29,332 casos entre EDAs agudas y persistentes a nivel local en el periodo de un año; de estos datos se arroja que cada 9 casos mensuales, al menos uno de los casos de enfermedades gastrointestinales se producen por contacto con agua no tratada o desinfectada para consumo humano. En el caserío Parapuquio durante el año 2023 se registraron un total de 24 casos de EDAs, pudiendo ser causados por consumo de agua sin desinfección (MINSA, 2023).

En el sistema de agua potable de Parapuquio se ha identificado que las concentraciones de cloro residual están por debajo del límite normativo de 0.5 mg/L, incluso por debajo de 0.1 mg/l, especialmente en puntos distantes de la red, lo que aumenta el riesgo de contaminación bacteriológica; el aspecto social se viene trabajando por exigencia de la DIRESA Cajamarca, ante la falta de reportes de concentraciones adecuadas de cloro, lo que conllevaría a un cambio gradual, mas no inmediato (DIRESA, 2024), este aspecto condiciona la gestión del sistema de distribución de agua ya que todavía no se puede realizar un aumento en la dosificación del cloro, no existe un monitoreo generalizado, ni se han identificado y reportado zonas críticas.

Bajo este contexto la formulación del problema de esta investigación se centró en desarrollar un modelo de decaimiento, que sirva como herramienta para mejorar el aspecto técnico de la dosificación de cloro y simular las concentraciones en las viviendas de la red; ante la carencia del personal adecuado que fiscalice las concentraciones mínimas de cloro residual en la red de distribución de agua mas no que solucione el aspecto social de acuerdo al contexto de la comunidad. Por lo tanto, se plantea la siguiente interrogante:

1.2 Formulación del Problema.

¿En qué porcentaje un modelo de decaimiento de cloro elaborado en WaterGEMS, basado en concentraciones de cloro simuladas y medidas en campo, puede ser empleado como herramienta para analizar y optimizar el proceso de cloración en la red de distribución del sistema de agua potable del caserío Parapuquio, provincia de Celendín, Cajamarca?

1.3 Justificación de la Investigación.

1.3.1 Justificación Científica

La calidad del agua destinada al consumo humano es fundamental para prevenir enfermedades en la población. El estudio del decaimiento del cloro en la red de distribución de agua del caserío Parapuquio es crucial, ya que un agua con niveles de cloro por debajo de lo establecido no es apta para consumo humano. Esta investigación se centra desarrollar un

modelo de decaimiento de cloro que sirva como herramienta para evaluar y ajustar el proceso de dosificación de cloro, a partir de concentraciones de cloro simuladas y medidas en campo de la red de distribución del sistema de agua potable del caserío Parapuquio, provincia de Celendín, para garantizar que el cloro residual se mantenga dentro de los niveles adecuados, asegurando así la potabilidad del agua y mejorando la gestión de la red de distribución. La investigación aportará al conocimiento científico al proporcionar un modelo que simule de manera precisa la desinfección por cloro identificando puntos críticos y sistematizando el monitoreo del mismo, ayudando a mejorar la calidad del agua distribuida y reduciendo el riesgo de enfermedades.

1.3.2 Justificación Técnica Práctica

El monitoreo y la simulación del cloro residual en las redes de distribución de agua son fundamentales para garantizar la calidad del agua consumida por la población. Según las normativas vigentes del DS. N° 031-2010-SA, es esencial que el cloro residual se mantenga entre 0.5 ppm y 1 ppm para asegurar la desinfección efectiva del agua. La propuesta de un modelo hidráulico en WaterGEMS como herramienta, permite analizar y optimizar la cloración en Parapuquio, identificando puntos críticos y garantizando que el nivel de cloro se mantenga adecuado a lo largo de toda la red de distribución, incluso en escenarios de decaimiento durante todo el día.

1.3.3 Justificación Institucional y personal

La Universidad Nacional de Cajamarca, como institución de referencia en la región, debe de abordar problemáticas actuales en el sector del agua potable. Este estudio sobre el decaimiento de cloro no solo establecerá un precedente en la investigación sobre la calidad del agua en las zonas rurales de la provincia de Celendín, sino que también marcará un hito en el uso de modelos computacionales para optimizar procesos de desinfección y monitoreos. Como egresada de esta universidad y oriunda de la región, considero crucial asegurar el acceso a un agua segura, supervisando y mejorando los procesos de cloración, cumpliendo con las

normativas vigentes y protegiendo la salud pública. Este estudio beneficiará a la comunidad y fortalecerá la capacidad de la aplicación de tecnologías avanzadas para la gestión del agua.

1.4 Delimitación de la Investigación

La investigación se llevó a cabo en la Red de Distribución de Agua Potable del caserío de Parapuquio de la Provincia de Celendín – Departamento de Cajamarca; entre los meses de junio hasta septiembre del año 2023, donde se estudió el decaimiento de cloro a partir de la elaboración de un modelo hidráulico que simuló y comparo las variaciones del cloro medidas a lo largo de toda la red, este modelo ajusta los valores a partir de caudales y presiones medidas en campo de forma simultánea. Las mediciones del cloro residual y presiones se realizaron dos veces por semana, tres veces al día, en el reservorio y en 18 puntos de muestreo en toda la red de distribución.

1.5 Limitaciones

Las principales limitaciones durante el desarrollo de la investigación fueron:

- No tener acceso a los registros de monitoreo de cloro de años anteriores.
- No tener acceso directo a las tuberías para realizar pruebas y determinar la rugosidad de las tuberías del sistema, además no se contó con los permisos para colocar micromedidores y determinar los consumos en cada vivienda; por lo que se optó en colocar un micromedidor en la salida del reservorio y determinar patrones de consumo.
- No se realizó estudio de calidad de agua, debido a que la investigación se centra en determinar una simulación del decaimiento de cloro y considera la calidad del agua con la que se encuentra el sistema de manera in situ.
- Se tomo en cuenta el análisis solo de 4 parámetros (PH, dureza, presencia de hierro y manganeso) fundamentales que pueden influir en el proceso de desinfección.
- Este modelo solo se presenta como propuesta metodológica para desarrollar una herramienta que permita analizar, monitorear y optimizar el proceso de cloración, para

el periodo en estudio puesto que está sujeto a cambios permanentes y a las particularidades de cada lugar en el que se quiera replicar.

1.6 Objetivo de la Investigación

1.6.1 General

Elaborar un modelo de decaimiento de cloro, en WaterGEMS que sirva como herramienta para analizar y optimizar el proceso de cloración, a partir de concentraciones de cloro simuladas y medidas en campo de la red de distribución del sistema de agua potable del caserío Parapuquio, provincia de Celendín, Cajamarca, 2023.

1.6.2 Especifico

- Elaborar un modelo hidráulico en WaterGEMS de la red de distribución de agua potable del caserío de Parapuquio en base a la medición simultanea de presiones y caudales de consumo.
- Monitorear la concentración de cloro residual en la red de distribución de agua potable del caserío de Parapuquio durante los meses de junio a setiembre del 2023.
- Determinar las zonas críticas donde exista un mayor decaimiento de cloro residual y describir sus posibles causas.
- Emplear el modelo de decaimiento elaborado en WaterGEMS para estimar concentraciones de cloro en el reservorio, que permitan una adecuada desinfección en los puntos desfavorables de la red de distribución.

1.7 Hipótesis General

El modelo de decaimiento de cloro elaborado en WaterGEMS, basado en cloro simulado y medido en campo, presentará una precisión superior al 80% al ser utilizado como herramienta en el análisis y optimización del proceso de cloración, en la red de distribución del sistema de agua potable del caserío Parapuquio, provincia de Celendín, Cajamarca.

CAPITULO II.- MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes Teóricos

2.1.1 Antecedentes internacionales

García (2019), desarrolló un modelo hidráulico y de calidad de agua utilizando EPANET para analizar el decaimiento del cloro en dicha red. Determinó las constantes de reacción del cloro, $K_b = 3.71 \text{ d}^{-1}$ y $K_w = 0.056 \text{ m.d}^{-1}$. Los resultados mostraron una alta precisión entre las concentraciones simuladas y las mediciones reales superiores al 90 % en la mayoría de los nodos. Se concluyó que una concentración de 1.12 mg/l en la PTAP garantiza un mínimo de 0.56 mg/l en los puntos más críticos, destacando el modelo como una herramienta valiosa para optimizar los procesos de desinfección y la gestión de la calidad del agua.

Sánchez (2020), propuso evaluar el comportamiento del cloro libre en la red de distribución de agua mediante modelación computacional utilizando el software EPANET, calibrado dichos modelos mediante curvas genéricas de consumo relacionadas a la variación de presiones y concentraciones de cloro residual, los resultados revelaron la utilidad de estos modelos al simular el comportamiento de la red con errores inferiores al 2%, además los valores calculados de $K_b = 1 \text{ d}^{-1}$ y $K_w = -1.5 \text{ m.d}^{-1}$ siendo indicativo de una gran variación de cloro que va desde 1 mg/l hasta 0.02 mg/l y la existencia de presiones que superan los 60 m.c.a ocasionando desperfectos en la red.

Priori y Acurio (2021), desarrollaron un modelo hidráulico y de calidad de agua utilizando el software EPANET. Establecieron 15 puntos donde realizaron monitoreos durante seis meses, obteniendo una similitud del 97% entre el cloro simulado y el medido en campo. Obtuvieron valores de $K_b = -3.52 \text{ d}^{-1}$ y $K_w = -0.066 \text{ d}^{-1}$, y su influencia sobre las concentraciones de cloro residual. Además, determinaron que una concentración inicial de 1.5 mg/l que es ideal para mantener una concentración mínima de 0.5 mg/l en el 88.5% de los nodos del sistema.

2.1.2 Antecedentes nacionales

Tuero y Huamani (2021) indagaron sobre la influencia de los factores de decaimiento en el comportamiento simulado del cloro residual en la red de distribución de agua, el diseño de su investigación es transversal descriptivo-correlacional. Se trabajó con una población de 147 viviendas, seleccionando 54 como muestra. Con una concentración inicial de cloro de 1.8 mg/l, se obtuvo valores de $K_b = -0.8/\text{día}$ y $K_w = -0.79 \text{ m/día}$, los resultados indicaron que los valores de cloro residual cumplían con la normativa, demostrando que, con una adecuada dosificación en el reservorio, y una correlación del 98,9% entre valores medidos y simulados, Se concluyó que el coeficiente de decaimiento ($K_b = 96.4 \%$ y $K_w = 95 \%$) donde K_b ejerce una gran influencia en el valor final del cloro residual.

Córdova (2023), se planteó el objetivo para el desarrollo de un modelo hidráulico utilizando el software WaterCAD, para evaluar la calidad microbiológica del agua en el centro poblado de Marona, San Martín. Se escogieron 20 puntos de monitoreo en viviendas para medir las concentraciones de cloro de un total de 259 conexiones, se estimaron consumos domésticos y no domésticos para prever una simulación en periodo extendido de 24 h. Los resultados mostraron que las lecturas de cloro residual libre en campo se aproximaron a las simuladas en el modelo hidráulico con un error porcentual inferior al 20% por lo que se muestra que los datos del modelo fueron óptimos. Los valores promedio de cloro oscilaron entre 0,48 mg/l en los extremos de la red y 1,14 mg/l en las zonas cercanas al reservorio.

Apumatay y Paitan (2021), se propusieron modelar y simular la concentración de cloro residual en la red de distribución de EMAPA-Huancavelica mediante el software WaterCAD. Se utilizó un muestreo no probabilístico en 157 nodos de la red de distribución de agua. Los resultados principales indican que la concentración de cloro residual varió de 0.33 mg/L a 1.21 mg/L en diferentes nodos, con una velocidad máxima de 0.66 m/s y presiones entre 10 m H₂O y 40 m H₂O. El modelamiento identificó alrededor de 21 puntos críticos. Se concluyó que la

simulación tuvo resultados positivos y una similitud muy alta entre las lecturas de cloro medidas y simuladas, ya que los parámetros de presión, velocidad y cloro residual cumplían con la normativa, lo que sugiere mejoras en la precisión del cloro residual en la red de distribución.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1 Sistema de abastecimiento en el ámbito rural

Es el conjunto de instalaciones que brindan acceso al agua potable a nivel domiciliario y cuentan con el debido tratamiento, almacenamiento y distribución del agua potable en cantidad y calidad establecida por las normas de diseño; donde cada una de las viviendas se abastece a través de una conexión domiciliaria (Cooperación Alemana, 2017).

2.2.2 Desinfección de agua para consumo humano

Esto implica matar los microorganismos patógenos presentes en el agua, que pueden causar enfermedades; este proceso es un paso vital para garantizar que el agua potable sea segura para el consumo humano. La desinfección debe utilizarse en todos los suministros de agua antes de ser entregados a los usuarios (Cooperación Alemana, 2017).

2.2.3 Reglamento de la calidad del agua para consumo humano en el Perú

En el Perú la norma vigente para supervisar la calidad del agua es el “Reglamento de Calidad del Agua para Consumo Humano”, a través del D.S. N° 031-2010-SA. Establece requisitos mínimos de calidad para el agua apta para el consumo humano, cuyo objetivo es garantizar la calidad del agua, identificar y prevenir riesgos para la salud, proteger la salud y el bienestar público. Esta norma deberá ser cumplida a nivel nacional cuando se trate del manejo, control, tratamiento, protección, monitoreo o análisis del agua para consumo humano, desde las fuentes hídricas hasta la alimentación (García, 2019).

2.2.4 Desinfección y cloración

El cloro, en su papel de desinfectante, es el componente más empleado en plantas de tratamiento a nivel global y sus concentraciones sugeridas en una red de distribución de agua

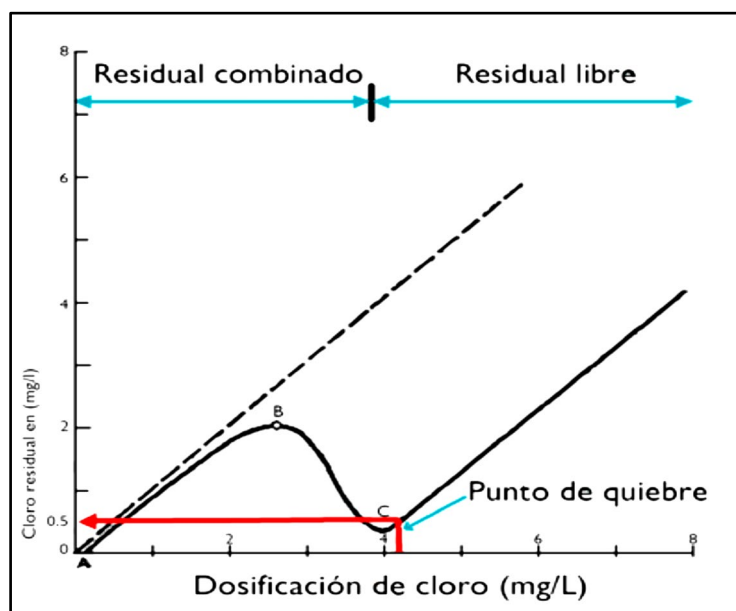
potable oscilan entre 0.2 y 0.5 mg/L. La desinfección mediante cloro en sus diferentes formas posee la capacidad de interactuar con diversos componentes presentes en el agua, tales como metales con características solubles, materia orgánica y microorganismos. (Bakar Radhi, 2016).

2.2.5 Dosificación de cloro

La cantidad de desinfectante depende del tipo de agua que se va a clorar y sus características deben ser conocidas antes de iniciar la ejecución del sistema de agua potable. La determinación precisa necesita de un laboratorio y personal experto; se aconseja establecer la cantidad de cloro al menos dos veces al año, dependiendo de las propiedades físico-químicas del agua que se va a desinfectar; por ejemplo, en temporadas de lluvias y periodos de estiaje (ausencia de precipitaciones). En Perú, la normativa establece la necesidad de al menos 0.50 mg/L de cloro residual libre en el agua destinada para consumo humano (Cooperación Alemana, 2017).

Figura 1

Curva de demanda de cloro



Fuente: CEPIS, (2004)

La Figura 1 muestra la reacción del cloro con el agua: el cloro residual disponible para

la desinfección es la combinación del cloro residual combinado, que tiene una capacidad de desinfección limitada dado que es el primero que se genera al interactuar con el agua, y el cloro residual libre posee la mayor capacidad desinfectante (HANNA, 2024).

Dosificación de cloro por goteo:

Este proceso utiliza un tanque de polietileno de 600 litros de agua, donde se agrega una solución madre con hipoclorito de calcio al 70% granulado, el mismo que es disuelto en 18 litros de agua, teniendo un periodo de reposo de 30 minutos, posteriormente esta solución es agregada directamente en el tanque de polietileno de 600 litros y se procede a abrir los accesorios de ingreso y salida de la solución de cloro hasta el reservorio a través del sistema dosificador de cloro de carga constante por goteo.

El peso o la cantidad de gramos que se utiliza para la dosificación de cloro se calcula según el volumen del tanque de solución y el caudal del sistema para finalmente regular la cantidad de gotas por minuto que ingresan al reservorio.

$$peso = \frac{v * c}{\% cl * 10} \quad (1)$$

Donde:

V: volumen (Qd*86400 s)

Qd: caudal que ingresa al reservorio en l/s

C: 1.5 mg/l como factor

% cloro: 70

2.2.6 Subproductos de la desinfección por cloración (SPD)

El proceso de cloración del agua, como método de desinfección química, puede generar subproductos que pueden comprometer la salud humana. La Organización Mundial de la Salud aconseja no disminuir la frecuencia en la desinfección y mantener una concentración residual de desinfectante apropiada en todo el sistema de la red de distribución de agua durante la supervisión de los subproductos; los peligros sanitarios vinculados a la contaminación

microbiana del agua son de mayor relevancia.

Si el agua contiene elementos y sustancias químicas como materia orgánica, bromatos, cloratos, sulfatos entre otros, pueden formarse subproductos peligrosos durante la desinfección, como son los compuestos organoclorados THM (trihalometanos) y los ácidos halo acéticos (OMS, 2006).

2.2.7 Medición de cloro residual libre a través del método DPD

En la cloración en el procedimiento de titulación con DPD (N, N p-fenilen diamina), se utiliza el sulfato ferroso amoniacal como agente oxidante y la DPD se utiliza como indicador. Se pueden medir cloro libre, monocloraaminas, dicloroaminas o cloro combinado, así como cloro libre y cloro total. Los métodos previamente mencionados se utilizan extensamente en el laboratorio, en función de la concentración de cloro residual y el tipo de cloro residual que se desea medir (Moreno y López, 1991).

2.2.8 Zonas críticas de concentraciones de cloro

Las áreas críticas de niveles de cloro en una red de distribución de agua se consideran aquellas donde las concentraciones de cloro residual no son suficientes para asegurar la calidad y desinfección del agua. Estas áreas, usualmente se perciben en los extremos o puntos más alejados de la red o en áreas de bajo consumo, teniendo tiempos de contacto más largos y pueden verse afectadas por elementos como la existencia de biofilms, interacción con materia orgánica o condiciones hidráulicas adversas. Estas circunstancias requieren cuidado y vigilancia para preservar concentraciones mínimas que garanticen la calidad del agua (Tzatchkov, 2016).

2.2.9 Efectos del PH del agua en la desinfección con cloro

El pH es un parámetro crítico en la eficacia de la cloración y la estabilidad del cloro residual en el agua potable. La presentación del cloro residual en el proceso de desinfección puede presentarse como ácido hipocloroso (HOCl) o ion hipoclorito (OCl^-), cuya proporción

depende directamente del pH del agua.

Intervalo ideal para la cloración:

El pH ideal para la cloración se sitúa entre 6.5 y 7.5, dado que en este intervalo predomina el ácido hipocloroso (HOCl), que es la versión más eficaz del cloro para desinfectar. Durante este periodo, el cloro residual conserva su capacidad de desinfección sin disminuir excesivamente su efectividad (OMS, 2022).

Cuando no es ideal:

A niveles de pH por debajo de 6.5, el agua puede tornarse corrosiva y perjudicar las tuberías, además de provocar potenciales problemas de sabor y olor a pesar de que predomina el ácido hipocloroso. A niveles de pH por encima de 7.5, la proporción de iones hipoclorito (OCl^-) se incrementa, reduciendo considerablemente la efectividad desinfectante del cloro. Por ejemplo, a un pH de 8.5, el poder desinfectante puede disminuir de su capacidad en un 10% a diferencia de un pH de 7 que se mantiene en su máxima capacidad.

Así pues, es crucial mantener un correcto control del pH para potenciar la eficiencia de la desinfección y asegurar niveles apropiados de cloro residual en las redes de distribución de agua. (OMS, 2022).

2.2.10 Influencia de la dureza, el manganeso y el hierro en la eficacia de la cloración

Dureza y su efecto en la cloración

El hipoclorito de calcio, al disolverse, aumenta el pH del agua, favoreciendo la formación de iones hipoclorito (OCl^-) en lugar de ácido hipocloroso (HOCl), que es la forma más efectiva para la desinfección. En aguas con alta dureza (por encima de 200-500 mg/L como CaCO_3), el aumento de pH causado por el hipoclorito puede favorecer la precipitación de carbonato de calcio (CaCO_3), lo que puede generar incrustaciones en tuberías y equipos. Estas incrustaciones pueden reducir la eficiencia de la cloración al afectar la distribución uniforme del cloro (White, 2010).

Manganeso (Mn)

El manganeso en concentraciones superiores a 0.05-0.1 mg/L reacciona rápidamente con el cloro residual, formando óxidos de manganeso insolubles (MnO_2), que se precipitan y consumen cloro, reduciendo su disponibilidad para desinfección.

Además, el manganeso puede causar manchas negras en superficies y complicar la medición de cloro residual en el sistema (AWWA, 2011).

Hierro (Fe)

El hierro en el agua reacciona con el cloro, formando compuestos insolubles como el óxido férrico ($\text{Fe}(\text{OH})_3$ o Fe_2O_3), que también consumen cloro residual, reduciendo su eficacia en la desinfección. El precipitado de hierro puede causar incrustaciones y coloraciones rojizas, además de interferir en las mediciones de cloro. A niveles altos de hierro (por encima de 0.3 mg/L), la cloración puede generar problemas de sabor metálico en el agua (WHO, 2006).

2.2.11 Elaboración de un modelo hidráulico para sistema de agua potable

2.2.11.1 Modelación hidráulica de sistemas de agua potable

La modelación hidráulica de un sistema de agua potable se realiza con el propósito de optimizar su funcionamiento, identificar las condiciones operativas actuales y futuras, y definir las medidas correctivas necesarias. Este proceso incluye la elaboración de un plan de optimización del sistema, fundamentado en acciones previas de sectorización, con el objetivo de presurizar el sistema mediante intervenciones inmediatas y a largo plazo.

Los métodos de solución empleados en los modelos han evolucionado significativamente desde los estudios iniciales sobre el flujo en redes, desarrollados por Hardy Cross en 1936 y realizados manualmente. Posteriormente, durante las décadas de 1970 y 1980, se desarrollaron modelos computarizados de redes hidráulicas, y con el tiempo se incorporaron modelos enfocados en la calidad del agua en las redes y simulaciones virtuales (Córdova y Zelaya, 2017).

2.2.11.2 WaterGEMS como herramienta para modelamiento

WaterGEMS es un programa de desarrollo comercial para el análisis, modelado y gestión de redes de presión, que facilita la simulación hidráulica de un modelo computacional, representado en este escenario por elementos de tipo: línea (redes de tuberías), punto (nodos de consumo), tanques, embalses, hidrantes) e híbridos (bombas, válvulas de regulación, control, etc.). Además, posibilita ampliar tus habilidades en temas relacionados con la administración de largo plazo de los sistemas de suministro, tales como: evaluación de vulnerabilidad, evaluación de protección contra incendios, cálculo de costos energéticos, calibración hidráulica, optimización, entre otros (Córdova y Zelaya, 2017).

Este software reconoce y explora diversas variables durante un período de simulación determinado y establece el flujo a través de cada tubería, la velocidad del flujo, la pérdida de carga, el gradiente hidráulico, la presión en cada nodo y el nivel de agua en cada tanque. A lo largo de la red, la red. Los elementos que distinguen a este software se pueden clasificar en 5 categorías: interfaz de usuario con plataformas externas, procesamiento de datos, análisis hidráulico extendido y modelado de componentes, herramientas de análisis, asistencia técnica y ayuda comercial (Valenzuela y Orillo, 2019).

2.2.11.3 Componentes de diseño en WaterGEMS

Tanques

En WaterGEMS, los depósitos de almacenamiento se ilustran como nodos en los que el volumen de agua puede fluctuar a lo largo del tiempo durante la simulación, sin que se vea impactado por la actividad del resto de la red. Para la simulación, se toma en cuenta un volumen infinito y una altura constante en estado estático, lo cual sugiere una conducta parecida a la de los reservorios. Las elevaciones base, mínima, inicial y máxima son elementos de entrada esenciales para establecer el rango operativo del tanque (Valenzuela y Orrillo, 2019).

Reservorios

Su función es actuar como fuente de agua o almacenamiento con un nivel de elevación constante, lo que simplifica la integración de fuentes de agua en los modelos (Valenzuela y Orrillo, 2019). Según Alayo y Espinoza (2016), WaterGEMS permite analizar el sistema en periodos estáticos o extendidos, incluyendo aspectos de calidad del agua y costos de operación.

Bombas y Válvulas

Las bombas son componentes que elevan el agua a una altura piezométrica para impulsar el flujo en un solo sentido; su diseño comprende la altura, las características del motor y el estado de funcionamiento. Las válvulas, tales como las reductoras de presión y controladoras de flujo, facilitan la regulación del sistema y la segmentación de la red para conservar el control de presión y flujo en lugares determinados (Alayo y Espinoza, 2016; Valenzuela y Orrillo, 2019).

Nudos y Tuberías

Los nudos simbolizan los puntos de unión entre tuberías, otorgando necesidades particulares y justificando factores como la altura, la presión y la calidad del agua. Las tuberías llevan el agua a través de la red y en WaterGEMS, se supone que siempre están llenas, fluyendo desde una carga hidráulica más alta a una inferior. Los datos introducidos en las tuberías abarcan puntos de inicio y final, diámetros, material y longitud, mientras que los resultados del modelo abarcan caudal, velocidad y pérdida de carga, esto es vital para perfeccionar el diseño de los sistemas de distribución de agua (Alayo y Espinoza, 2016).

2.2.11.4 Construcción y calibración de un modelo hidráulico en WaterGEMS

Crear un modelo hidráulico desde una realidad física a una realidad virtual para ilustrar el funcionamiento de la red de distribución de agua en redes rurales es muy esencial, este método facilita la implementación de instrumentos como WaterGEMS que permite la simulación de flujos y presiones en diferentes puntos de la red, lo que facilita la modificación

de la dosificación de cloro y prever posibles caídas de presión o concentraciones bajas en áreas críticas. La calibración de estos modelos requiere cotejar las presiones y flujos simulados con los valores registrados en terreno (Walski, 2004). La correcta calibración de un modelo hidráulico exige que las presiones estimadas no varíen más del 10-20% de las medidas reales, y resulta crucial modificar parámetros como el coeficiente de rugosidad, que se basa en la antigüedad y el material de las tuberías (Haestad et al., 2003).

2.2.11.5 Importancia de los patrones de consumo para modelos hidráulicos

Es crucial establecer los patrones de demanda para cada área en análisis, dado que estos están vinculados a las características específicas de cada sistema y constituyen el fundamento para el análisis a largo plazo en la simulación de modelos hidráulicos. El uso del agua depende de la ubicación del lugar, las tradiciones y la hora del día, siendo más alto en determinadas horas del día y condicionado por las actividades diarias, que generalmente se desarrollan los pobladores (Bakar Radhi, 2016).

2.2.12 Elaboración de un modelo de decaimiento de cloro para sistema de agua potable

2.2.12.1 Modelo de decaimiento de cloro

Es fundamental emplear modelos que permitan replicar el comportamiento del cloro en las redes de agua potable para garantizar una desinfección continua. El cloro residual desempeña un papel crucial en la prevención de la proliferación de patógenos dentro de las redes de distribución. Sin embargo, su concentración disminuye a lo largo de la red debido a factores como la demanda de cloro en las tuberías, el tiempo de residencia y las reacciones con compuestos orgánicos (Monteiro et al., 2008).

En la mayoría de los sistemas de distribución de agua, el comportamiento del cloro puede describirse mediante una cinética de primer orden. No obstante, algunos estudios sugieren modelos basados en una cinética combinada, donde ocurre una rápida disminución inicial seguida de una reducción más lenta, especialmente en redes complejas (Vasconcelos et

al., 1997). WaterGEMS permite simular estos procesos de decaimiento, proporcionando herramientas para predecir las concentraciones de cloro en diversos puntos de la red y facilitando la toma de decisiones.

2.2.12.2 WaterGEMS como herramienta para modelar el decaimiento del cloro

WaterGEMS es un instrumento sofisticado de modelado hidráulico y de calidad del agua que facilita el análisis y perfeccionamiento de redes de distribución de agua para consumo humano. Esta herramienta permite simular fenómenos hidráulicos y químicos, como la degradación del cloro residual, ofreciendo resultados que contribuyen a asegurar la seguridad y la calidad del abastecimiento de agua en las redes (Rossman, 2000).

El proceso de degradación del cloro se ve afectado por elementos como la demanda de cloro en las tuberías, la temperatura, el periodo de permanencia del agua y la interacción con los componentes. El comportamiento del cloro residual se rige por ecuaciones cinéticas que pueden ser ilustradas en modelos de orden cero, primero o mixto. Estas ecuaciones sintetizan los elementos que influyen en la disminución del cloro en dos variables " K_b " y " K_w ". WaterGEMS posibilita la integración de estos modelos cinéticos y la simulación de la conducta del cloro bajo diversas circunstancias operativas y de diseño, proporcionando resultados fiables (Rossman, 2000).

Ventajas del Uso de WaterGEMS:

1. **Integración de Variables Complejas:** WaterGEMS toma en cuenta factores como las velocidades de flujo, la edad del agua, las reacciones en la fase líquida (K_w) y con las paredes de las tuberías (K_b), lo cual es determinante para simular la pérdida de cloro en tiempo real (Bentley Systems, 2023).
2. **Validación y Calibración de Modelos:** Esta aplicación facilita herramientas como "Darwin Calibrator", que facilita la modificación de los coeficientes de rugosidad y las velocidades de reacción química para incrementar la exactitud de los modelos y asegurar

que los resultados sean equivalentes a datos en campo (Bentley Systems, 2023).

Darwin Calibrator se utiliza para validar y ajustar modelos hidráulicos de sistemas de distribución de agua mediante la comparación de datos simulados con datos reales, permitiendo así mejorar la precisión y utilidad de las simulaciones realizadas en el programa. Esta herramienta utiliza fórmulas como Hazen-Williams y la ecuación de Darcy-Weisbach para ajustar el coeficiente de rugosidad; pero debido a la simplicidad de aplicación, disponibilidad de información y estudios realizados que respaldan la validez de los resultados obtenidos mediante aproximaciones empírica se utiliza de manera precisa la fórmula de Hazen-Williams.

3. **Reconocimiento Académico y Técnico:** Autores como Vreeburg et al. (2009) y Boccelli et al. (2003) destacan la utilización de instrumentos como WaterGEMS para simular procesos químicos en redes de distribución de agua, gracias a su adaptabilidad y exactitud. Adicionalmente, entidades internacionales y operadores del agua lo emplean como referencia para investigaciones vinculadas a la calidad del agua.
4. **Optimización de Redes de Distribución:** WaterGEMS no solo simula la conducta química del cloro, sino que también facilita la evaluación de estrategias de funcionamiento y diseño para disminuir el tiempo de permanencia del agua, atenuar la pérdida de cloro y asegurar niveles apropiados en toda la red (Haestad Methods, 2003).

2.2.12.3 Decaimiento de cloro en las redes de distribución de agua potable

En los sistemas de suministro de agua potable, generalmente se inyecta el desinfectante (cloro) directamente en el conducto de agua, salida de la planta de tratamiento, tanques y bombas. En estas zonas, el cloro residual libre se degrada al interactuar con el agua, las paredes de los conductos y depósitos; siendo necesario conservar un nivel de desinfección adecuado y evitar enfermedades transmitidas a través del agua (Aguerrin y Alcocer Yamanaka, 2004).

2.2.12.4 Donde medir el cloro en una red de distribución

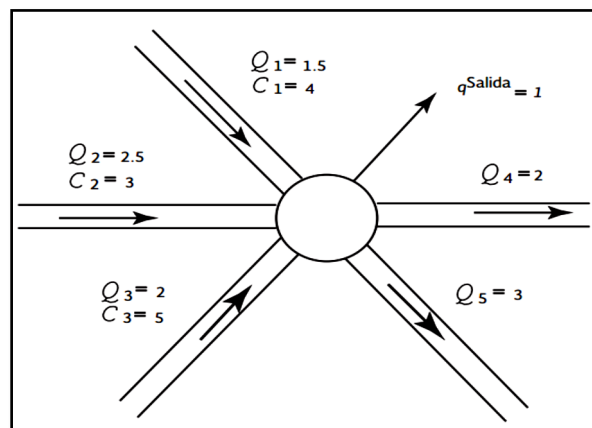
Se evidenciado que se debe supervisar el cloro residual libre al menos una vez a la semana y los sitios ideales son; la salida o el lugar más próximo donde se está clorando; además, en cada punto crítico de control; los puntos de control sugeridos son la vivienda más distante del lugar de cloro y las áreas más elevadas en relación a los demás elementos. Igualmente, es necesario medir el cloro en el hogar más próximo al sitio donde se está clorando, para asegurarse de que no exista un exceso de cloro residual en el agua y genere incomodidad en los usuarios por el color y el aroma del agua (Cooperación Alemana, 2017).

2.2.12.5 Principio de la mezcla de solutos en los nodos de la red de distribución

Para el estudio del decaimiento de cloro en la red de distribución de agua, se utiliza el principio que la concentración del soluto en el agua que ocurre tras la inyección y posterior disolución del componente; teniendo de esta manera cambios en la calidad del agua y puede ser analizada al partir del supuesto que en los distintos nodos ocurren mezclas instantáneas y complejas (Comisión Nacional del Agua, 2018).

Figura 2

Nodo de red de distribución con tres entradas y salidas donde ocurre una mezcla de soluto



Fuente: Comisión Nacional del Agua

De la figura anterior se considera el balance de masas con la ecuación:

$$C_1Q_1 + C_2Q_2 + C_3Q_3 - C_4Q_4 - C_5Q_5 - C_{salida}Q_{salida} = 0 \quad (2)$$

Considerando con signos positivos a los valores entrantes y negativos a los de salida,

resaltando la importancia de determinar la dirección, en tal sentido se puede generalizar como:

$$C_{sal} = \frac{\sum I \in J_{en} C_I Q_I + C_{en} q^{en}}{q^{sal} + \sum I \in J_{sal} Q_I} \quad (3)$$

La ecuación anterior, representa el ingreso del flujo de agua a través de las tuberías J_{en} y un flujo externo proporcionado por q^{en} ; los diferentes flujos poseen una concentración diferente de soluto C_I y C_{en} respectivamente. En el nodo ocurre la extracción del flujo representado por q^{sal} y J_{sal} asumiendo que en el nodo ocurre una mezcla completa; todas las salidas tendrán la misma concentración de soluto en nuestro caso cloro (Alcántara, 2011).

2.2.12.6 Coeficiente de reacción del cloro con el agua, kb

El coeficiente de reacción del cloro con el agua (K_b), este factor describe la velocidad en la que el cloro residual se degrada en la masa de agua dentro de una red de distribución, influenciado por factores como la temperatura, el pH y la calidad del agua.

Un (K_b) elevado marca una degradación acelerada del cloro, lo que podría provocar niveles bajos en zonas alejadas de la red. Este coeficiente es crucial en modelos de simulación hidráulica, empleando programas informáticos, para anticipar y mejorar los niveles de cloro residual, garantizando que se conserven dentro de los límites seguros sugeridos para la desinfección del agua para consumo humano (Bakar Radhi, 2016).

$$-0,1 \text{ /día} < k_b < -1,5 \text{ /día (valores típicos de } K_b)$$

2.2.12.7 Coeficiente de reacción del cloro con la pared de la tubería, kw

El coeficiente de reacción del cloro con la pared de una tubería (K_w), evalúa la rapidez con la que el cloro se degrada al interactuar con las superficies internas de las tuberías en una red de suministro de agua para consumo. Este coeficiente se ve afectado por el material y la condición de las tuberías, con valores superiores señalando un consumo acelerado de cloro. La determinación exacta de (K_w) resulta complicada debido a las fluctuaciones de las condiciones en la red, lo que sugiere utilizar experimentos previos e investigaciones anteriores que hayan establecido valores representativos bajo condiciones parecidas (Al-Zahrani, 2014).

2.2.12.8 Datos para determinar los coeficientes de decaimiento de cloro en WaterGEMS

La simulación de decaimiento del cloro en redes de distribución de agua a través de instrumentos como WaterGEMS necesita información exacta derivada de mediciones directas en campo. Esto abarca la concentración de cloro residual y el tiempo que se pasa en varios lugares de la red, preferentemente en la mayor cantidad posible de hogares garantizando que el modelo represente correctamente las condiciones verdaderas de la red.

Según Rossman (2000), determinar las tasas de reacción de masa (K_b) y con la pared de la tubería (K_w), es fundamental recolectar datos empíricos en puntos estratégicos de la red de distribución que permita construir gráficos (concentración vs Tiempo) para ajustar las ecuaciones cinéticas de primer orden y modelar el comportamiento químico del cloro residual.

2.2.12.9 Muestreo distribuido para coeficientes de decaimiento de cloro

Las variaciones en las condiciones del agua y la diversidad de materiales en las tuberías de una red de distribución hacen imprescindible realizar muestreos en distintos puntos, asegurando que las simulaciones capturen los efectos locales, como los cambios en la demanda de cloro y las interacciones con los componentes de las tuberías (Vreeburg et al., 2009). Según Boccelli et al. (2003), los modelos de decaimiento del cloro basados en ecuaciones de primer orden ofrecen mayor precisión cuando se apoyan en datos extensivos recolectados en campo. En este contexto, recomiendan utilizar gráficos logarítmicos de concentración en función del tiempo para ajustar el coeficiente de decaimiento (K_b), siempre que se cuente con un número suficiente de muestras que garantice la validez estadística de los resultados.

Además, Blokker et al. (2010) destacan que una calibración adecuada del modelo depende de datos de alta calidad, lo cual requiere distribuir estratégicamente los puntos de muestreo. Esto incluye tanto zonas de alta demanda como áreas con menor consumo, ya que las condiciones hidráulicas influyen directamente en el tiempo de residencia del agua y el comportamiento del decaimiento del cloro.

2.2.12.10 Influencia temporal de los coeficientes de decaimiento de cloro

La reacción en la masa del agua (K_b) y la interacción con las paredes de las tuberías (K_w) influyen directamente en los niveles de cloro residual dentro de una red de distribución de agua. Durante el día, cuando la demanda de agua es alta y el flujo aumenta, estas interacciones se reducen, lo que limita el efecto de K_b y K_w . Como resultado, las concentraciones de cloro tienden a mantenerse más estables. En cambio, durante la noche, el flujo disminuye, lo que prolonga el tiempo de retención del agua en las tuberías. Esto intensifica el impacto de K_b y K_w , acelerando la degradación del cloro y provocando niveles más bajos de este desinfectante (Tzatchkov, 2016).

2.2.13 Eficiencia estadística del modelo de decaimiento de cloro: Índice de nash-sutcliffe y Error cuadrático medio normalizado (RSR)

Para analizar qué tan eficiente es el modelo de decaimiento de cloro, se sugiere utilizar métricas estadísticas como el índice de Nash-Sutcliffe (ENS) y el Error Cuadrático Medio Normalizado (RSR). El ENS, desarrollado por Nash y Sutcliffe en 1970, evalúa qué tan bien las predicciones del modelo se alinean con los valores reales observados. Este índice tiene un rango que va desde 1, indicando una eficiencia perfecta, hasta 0, que refleja una baja eficiencia. Por su parte, el RSR combina el error cuadrático medio con la desviación estándar de los datos observados, lo que permite comparar valores simulados con los obtenidos en campo (Moriassi et al., 2007). Estas métricas son clave para validar el modelo de decaimiento de cloro y detectar puntos en la red donde sea necesario realizar ajustes y el modelo represente mejor la realidad.

2.2.14 Concentración óptima inicial de cloro en el reservorio

El nivel inicial de cloro en el reservorio es un indicador decisivo, pues debe ser adecuado para garantizar una correcta concentración residual en toda la red de distribución. Según estudios de Kohpaei y Sathasivan (2011), la concentración ideal de cloro se determina por el periodo de residencia, la demanda de cloro en los conductos y las características particulares

del agua. En zonas rurales, donde las condiciones de escasa renovación de agua en las tuberías, es crucial establecer una concentración de cloro que garantice una desinfección constante en toda la red según la normativa. Así la simulación en WaterGEMS facilita la modificación y prueba de diversos niveles iniciales de cloro (OMS, 2017).

2.3 Definición de Términos Básicos

- **Cloración:** Proceso de purificación del agua en el que el cloro es añadido para esterilizar el agua y este exenta de microorganismos (Comisión Nacional del Agua, 2018).
- **Cloro libre:** Cloro presente en forma de ácido hipocloroso (HOCl), ion hipoclorito (OCl^-) y cloro molecular disuelto (Comisión Nacional del Agua, 2018).
- **Cloro residual:** Cantidad total de cloro (cloro disponible libre o combinado) que permanece en el agua posteriormente a un periodo de contacto definido (MINSA, 2011).
- **Concentración:** Contenido de soluto en una disolución (Aguilar Siguenza, 2015).
- **Decaimiento:** Proceso mediante el cual un constituyente o sustancia presenta variaciones en su concentración, producto de efectos mecánicos, temporales y químicos (Bakar Radhi, 2016).
- **JASS:** Junta Administradora de los Servicios de Saneamiento, encargada de la operación y mantenimiento de sistemas de agua potable en el ámbito rural (Bendezu Quispe, 2018).
- **Red de distribución de agua potable:** Sistema de componentes estructurales conectados que permiten distribución del agua para consumo humano a cada una de las viviendas de la población usuaria (Al-Zahrani, 2014).
- **Topología:** Hace referencia a la manera en que están dispuestos los elementos de una red; como vienen a ser nodos, conexiones a las viviendas y las líneas de tuberías utilizadas para la distribución del agua de manera adecuada y segura (Casanova Matera, 2022)

CAPITULO III.- MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Ubicación Geográfica

La zona de estudio abarcó a toda la red de distribución de agua del caserío de Parapuquio, ubicado al este de la provincia de Celendín, departamento de Cajamarca, se localiza entre las coordenadas UTM: 813022.75 m Norte y 9240688.95 m Sur con una altitud de 2824 msnm, el área abarca un aproximado de 1.5 Km² y comprende un total de 47 conexiones de agua, las cuales son gestionadas por la JASS Parapuquio, la cual cuenta con asistencia técnica por parte de la Municipalidad Provincial de Celendín, a través de su área técnica de saneamiento.

Figura 3

Vista satelital de la zona de estudio



Fuente: Google Earth Pro

3.2 Aspectos Socioeconómicos y Características Físicas

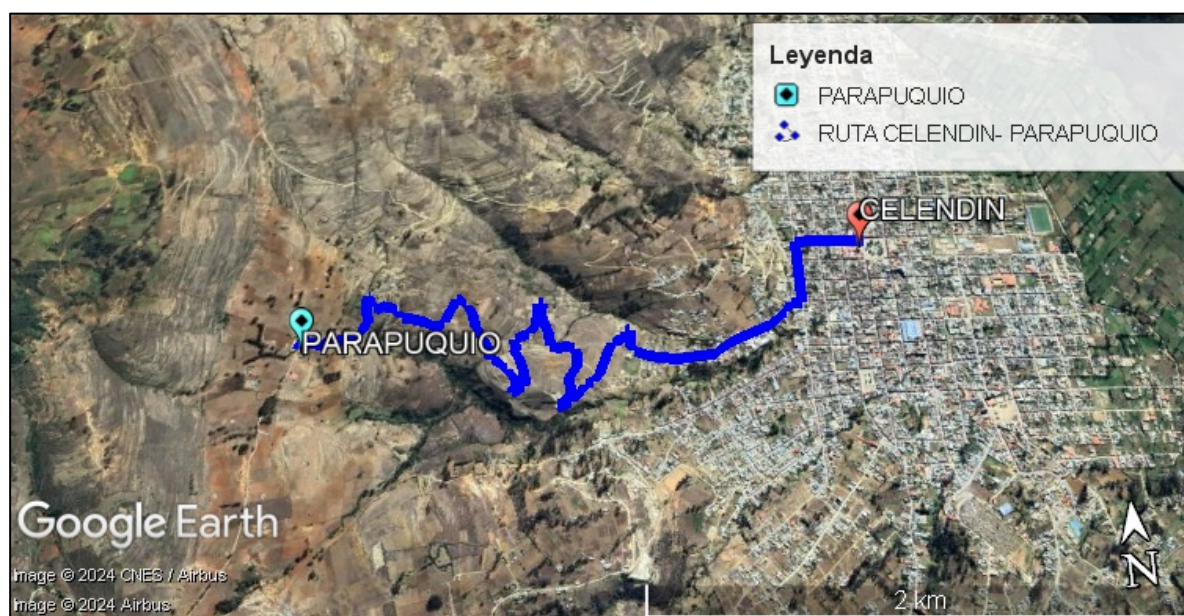
3.2.1 Accesibilidad

Para acceder a la zona de estudio, se debe dirigir hacia el este desde el centro de la ciudad de Celendín a 3,5 km de distancia, el tiempo de llegada es de 30 min en vehículo

motorizado ya que cuenta con acceso a través de una carreta, de igual manera cuenta con caminos de herradura usados por los pobladores como vías de acceso con acémila o a pie.

Figura 4

Vista satelital de la ruta de acceso a la zona de estudio



Fuente: Google Earth Pro

3.2.2 Demografía

El caserío de Parapuquio según el censo que realizó INEI en el año 2017 tiene un decrecimiento de -1.1%, dicho caserío cuenta con un total de población de 211 habitantes (INEI, 2017).

3.2.3 Geología

Según la geología de la región del Instituto Geológico y Metalúrgico de Perú (INGEMMET), la zona de estudio presenta una geología mesozoica del sistema cretácico. Las principales unidades geológicas de la zona de estudio son:

- Pariatambo (38% del área): Calizas negras bituminosas con lutitas negras.
- Formación Chulec (42% del área): Lutitas grises, margas amarillentas y calizas marrón crema.
- Grupo Pulluicana (8% del área): Calizas grises, lutitas oscuras y margas.

- Grupo Goyllarisquizga (12% del área): Limolitas, lutitas gris verdosas, areniscas cuarzosas.

3.2.4 *Clima*

El clima en el caserío de Parapuquio es de tipo lluvioso, templado y con otoño e invierno secos según el método de Clasificación Climática de Warren Thornthwaite. Durante el verano, el clima está influenciado por la Alta de Bolivia. En invierno, hay pocas precipitaciones y heladas frecuentes debido a vientos secos del oeste en altura. Las temperaturas máximas oscilan entre 19°C y 23°C en el norte y entre 17°C y 21°C en el sur, mientras que las mínimas varían entre 3°C y 7°C. La precipitación anual acumulada oscila entre aproximadamente 700 mm y 1500 mm (SENAMHI, 2020).

3.2.5 *Hidrología*

La zona de estudio pertenece a la Región Hidrográfica del Amazonas, a la inter cuenca hidrográfica Alto amazonas, cuenca hidrográfica Marañón, Alto Marañón, específicamente a la Unidad Hidrográfica N° 49897 de la provincia de Celendín. (ANA, 2015).

3.2.6 *Actividades económicas*

En el caserío de Parapuquio el 80% de la población se dedican a la agricultura y un 20% ganadería y crianza de animales menores.

- a. Actividad Agrícola: las actividades agrícolas en el caserío Parapuquio; según el tipo de cobertura vegetal, corresponde a la categoría de cultivos agrícolas (sobre todo maíz y papa en mayor extensión y en pequeños porcentajes, chocho y trigo), también pastos naturales y vegetación arbustiva.

Figura 5

Cultivo de maíz y chochos en la zona de estudio



- b. Actividad agropecuaria: en esta actividad la población de esta comunidad se dedica a la crianza de vacunos, bovinos y equinos, además de crianza de cuyes, patos y gallinas.

Figura 6

Animales ovinos y equinos



Figura 7

Animales bovinos



- c. Actividad comerciales: los pobladores del caserío Parapuquio, realizan la compra y venta de sus productos básicos, alimentación, ropa y demás; en el mercado modelo de la provincia de Celendín, debido al acceso y cercanía a dicha ciudad.

3.2.7 Celebraciones y festividades

Fiesta de Corpus Christy: esta festividad es la que reúne a todas los caseríos y centros poblados de la localidad de Celendín que tiene su concentración en la capital de la provincia, su día central se celebra el 02 de junio de cada año.

El caserío Parapuquio se hace presente en esta festividad llevando su grupo de danzantes, destacando los colores y ritmos de este y 14 grupos más de danzantes y otros personajes provenientes de las diferentes comunidades de Celendín.

3.2.8 Acceso a servicios básicos

- a. Salud: El caserío en mención hace uso del puesto de salud de un anexo a su territorio como lo es el puesto de salud de Cahuaypampa, además muchos de los

pobladores de dicho territorio deciden atenderse en el hospital de apoyo de Celendín, debido a que el acceso y la distancia desde dicho lugar es cercano.

- b. Educación: El acceso a la educación es una de los principales derechos de todo ciudadano, por lo que es necesario referirse que el caserío Parapuquio cuenta con dos instituciones donde alberga niños del nivel inicial y del nivel primario respectivamente.
- c. Saneamiento: las viviendas de esta comunidad cuentan con una disposición de excretas mediante UBS con arrastre hidráulico.
- d. Electricidad e internet: El caserío Parapuquio cuenta con acceso a alumbrado público en toda su extensión además del acceso a internet a través de la línea de red de Bitel y claro.

3.3 Materiales y Equipos

Para el desarrollo de la presente investigación fueron necesarios el uso de materiales y equipos los cuales son listados a continuación:

- Medidor de cloro libre Checker Hanna – hi 701.
- Reactivo DPD HANNA HI93701-0.
- GPS marca GARMIN.
- Manómetro de glicerina AST 0-7 bar / 0-100 psi.
- Multiparámetro
- Espectrofotómetro y materiales de laboratorio.
- Comparador visual de PH
- Medidor de caudal.
- Motocicleta lineal.
- Celular (fotografías y reloj)
- Laptop DELL
- Impresora Marca Epson.
- Libreta de apuntes
- Plano de la Red de Distribución de Agua Potable del caserío de Parapuquio

El Software utilizado para el procesamiento de la información fue:

- Microsoft Word.
- Microsoft Excel.
- Power Point.
- ArcGis 10.08.
- AutoCAD Civil 3D 2022.
- Bentley WaterGEMS.

3.4 Metodología del trabajo

El método de investigación es inductivo – deductivo, el estudio inicio con la observación de casos particulares y recolección de datos empíricos, para luego analizar y clasificar estos datos en busca de patrones o métodos que den lugar a conclusiones más amplias.

3.4.1 Tipo, nivel y diseño de investigación

La investigación es de tipo aplicativo, utiliza conocimientos teóricos y científicos validados para resolver problemas o situaciones en contextos determinados (Vargas Cordero, 2009).

Es de nivel correlacional ya que evalúa la similitud existente el cloro simulado y el medido directamente en campo.

El diseño de la presente investigación es no experimental y transversal dado que se observará lo que ocurre de forma natural y sin intervenir de alguna manera.

3.4.2 Población de estudio

La población está representada por toda la red de distribución de agua potable del caserío de Parapuquio.

3.4.3 Muestra

La muestra incluye 18 nodos representativos de la red de distribución de agua potable del caserío de Parapuquio.

Estos puntos fueron elegidos estratégicamente para representar de manera efectiva las

variaciones en la red, abarcando áreas críticas como las más alejadas y con mayores desafíos en la cloración y presión del agua.

3.4.4 *Unidad de análisis*

La unidad de análisis será una muestra de 10 ml de agua clorada tomada directamente en el reservorio y en los grifos de las viviendas, al utilizar el comparador con dicha muestra se tendrá la concentración en cada punto de monitoreo.

3.5 Fase inicial en gabinete

3.5.1 *Revisión Bibliográfica*

Esta etapa consistió en examinar y analizar la literatura existente relacionada con el tema de investigación, identificando la literatura pertinente mediante la selección y revisión de información relevante para el tema de investigación. Para ello, se revisaron libros, artículos académicos, tesis anteriores y cualquier otra fuente que pudiera aportar información valiosa para situar el contexto del proyecto de investigación, proporcionar antecedentes y establecer la relevancia del estudio.

3.6 Fase de recolección de datos en campo

Esta fase implicó la recopilación de datos relevantes acerca de la red de distribución de agua potable, la topología de la red, la topografía del terreno, medición de patrones de consumo, la presión del agua en distintos puntos de la red y el monitoreo de las concentraciones de cloro residual en puntos representativos de la red.

3.6.1 *Recopilación de información de la red de distribución*

Esta etapa se recopiló la información necesaria acerca de la red de distribución de agua, ésta información fue suministrada por las autoridades de la Junta Administrativa de Servicios de Saneamiento (JASS) del caserío de Parapuquio, de los cuales se obtuvo los permisos para realizar la investigación, el padrón de usuarios, planos de la red abierta de agua existente, valor del caudal de ingreso al reservorio el cual fue designado por acuerdo de la asociación de los

tres melones en el año 2002, derivando un caudal de 3 l/s hasta el reservorio de Parapuquio para uso de este caserío; el sistema tiene una antigüedad de 22 año.

Figura 8

Recorrido de la red de distribución



Nota. El recorrido se hizo en compañía de autoridades de la JASS y personas de la tercera edad las cuales han participado en la construcción de la red de distribución.

Figura 9

Recolección de información con operario de la Jass Parapuquio



La información recolectada revela que cuentan con un servicio de agua potable constante durante todo el año, solo carecen de este servicio en caso de averías en el sistema o por limpieza y desinfección del reservorio o la red; cuentan con un total de 56 edificaciones de las cuales 47 cuentan con el servicio de agua potable, entre las que se encuentran dos instituciones educativas (inicial y primaria) y 45 viviendas, las 11 restantes no cuentan con el servicio de agua potable, de estas 10 son viviendas y una edificación destinada al uso de casa comunal.

3.6.2 Análisis de la topología de la red y levantamiento topográfico de la zona de estudio

El análisis de la topología, se realizó con el fin de comprender la disposición física de los elementos que componen el sistema y obtener la información clave para el diseño e implementación de la simulación del decaimiento de cloro en la red de distribución, para ello se realizó el levantamiento topográfico utilizando una estación total de la marca SUNWAY modelo ATS120A, de esta manera se obtuvo la información sobre la disposición y longitud aproximada de las tuberías, su diámetro, ubicación de válvulas de control, disposición del reservorio, cámaras rompe presión y puntos de entrega de las viviendas.

Figura 10

Levantamiento topográfico vivienda 32

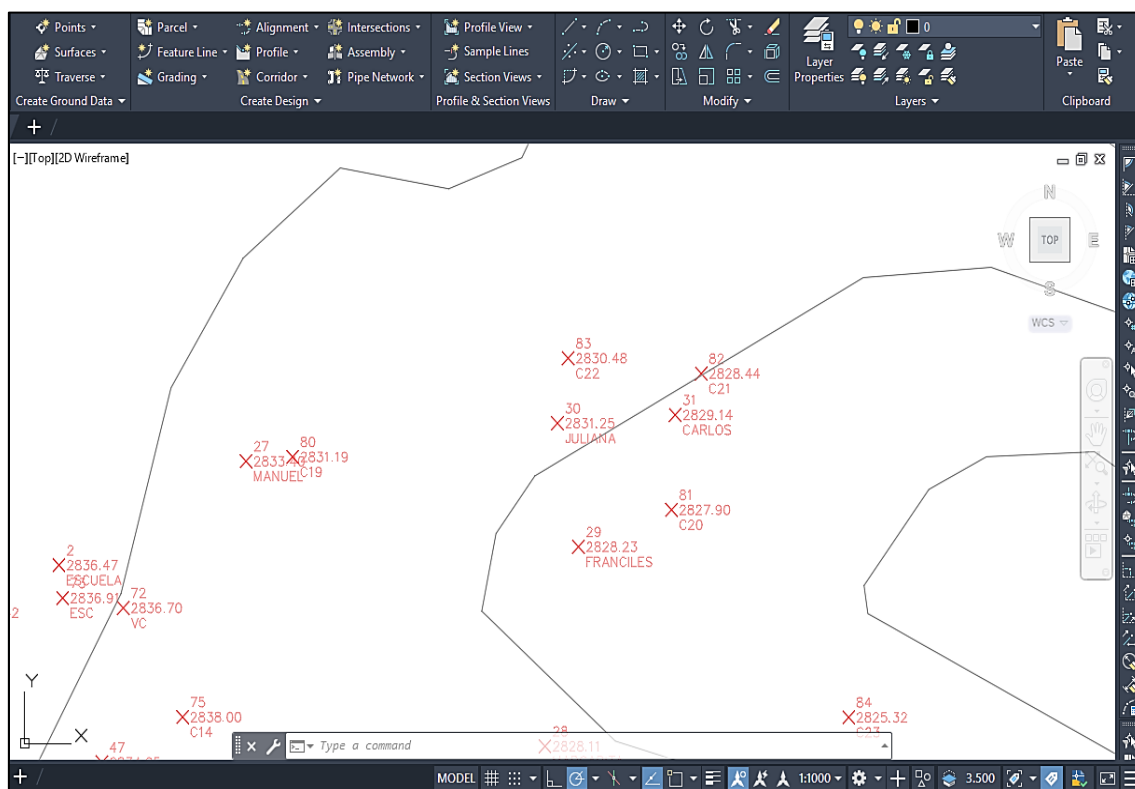


3.6.3 Procesamiento de datos y elaboración del plano red de distribución

Los datos obtenidos durante el levantamiento topográfico fueron procesados en Microsoft Excel, luego se exportó en formato .txt al programa Civil 3D. Al hacer uso de la herramienta de "geolocalización" de este programa, se verificó que todos los datos procesados se contrastaran con la realidad al sobreponerlos a imágenes satelitales; se realizó el trazado de las tuberías en base a los puntos tomados de la red de distribución y la información suministrada por los encargados de la JASS de Parapuquio, elaborando así el plano de la red de distribución el cual permitió diferenciar los distintos ramales tanto el principal como los secundarios y de cuál de éstos es que se abastece de agua cada una de las viviendas.

Figura 11

Procesamiento de datos en software Civil 3D



Nota: En la figura se muestran las curvas de nivel de (color gris) y las viviendas con sus respectiva numeración y elevación (color rojo) resultado del procesamiento del levantamiento topográfico.

3.7 Elaboración del modelo hidráulico

3.7.1 Metodología para el modelado de la red de distribución de agua

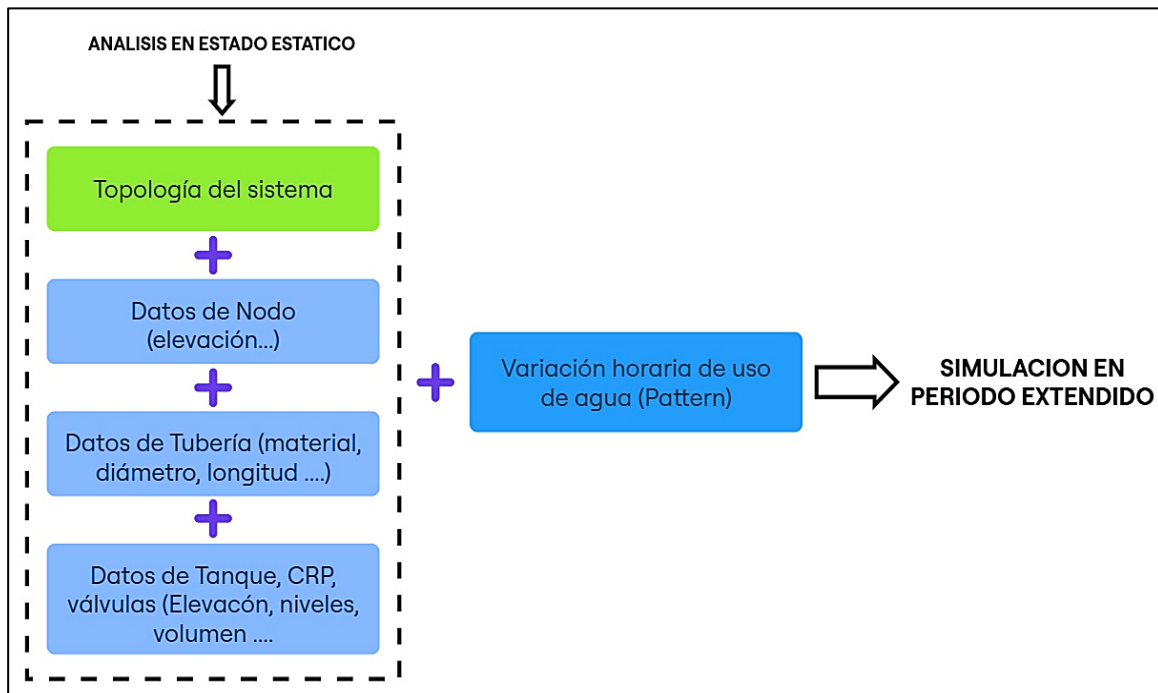
El *Water Research Centre* del Reino Unido (Warton et al., 2006) plantea cinco etapas fundamentales para modelar un sistema de distribución de agua: (i) la construcción de un modelo de la red, (ii) la asignación de los parámetros correspondientes a la red de distribución, (iii) la definición de los patrones de consumo, (iv) la calibración del modelo y, finalmente, (v) el análisis y validación del mismo.

En el caso específico del análisis de los modelos de decaimiento de cloro, es esencial llevar a cabo un estudio a lo largo de un periodo extendido y desarrollar un modelo hidráulico que capture la dinámica y el comportamiento real de la red de distribución.

La metodología empleada es útil en áreas rurales donde la falta de micro medición limita el monitoreo detallado del consumo de agua, por lo tanto se utilizó una metodología de monitoreo simultáneo de las presiones en puntos clave de la red junto con el caudal de salida del reservorio (patrones horarios “Pattern”); ésta combinación permitió generar una correlación entre la presión y el caudal, facilitando así el ajuste de los modelos de distribución y mejorando la precisión en la simulación del comportamiento hidráulico del sistema como se muestra en la Figura 13 (Bruno et al., 2021). La información necesaria para realizar una simulación en periodo extendido se presenta en la Figura 12.

Figura 12

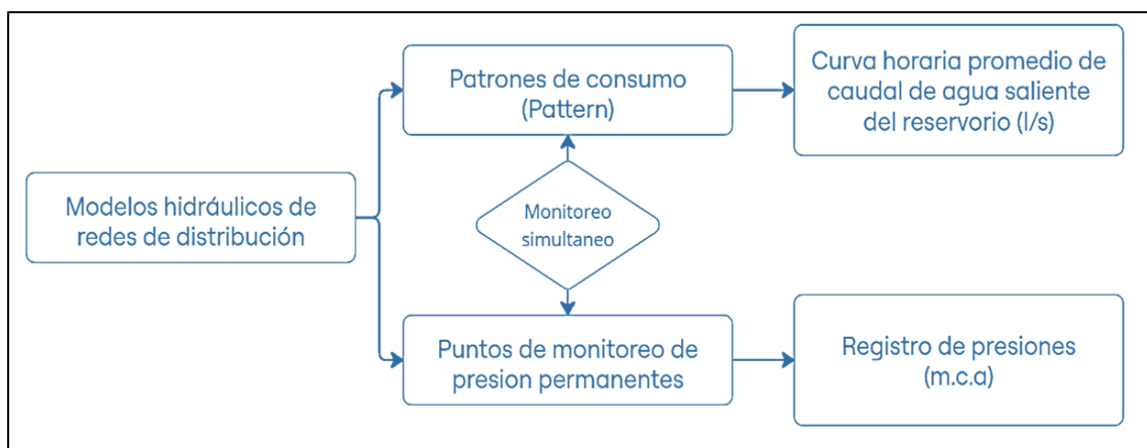
Datos de entrada para una Simulación en periodo extendido



Fuente: Extraído de “Manual de Simulaciones en Periodo Extendido” (Bentley, 2010).

Figura 13

Datos de entrada para modelo hidráulico de caudales y presiones simultaneas



Fuente: Extraído de (Bruno et al., 2021).

3.7.2 Selección de puntos para medición de presiones

Se ubicaron los puntos de monitoreos en las viviendas más cercanas a los nodos cercanos a los nodos con la finalidad de que las mediciones registradas sean lo más parecidas

entre “nodo - vivienda”, se establecieron 8 puntos de monitoreo fijos, donde se brindaron manómetros y se capacitó al participante para que puedan realizar la lectura de las presiones, en base a la disposición de tiempo de los participantes el monitoreo de presiones se hizo cada 2 horas durante 7 días, iniciando las mediciones de las 7 a.m. hasta las 5 p.m. de cada día.

Para esto se emplearon manómetros con glicerina, en efecto se conectó el manómetro al grifo de la vivienda mediante una manguera y se procedió a abrirlo. Cuando el indicador de presión se estabilizó, se realizó la lectura, teniendo en cuenta que el manómetro indica valores de presión en PSI y en Bar. En este caso, se optó por tomar los valores en PSI, los cuales se transformarán posteriormente a unidades de presión de m.c.a., las lecturas se registraron en la ficha de campo.

Tabla 1

Puntos de monitoreo de presiones

PUNTOS DE MONITOREO SIMULTANEO DE PRESIÓN				
Nº	NORTE	ESTE	COTA	PROPIETARIO
1	9240130.85	813803.250	2809.97	Ortiz Chávez Juan
2	9240518.31	813679.303	2855.21	Marín Acosta Mergen
14	9240257.48	813511.788	2839.37	Muñoz Marín Elías
15	9240610.64	813208.610	2852.56	Montoya Marín Francisco
17	9240277.53	812863.169	2839.68	Muñoz Chávez Cabino
31	9240015.28	813302.432	2805.15	Ortiz Marín Wilmer
35	9240064.99	813000.186	2827.02	Montoya Chávez Marcelino
44	9239466.74	812762.405	2868.10	Silva Muñoz Carmen

3.7.3 Medición de caudales de consumo (Patterns)

Para el registro de los caudales salientes del reservorio, se instaló un medidor en la línea de aducción, aprovechando uno de los tramos de tubería descubiertos, en donde se realizó la lectura de consumos registrados por el medidor cada hora durante 7 días, para determinar los

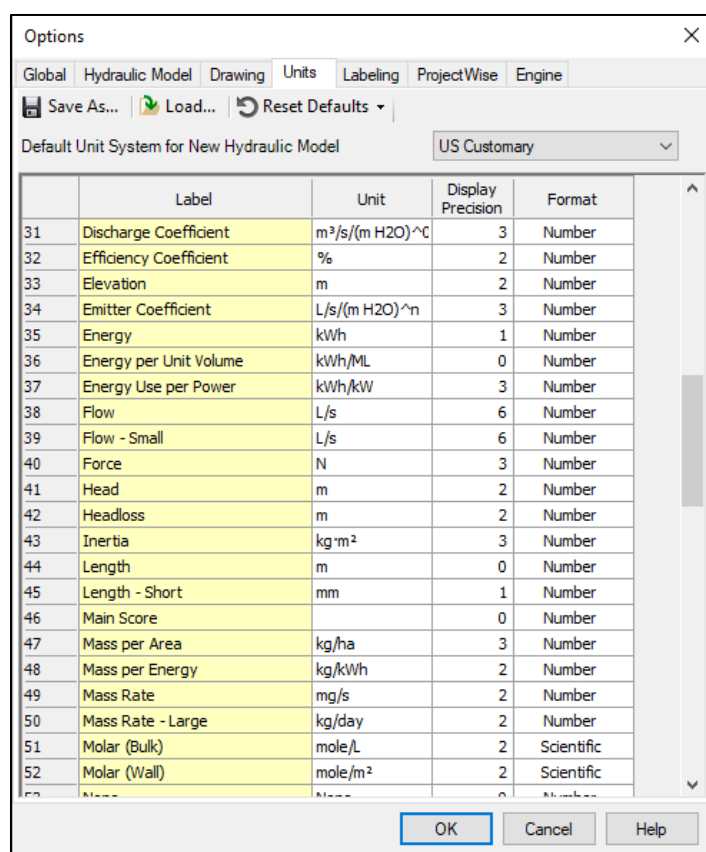
patrones de consumo (Patterns), los cuales sirvieron para la configuración del modelo hidráulico y la calibración de éste, las mediciones iniciaron desde las 7 a.m. hasta las 5 p.m. de cada día.

3.7.4 Configuración del modelo hidráulico

Inicialmente se configuro los aspectos básicos del modelo como son las unidades de trabajo, para ello en el menú File > Options > Units and Formatting se estableció las unidades de trabajo para caudal (l/s), longitud (m), elevación (m.s.n.m), diámetro (pulgadas), presiones (m.c.a), etc.

Figura 14

Configuración de unidades de trabajo



Fuente: Reporte WaterGEMS.

La red de distribución se realizó en base a la información recolectada durante el levantamiento topográfico y al plano existente de la misma en el software Civil 3D y se exporto

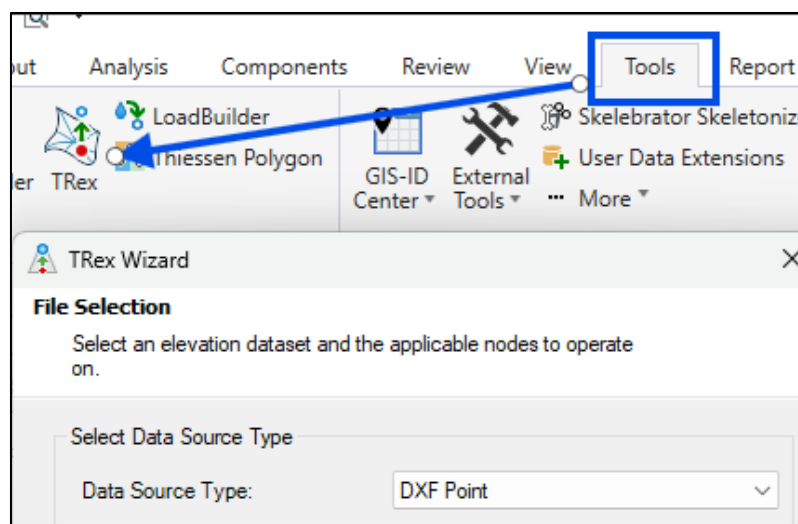
en formato .dxf para ser compatible con el programa WaterGEMS a través de la herramienta Model Builder, ésta reconoce las líneas como tuberías y las intersecciones como nodo; se modificó los nodos donde van ubicadas las cámaras rompe presión y el reservorio.

3.7.5 Asignación de parámetros hidráulicos a la red de distribución

En WaterGEMS, se asignó los respectivos diámetros a las tuberías, longitud de los tramos de tubería, numeración a los nodos, el volumen del reservorio, número de accesorios y las elevaciones se introdujeron de manera automática, utilizando la herramienta TRex que ajusta los elementos del modelo a la superficie generada Civil 3D.

Figura 15

Importación de curvas de nivel con la herramienta TRex



Fuente: Exportado de WaterGEMS

Se estableció el método de cálculo Hazen – Williams (H - W), el diámetro de cada tubería, el coeficiente de rugosidad inicial se estableció en 140, el material de las tuberías es de PVC, este se modificó a lo largo del proceso ya que disminuye en base al desgaste y a la edad de la red y está relacionado a las pérdidas de carga y por lo tanto a las presiones.

Figura 16

Configuración de diámetros y coeficientes de rugosidad inicial

FlexTable: Pipe Table (Current Time: 48.000 hours) (PARAPUQUIO.wtg)						
	Length (Scaled) (m)	Start Node	Stop Node	Diameter (in)	Material	Hazen-Williams C
30: T=1	413	J - 1	J - 2	0.50	PVC	140.0
36: T=2	391	J - 3	J - 4	1.00	PVC	140.0
45: T=5	69	J - 7	J - 6	0.75	PVC	140.0
47: T=6	434	J - 7	J - 8	0.50	PVC	140.0
50: T=7	282	J - 9	J - 7	0.75	PVC	140.0
54: T=9	142	J - 10	J - 9	0.75	PVC	140.0
58: T=10	237	J - 11	J - 12	0.50	PVC	140.0
60: T=11	67	J - 11	J - 13	1.00	PVC	140.0
62: T=12	104	J - 13	J - 14	0.50	PVC	140.0
64: T=13	120	J - 13	J - 15	1.00	PVC	140.0
66: T=14	132	J - 15	J - 16	0.50	PVC	140.0
68: T=15	185	J - 15	J - 17	1.00	PVC	140.0
70: T=16	423	J - 17	J - 18	0.50	PVC	140.0
82: T=17	176	T-2	PRV-2	0.75	PVC	140.0
83: T=18	132	PRV-2	J - 4	0.75	PVC	140.0
87: T=19	26	J - 10	CRP -7	1.00	PVC	140.0
88: T=20	502	CRP -7	J - 11	1.00	PVC	140.0
93: T=23	47	J - 9	CRP -8	0.50	PVC	140.0
94: T=24	30	CRP -8	J - 1	0.50	PVC	140.0
95: P-18	555	J - 4	J - 10	0.75	PVC	140.0
152: P-19	300	J - 17	J - 19	0.75	PVC	140.0

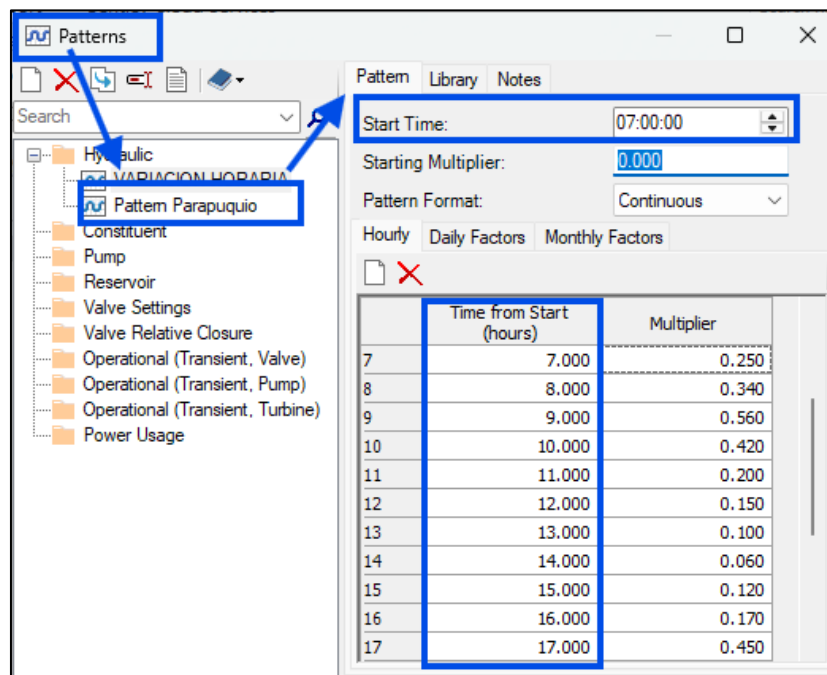
Fuente: Reporte de software WaterGEMS

3.7.6 Asignación de patrones de demanda

Se realizó las mediciones horarias de caudales salientes del reservorio al instalar un medidor en la línea de aducción con el permiso de la JASS Parapuquio con el fin de medir las variaciones de consumo, el caudal medido durante ese intervalo de tiempo se transformó a unidades de “l/s”. Las lecturas se registraron cada hora, a partir de las 7 a.m. hasta las 5 p.m.

Figura 17

Asignación de patrones de demanda (Pattern)



Fuente: Reporte de software WaterGEMS

3.7.7 Calibración del modelo hidráulico

La calibración del modelo se basó en comparar las presiones simuladas con las medidas en campo. Dado que inicialmente no hubo una buena correlación entre los datos, se recalculó el coeficiente de rugosidad “C” considerando la antigüedad de las tuberías y ajustando los factores de patrones de consumo hasta obtener un error porcentual menor al 20%. Según Walski (2004), para lograr una calibración adecuada, las diferencias de presión entre los valores modelados y los datos reales no deben superar el 10-20% en períodos de consumo máximo, Por otro lado, Arsene T., (2011), se establece que en el 85% de los nodos, el error en las presiones no debe exceder el ± 2 m.c.a.

3.7.7.1 Configuración de presiones y caudales para calibración del modelo

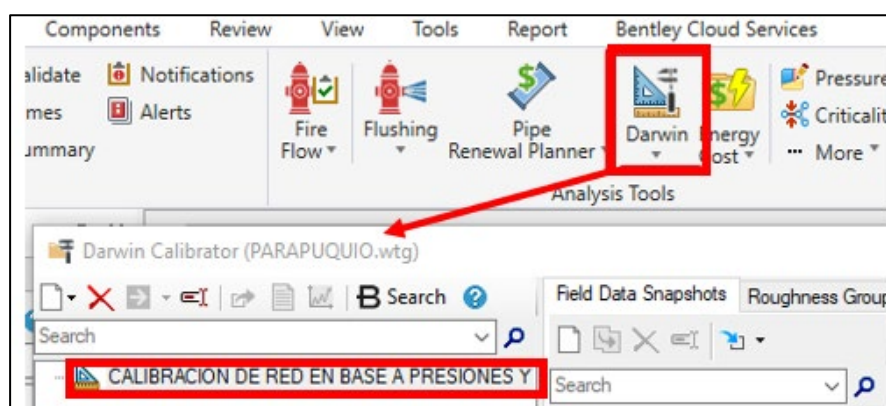
Esta etapa fue fundamental para el desarrollo de la calibración del modelo basado en la relación de la variación de presiones y los caudales salientes del reservorio (Patterns) para ello se siguió el siguiente procedimiento. Ingresamos a la herramienta Darwin Calibrator, ubicado

dentro de la barra de herramientas Analysis, el cual nos permitirá realizar una calibración del modelo hidráulico relacionando los caudales salientes del reservorio Patterns y las presiones medidas en campo de manera simultánea, en consecuencia, que la modificación de los patrones de consumo influya en la variación de presiones del modelo.

Seleccionamos la opción NEW CALIBRATION STUDY, para iniciar con una calibración básica, que nos ofrece el software y generamos un nuevo estudio de calibración.

Figura 18

Creación de nuevo estudio de calibración



Dentro de CALIBRACION DE RED EN BASE A PRESIONES Y CAUDALES, ingresamos a FIELD DATA SNAPHOTS, donde creamos una DATA con nombre “Red Parapuquio”, para ingresar nuestros datos de presiones medidas en campo, aquí se introdujo la fecha de iniciada las simulaciones y la hora donde se inicia el monitoreo de presiones, creando un total de 6 datas desde las 07:00 a.m. hasta las 5 p.m.

Figura 19

Creación de data para calibración basado en presiones

Field Data Snapshots			
Representative Scenario: Analisis de cloro con reaccion			
	Label	Date	
1	Red Parapuquio 7 a.m	12/06/2023	07:00:00
2	Red Parapuquio 9 a.m	12/06/2023	09:00:00
3	Red Parapuquio 11 a.m	12/06/2023	11:00:00
4	Red Parapuquio 1 p.m	12/06/2023	13:00:00
5	Red Parapuquio 3 p.m	12/06/2023	15:00:00
6	Red Parapuquio 5 p.m	12/06/2023	17:00:00

- En la opción OBSERVED TARGET, ubicaremos los nodos cercanos a los puntos designados para el monitoreo simultaneo de presiones, utilizando en la opción ELEMENT <FIND.
- Ya seleccionados los puntos, se configuró que el atributo de calibración se basara en presiones, para ello en la opción denominada como ATTRIBUTE: PRESSURE colocamos los valores horarios medidos en campo, como se muestra en la siguiente figura.

Figura 20

Asignación de presiones horarias medidas en campo para la calibración del modelo

Observed Target Boundary Overrides Demand Adjustments				
	Field Data Set	Element	Attribute	Value
1	Red Pararapuquio 7 a.m	J - 8	Pressure (m H2O)	68.5
2	Red Pararapuquio 7 a.m	J - 6	Pressure (m H2O)	21.7
3	Red Pararapuquio 7 a.m	J - 2	Pressure (m H2O)	9.5
4	Red Pararapuquio 7 a.m	J - 10	Pressure (m H2O)	24.7
5	Red Pararapuquio 7 a.m	J - 4	Pressure (m H2O)	39.6
6	Red Pararapuquio 7 a.m	J - 19	Pressure (m H2O)	38.8
7	Red Pararapuquio 7 a.m	J - 14	Pressure (m H2O)	17.6
8	Red Pararapuquio 9 a.m	J - 8	Pressure (m H2O)	68.2
9	Red Pararapuquio 9 a.m	J - 6	Pressure (m H2O)	16.9
10	Red Pararapuquio 9 a.m	J - 2	Pressure (m H2O)	9.3
11	Red Pararapuquio 9 a.m	J - 10	Pressure (m H2O)	19.9
12	Red Pararapuquio 9 a.m	J - 4	Pressure (m H2O)	38.6
13	Red Pararapuquio 9 a.m	J - 19	Pressure (m H2O)	38.3
14	Red Pararapuquio 9 a.m	J - 14	Pressure (m H2O)	17.2
15	Red Pararapuquio 11 a.m	J - 8	Pressure (m H2O)	68.7
16	Red Pararapuquio 11 a.m	J - 6	Pressure (m H2O)	23.6
17	Red Pararapuquio 11 a.m	J - 2	Pressure (m H2O)	9.5
18	Red Pararapuquio 11 a.m	J - 10	Pressure (m H2O)	26.3
19	Red Pararapuquio 11 a.m	J - 4	Pressure (m H2O)	40.0
20	Red Pararapuquio 11 a.m	J - 19	Pressure (m H2O)	40.5
21	Red Pararapuquio 11 a.m	J - 14	Pressure (m H2O)	18.7

3.7.7.2 Estimación del nuevo coeficiente de rugosidad

La estimación del nuevo coeficiente se realizó en base a la aplicación de “Método Empírico de Ecuaciones Basadas en Estudios de Rugosidad por Antigüedad” detallado en el Manual técnico “M32” de la American Water Works Association (AWWA), este método se expresa en la ecuación que permite calcular la rugosidad en función de la edad de la tubería, su desarrollo se basó datos históricos sobre como la rugosidad de las tuberías cambian con el tiempo y planteando ecuaciones tipo en base al material de la tubería (AWWA, 2020).

Ecuación de estimación de nuevo coeficiente “C” para PVC:

$$C_{ajustado} = C_{inicial} - K \times (\text{edad}) \quad (4)$$

donde:

- $C_{ajustado}$ es el coeficiente de rugosidad actual.
- C_{nuevo} es el valor inicial de rugosidad (cuando la tubería era nueva recomendación “140”).
- K es la constante de desgaste (K) dependerá del material y condiciones de uso. Para tuberías de PVC, en sistemas de agua típicos, un valor de K puede tomar valores referenciales entre 0.1 y 0.2.y del entorno.
- **edad** es el tiempo en años desde la instalación de la tubería.

3.7.7.3 Variación de patrones de consumo

El valor inicial asignado a los patrones de consumo, es el promedio horario expresado en l/s, la variación de estos valores se realiza dentro del rango lecturas máximas y mínimas registradas en ese intervalo de tiempo los patrones de consumo “Patterns”.

3.7.7.4 Evaluación de la eficiencia del modelo

Tras corregir los valores de presión y asegurarse de que las diferencias fueran mínimas, se evaluó la eficiencia de la calibración utilizando el índice de Nash-Sutcliffe (E) y el error cuadrático medio normalizado (RSR).

$$E = 1 - \frac{MSE^{sim}}{MSE^{obs}} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{promedio})^2} \quad (5)$$

Donde:

- MSE^{obs} y MSE^{sim} representan el error cuadrático medio de los datos observados y simulados, respectivamente.
- Y^{obs} y Y^{sim} son los valores observados y simulados en el tiempo t .
- $Y^{promedio}$ es el valor promedio de los datos observados.
- n corresponde al número de intervalos temporales (Moriassi y Arnold, 2007).

El índice RSR relaciona la raíz del error cuadrático medio (RMSE) con la desviación estándar

de las observaciones. Este índice es adimensional y varía entre cero e infinito (Ramos, 2013).

El cálculo del RSR se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$RSR = \frac{RMSE^{sim}}{STDEV^{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{sim})^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t^{obs} - Y_t^{promedio})^2}} \quad (6)$$

Los valores sugeridos para definir el rendimiento se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 2

Valores sugeridos para medir el rendimiento de modelos hidráulicos

Rendimiento	RSR	E
Muy bueno	$0,00 \leq RSR \leq 0,50$	$0,75 < E \leq 1,00$
Bueno	$0,50 < RSR \leq 0,60$	$0,65 < E \leq 0,75$
Satisfactorio	$0,60 < RSR \leq 0,70$	$0,50 < E \leq 0,65$
Insatisfactorio	$RSR > 0,70$	$E \leq 0,50$

Fuente: (Moriasi y Arnold, 2007).

3.8 Elaboración del modelo de decaimiento de cloro

3.8.1 Monitoreo del PH del agua

El monitoreo del pH del agua se realizó en el reservorio y en 5 viviendas determinadas de manera estratégica, esto se hizo con la finalidad de verificar si los niveles se encontraban fuera de lo recomendado y podían incidir en el proceso de cloración, para ello se tomó una muestra in situ en cada punto utilizando multiparámetro para el reservorio y un comparador visual de pH en las viviendas.

Tabla 3

Puntos de monitoreo de pH

Vivienda	NORTE	ESTE	COTA	PROPIETARIO
R	9240356.15	812486.4	2980.15	RESERVORIO
3	9240492.35	813596.516	2866.22	MARIN MONTOYA
14	9240257.48	813511.788	2839.37	FRANCISCO
17	9240277.53	812863.169	2839.68	MUÑOZ MARIN ELIAS
26	9240084.99	813137.139	2816.16	MUÑOZ CHAVEZ CABINO
41	9239689.63	812950.178	2835.15	ORTIZ LLAMOGA MANUEL
				LUDEÑA CHAVEZ ABRAM

3.8.2 Determinación de dureza, manganeso y hierro

Para la determinación de estos parámetros se tomó una muestra de 800 ml de agua en la captación “Los tres melones” la cual abastece al caserío de Parapuquio, la determinación de la dureza se realizó empleando la metodología de titulación de la muestra con una solución de EDTA (ácido etilendiaminotetraacético), para el manganeso y el hierro se empleó el espectrofotómetro, estas metodologías se detallan a continuación:

3.8.2.1 Determinación de la dureza del agua

Procedimiento

1. Preparación de la muestra:

Medir 50 mL de la muestra de agua con una pipeta y transferirla a un matraz Erlenmeyer.

2. Añadir el buffer:

Agregar 1-2 mL del buffer de amoníaco/cloruro de amonio ($\text{pH} \approx 10$) a la muestra para mantener el pH constante durante la titulación.

El pH debe ser básico para que el EDTA reaccione eficazmente con los iones de calcio y magnesio.

3. Agregar el indicador:

Añadir una pequeña cantidad (2-3 gotas o punta de espátula) del indicador Eriocromo Negro T. La solución adquirirá un color rojo vinoso en presencia de calcio y magnesio.

4. Titulación con EDTA:

Llenar la bureta con la solución estándar de EDTA previamente preparada.

Titular la muestra lentamente, agitando constantemente, hasta que el color cambie de rojo vinoso a azul.

Este cambio de color indica que todo el calcio y magnesio han reaccionado con el EDTA, alcanzando el punto final.

5. Registrar el volumen de EDTA:

Anotar el volumen de EDTA gastado (en mL) desde la bureta.

Con el volumen de EDTA gastado se procedió a realizar los cálculos necesarios reemplazando en la siguiente formula:

$$\text{Dureza total (mg/L CaCO}_3\text{)} = \frac{V \cdot N \cdot 50,040}{V_{\text{muestra}}} \quad (7)$$

Donde:

V: Volumen de EDTA gastado (mL).

N: Normalidad del EDTA (0.01 o 0.02 N).

50,040: Peso equivalente del CaCO₃ en mg/L.

V_{muestra}: Volumen de la muestra en mL (50 mL).

Los valores obtenidos fueron los siguientes:

1. Se tomó una muestra de agua de 50 mL y se agregó el buffer de amoníaco/cloruro de amonio.
2. Se añadió el indicador Eriocromo Negro T, y la solución adquirió un color rojo vinoso.
3. Se tituló lentamente con la solución estándar de EDTA (0.01 N), agitando constantemente.
4. El color cambió de rojo vinoso a azul al alcanzar el punto final.
5. Se registró un volumen de EDTA gastado de 21.89 mL.
6. Finalmente, se calculó la dureza total del agua usando la fórmula, obteniendo un valor de 219 mg/L como CaCO₃

3.8.2.2 Determinación de la concentración de manganeso en el agua

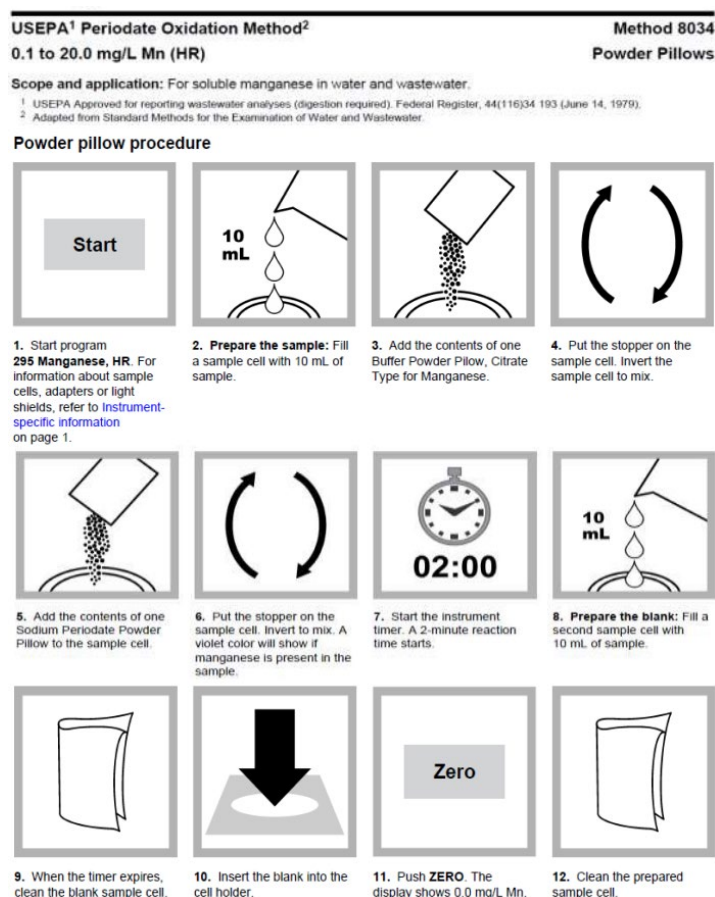
Procedimiento:

1. Llenar el recipiente con 10 mililitros de la muestra de agua.
2. Añadir los reactivos para el análisis de manganeso en el orden indicado:
3. Primero, agregar el contenido de un "Buffer Powder Citrate Type".
4. Agitar utilizando un movimiento vertical de muñeca.

5. Luego, incorporar a la mezcla el contenido de "Sodium Periodate".
6. Repetir el mismo procedimiento de agitación.
7. Dejar reposar la mezcla durante 2 minutos.
8. Preparar el segundo recipiente con 10 mililitros de la muestra de agua sin añadir reactivos.
9. Transcurrido el tiempo de reposo, colocar la muestra sin reactivo en el espectrofotómetro y medir el valor "Zero".
10. Una vez calibrado el "Zero", introducir la muestra con los reactivos y presionar el botón de "medir".
11. Registrar los datos obtenidos.

Figura 21

Metodología para ensayo de manganeso en espectrofotómetro



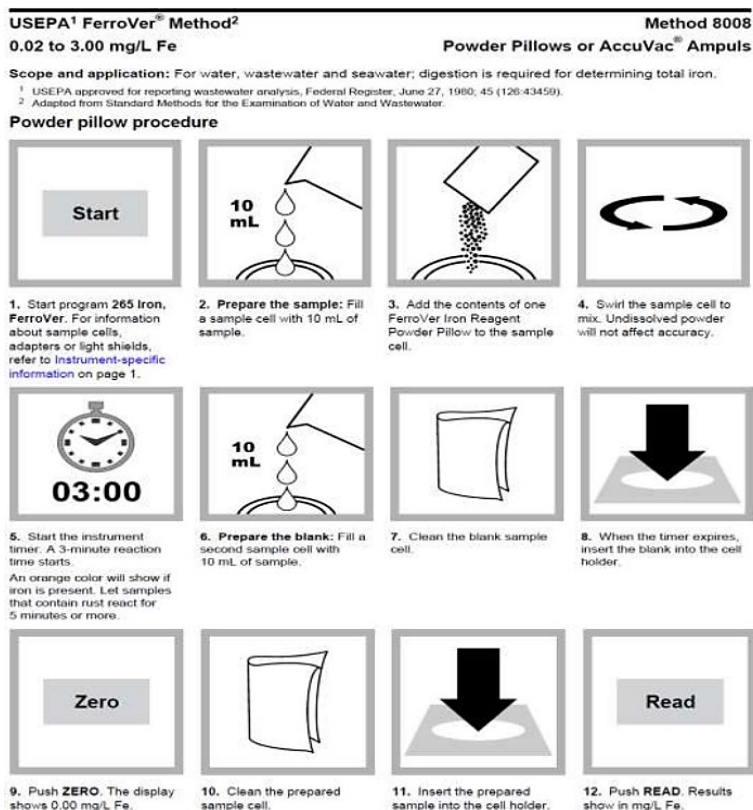
Fuente: Manual HACH DR 2700

3.8.2.3 Determinación de la concentración de concentración de hierro en el agua

1. Llenar una celda o recipiente con 10 mililitros de la muestra de agua.
2. Añadir el reactivo para hierro (FerroVer Iron Reagent).
3. Agitar según las indicaciones, asegurándose de realizarlo de manera adecuada; las partículas no disueltas no afectarán el resultado del ensayo.
4. Dejar reposar la celda con el reactivo durante 3 minutos, siguiendo el manual.
5. Preparar una segunda celda con 10 mililitros de la muestra de agua sin añadir reactivos.
6. Transcurrido el tiempo de reposo, colocar la muestra sin reactivo en el espectrofotómetro y ajustar el valor "Zero".
7. Una vez calibrado el "Zero", introducir la muestra con el reactivo en el espectrofotómetro y presionar el botón de "Medir".
8. Registrar los datos obtenidos.

Figura 22

Metodología para ensayo de hierro en espectrofotómetro



Fuente: Manual HACH DR 2700

3.8.3 Selección de puntos de monitoreo de cloro

Los puntos de muestreo se determinaron de manera estratégica y por conveniencia, se partió del principio de procesamiento de datos que utiliza WaterGEMS, este programa procesa la concentración de cloro en los nodos del modelo simulado; de igual manera, se consideró como base, la teoría de mezcla de solutos en los nodos de la red distribución de agua (García, 2019). Además, se consultó el "Manual de Cloración del Agua en Sistemas de Abastecimiento de Agua Potable en el Ámbito Rural", que recomienda ubicar los puntos de control al reservorio, en la parte intermedia de red y en puntos críticos que vendrían a ser las zonas más alejadas del sistema (Cooperación Alemana, 2017).

Tabla 4

Puntos de monitoreo de cloro

Punto	Nodo	Norte	Este	Cota	Propietario
C-9	J - 1	9240473.1	813357.2	2846.8	Marín Ríos Jaime
C-14	J - 2	9240257.5	813511.8	2839.4	Muñoz Marín Elías
C-19	J - 3	9239922.2	812666.7	2856.2	Chávez Chávez Rufino
C-17	J - 4	9240277.5	812863.2	2839.7	Muñoz Chávez Cabina
C-2	J - 6	9240518.3	813679.3	2855.2	Marín Acosta Mergen
C-3	J - 7	9240492.3	813596.5	2866.2	Marín Montoya francisco
C-1	J - 8	9240130.9	813803.3	2810.0	Ortiz Chávez juan
C-8	J - 9	9240507.2	813346.8	2848.4	Ortiz Ortiz elena
C-15	J - 10	9240610.6	813208.6	2852.6	Montoya Marín francisco
C- 26	J - 11	9240085.0	813137.1	2816.2	Ortiz Llamoga Manuel
C-31	J - 12	9240015.3	813302.4	2805.1	Ortiz Marín Wilmer
C-33	J - 13	9240047.2	813068.8	2821.2	Institución Educativa Primaria
C-35	J - 14	9240065.0	813000.2	2827.0	Montoya Chávez Marcelino
C -36	J - 15	9239967.2	813053.8	2820.0	Chávez Chávez José Mercedes
C- 38	J - 16	9239954.0	812905.9	2827.7	Muñoz Chávez Pedro
C- 41	J - 17	9239689.6	812950.2	2835.2	Ludeña Chávez Abram
C- 46	J - 18	9239594.2	813334.9	2813.5	Sánchez Ortiz Esequiel
C- 44	J - 19	9239466.7	812762.4	2868.1	Silva Muñoz Carmen

3.8.4 *Monitoreo de cloro residual*

La frecuencia del monitoreo de cloro residual, depende de la dinámica de la red y del grado de la variabilidad de la presencia de cloro. García (2019) menciona que, en sistemas del ámbito rural, desde el momento de la cloración, hasta la presencia del cloro en los nodos más lejanos y la estabilización de los valores de concentración, existe un intervalo de tiempo de hasta 72 horas.

3.8.5 *Monitoreo de cloro residual en la red de distribución*

En base a lo descrito anteriormente, la medición de cloro, se realizó dos veces por semana, tres veces al día, en 18 puntos, esto se hizo con la finalidad de ver la evolución de la concentración del cloro, durante los meses de junio, julio, agosto, la información recolectada en el mes de septiembre se utilizó para la validación del modelo. para tomar las muestras de cloro, se optó por los siguientes pasos:

- Se utilizó el comparador de cloro libre checker Hanna – hi 701, el cual cuenta con dos frascos de vidrio de 10 ml, uno contiene agua destilada que no contiene cloro, este se usó como la muestra 0, el otro frasco vacío se utilizara para tomar muestras en los distintos puntos de control.
- Abrir el grifo o caño de la vivienda y dejar correr el agua durante dos minutos.
- Se toma una muestra de 10 ml del grifo a la cual se agrega el reactivo
- Se introduce la muestra en blanco en el comparador de cloro libre checker Hanna hi 701, una vez leída la muestra en blanco el comparador nos pedirá introducir la muestra que contiene cloro, se presiona el botón de lectura del comparador iniciando un conteo de 1 min para darnos el valor del cloro residual, los valores se anotan en la ficha de registro de cloro señalando la hora y el lugar donde se realizó el control.

Figura 23

Monitoreo de cloro en el reservorio de Parapuquio



Figura 24

Monitoreo de cloro en red de distribución vivienda 37



3.8.6 Determinación de zonas críticas

Esto se determinó en base a toda la data de concentraciones de cloro residual, se seleccionaron las viviendas donde el cloro tenía las menores concentraciones o se veía un decaimiento repentino, esta información fue muy útil para el proceso de la simulación del modelo y la calibración de este ya que al identificarse un decaimiento considerable como en la vivienda 19, donde se tiene que asignar un valor de coeficiente K_b más lejano del cero, para tener un grado de similitud mayor entre los valores simulados y medidos en la red.

3.8.7 Determinación del orden de la reacción

En base a los datos recolectados fue necesario calcular el orden de reacción, en el caso del cloro según establece que es de orden uno, esto significa que la velocidad de reacción depende de la concentración de un solo reactivo en este caso el cloro (Priori y Acurio, 2021; Tuero y Huamani, 2021), el proceso consiste en tomar los valores del tiempo y de la concentración cloro residual de un día a la vez, se graficara en la recta de las X el tiempo en segundos y en el eje de las Y en logaritmo natural “ln” de la concentración del cloro para dicho tiempo, al término de esto se unirán los puntos generando así una curva de reacción para cada punto.

3.8.8 Determinación de k_b

Para poder simular el comportamiento del cloro necesitamos un valor promedio de como decae este en función al tiempo k_b , utilizando Excel de determino la ecuación de la pendiente de cada gráfico de primer orden, c, se puede expresar en función a la siguiente ecuación.

$$C = C_o * e^{-K_b, t} \quad (8)$$

Donde “C” viene a ser la concentración, “ C_o ” la concentración inicial, “ k_b ” el coeficiente de decaimiento de cloro en base a la reacción con la masa de agua, y t es el tiempo

en segundos en transcurrido entre C y Co; En base a la ecuación anterior se obtiene el kb para cada punto de muestreo, luego se realizó el promedio mensual de los dos primeros meses para toda la red y así se obtiene el valor representativo del coeficiente de decaimiento, los valores de los meses de agosto y septiembre fueron de utilidad para la validación del modelo de decaimiento de cloro usando la metodología de división de datos (Priori y Acurio, 2021).

3.8.9 Simulación inicial del modelo de decaimiento de cloro

Se ha iniciado del modelo de la red de distribución calibrado en base a las presiones y caudales simultáneos, en el software WaterGEMS, haciendo uso de la herramienta "Water Quality", la cual nos permite hacer un seguimiento de la calidad del agua y de cualquier constituyente presente en esta. Se realizaron dos simulaciones: en la primera se consideró solamente "kb" y en la segunda los coeficientes "kb" y "kw". Esto se basó en el estudio de Tuero y Huamani (2021), que resaltaron la importancia en sistemas de abastecimiento de agua que tienen servicio continuo, ya que en horas donde no se está dando el consumo, el cloro sigue decayendo debido a la reacción con la pared de la tubería, "kw". Los valores para el coeficiente de reacción kw se tomaron de estudios anteriormente aplicados en investigaciones preliminares, ya que su cálculo es complejo debido a que se consideran muchos factores físicos de la red, como la edad de la red, la rugosidad, el material, etc.

Al realizar la primera simulación solo con el coeficiente "kb", los valores de cloro en los nodos no coinciden y se mantienen estáticos durante las horas en las que no hay consumo de agua en la red de distribución. Por ello, fue necesario realizar la segunda simulación considerando los dos coeficientes, "kb" y "kw".

3.8.10 Etapa de calibración

En la etapa de calibración, se asignan valores de kb a los distintos nodos de la red de distribución. Dado que las simulaciones iniciales indican que el decaimiento de cloro no se produce de igual manera en todos los ramales de la red, los valores de kb para cada ramal serán

el promedio ponderado mensual de todos los valores calculados de kb de cada nodo que conforma dicho ramal, en contraste los valores para kw se ajustan a partir del valor porcentual de kb y su equivalencia del mismo en base al valor que asume kb. Se modificó el valor de kb cuando fue necesario, basándonos en los muestreos de los dos primeros meses. Posteriormente, continuamos con los ensayos comparando los valores de concentración en campo con los simulados en el modelo de decaimiento de cloro. Esto se llevó a cabo hasta que existió una semejanza superior al 95 % en la correlación de los valores, de acuerdo con lo establecido por (Rossman, 1993).

3.8.11 Validación del modelo de decaimiento de cloro

Para la validación del modelo de decaimiento de cloro, nos basamos en la metodología de Priori y Acurio (2021), este método se fundamenta en que los valores de calibración deben ser diferentes de los de validación y representar diferentes condiciones operativas en los 18 puntos de muestreo de la red de distribución de agua, comparando los valores observados en campo con los simulados, esto se realizó con datos medidos en campo durante el mes de septiembre, se escogieron 10 viviendas acceso donde se midió las concentraciones de cloro en diferentes horas, estos valores se compararon posteriormente con los simulados en el modelo de decaimiento de cloro en ese mismo intervalo de tiempo del día.

3.8.12 Análisis del grado de similitud del modelo de decaimiento de cloro

Después de validar el modelo de decaimiento de cloro, fue esencial analizar el grado de similitud entre las concentraciones de cloro simuladas y medidas en campo, Tzatchkov (2016) señala que si el porcentaje de similitud supera el 80 %, se considera que la relación entre los valores es alta, lo que indica que el modelo tiene un buen desempeño y puede proporcionar resultados confiables al aplicar métricas como el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y el error cuadrático medio normalizado (RMSE). Por otro lado, si el porcentaje de similitud está entre el 50 % y el 80 %, la relación puede calificarse como moderada o baja, lo que sugiere

la necesidad de ajustes adicionales. Valores inferiores al 50 % indicarían un grado de similitud muy bajo, comprometiendo la validez del modelo para predicciones futuras. Estas métricas permiten evaluar la precisión del modelo y orientar procesos de calibración más detallados.

3.8.13 Método de análisis de datos

Antes de seleccionar el análisis estadístico, se realizó un análisis paramétrico para verificar si los datos obtenidos entre las dos variables seguían una distribución normal. Este paso fue clave para determinar si era adecuado aplicar una prueba estadística de tipo paramétrica o no paramétrica.

Para el análisis de los datos, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, una herramienta empleada para evaluar la calibración y validación del modelo. Este coeficiente tiene un valor óptimo de 1 (correlación positiva perfecta) o -1 (correlación negativa perfecta). Para analizar la significancia y los intervalos de confianza del coeficiente de correlación, se utilizó un nivel de significancia (α) del 5%.

La prueba estadística de Pearson permite determinar si existe una relación significativa entre las variables o si estas son independientes. En este contexto, la hipótesis nula (*H₀*) establece que el coeficiente de correlación es igual a cero, es decir, que no hay relación entre las variables. Rechazar la hipótesis nula implica que las variables están correlacionadas (Ramos, 2013).

1. Si $r = \text{cero}$ significa que no hay asociación o correlación entre las dos variables.
2. Si $0 < r < 0.25$ = débil correlación.
3. Si $0.25 \leq r < 0.75$ = intermedia correlación.
4. Si $0.75 \leq r < 1$ = fuerte correlación.
5. Si $r = \pm 1$ = perfecta correlación.

Tabla 5

Características del análisis y pruebas paramétricas y no paramétricas.

	Análisis paramétrico	Análisis no paramétrico
Consideraciones	Debe contar con normalidad y homocedasticidad.	Menor presunción y alcance más amplio
Variables	Aplicable a variables nominales	Aplicable en variables categóricas.
Valores perdidos	No se consideran una fuente de información.	Se consideran una fuente de información.
Generalidades	-Se conoce el modelo de distribución de la población.	Se desconoce cómo están distribuidos los datos.
	-Mientras más grande sea la muestra más exacta será la estimación, mientras más pequeña, más distorsionada será la media de las muestras.	-Se puede utilizar, aunque se desconozca los parámetros de la población en estudio. -Es utilizada para contrastar con la hipótesis.
	-Las hipótesis se basan en valores numéricos, especialmente en promedios.	-Las hipótesis se redactan sobre rangos, mediana o frecuencia de ellos datos.
	-Más eficiencia.	-Empleada en diferentes situaciones porque no cumple con parámetros estrictos. -Sus métodos son más afables. -Se aplica en datos no numéricos.
Ventajas	-Poca probabilidad de errores.	-Muestras pequeñas.
	-Sus estimaciones son exactas.	
	-Presentan sensibilidad a los rasgos de los datos recogidos.	
	-Muestras grandes	
Estadística de 2 muestras relacionadas	Correlación de Pearson	Wilcoxon de los Signos Mc Nemar.

Nota. Esta tabla explica los criterios de elección de la prueba de correlación de Pearson, tomado de (Mayorga Ponce y otros, 2022).

CAPITULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Modelo hidráulico de la red de distribución de agua

4.1.1 Descripción de la red de distribución

La red de distribución de agua (RDA) es de tipo abierta o ramificada, este diseño se debe a que la población se ha desarrollado a lo largo de la carretera y cuenta con viviendas dispersas; El suministro se realiza por gravedad desde un reservorio de 18 m³, las tuberías son de PVC y tienen una longitud aproximada de 4,8 Km, los diámetros nominales de las tuberías existentes son de 1" y 1/2" (in) con longitudes de 2947 m; 1,820 m respectivamente. Existen actualmente, tres cámaras rompen presión tipo 7, debido a las pronunciadas pendientes; abastece a un total de 45 viviendas y dos instituciones educativas de inicial y primaria.

4.1.2 Modelo hidráulico obtenido en WaterGEMS

Luego de haber generado y comprobado la funcionalidad de la geometría de la red implementada en el programa WaterGEMS, se evaluó el modelo hidráulico, el resumen se muestran en la Tabla 6, el resultado de la red diseñada se muestra en el Anexo 6 donde figuran todos los nodos con sus respectivas cotas de terreno, caudales unitarios.

Tabla 6

Resumen de modelo hidráulico

Componentes	Cantidad
Número de edificaciones abastecidas (Customer Meters)	47
Numero de reservorios	1
Numero de tuberías en el modelo	21
Numero de nodos	18
Numero de cámaras rompe presión	3
Numero de Válvulas de control	7

Fuente: Elaboración propia a partir de plano de la red de distribución.

4.1.3 Mediciones de presiones y caudales

Las mediciones de caudales mostrados en la Tabla 7, registradas durante siete días reflejan dos picos principales, uno en la mañana entre 8 a.m. a 10 a.m. y otro en la tarde a partir de las 17 horas o 5 p.m., con caudales menores durante el resto del día, en contraste el fin de semana, se registran una disminución en consumo de agua con menos variabilidad que en días laborables, lo cual es consistente con la menor actividad y el enfoque en actividades fuera del hogar, como el comercio o actividades religiosas.

Tabla 7

Registro de caudales de consumo

Hora	Caudales en l/s						
	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
7	0.251	0.218	0.286	0.235	0.275	0.200	0.180
8	0.348	0.329	0.382	0.315	0.342	0.268	0.240
9	0.505	0.543	0.518	0.557	0.533	0.428	0.403
10	0.404	0.380	0.440	0.417	0.386	0.339	0.308
11	0.222	0.208	0.230	0.202	0.192	0.157	0.140
12	0.180	0.165	0.174	0.153	0.163	0.119	0.106
13	0.126	0.112	0.134	0.122	0.101	0.080	0.064
14	0.088	0.071	0.093	0.082	0.070	0.051	0.041
15	0.153	0.138	0.161	0.131	0.142	0.102	0.090
16	0.203	0.188	0.220	0.194	0.173	0.143	0.122
17	0.479	0.425	0.464	0.443	0.450	0.363	0.341

Nota: Los caudales registrados son la transformación en l/s del volumen medido cada hora a partir de las 7 a.m. (los registros diarios se muestran en el Anexo 8).

La Tabla 8 muestra el promedio de las presiones registradas durante los 7 días de monitoreo simultaneo en las 8 viviendas, estos datos se utilizaron para la elaboración y calibración del modelo, los valores revelan una disminución en los valores de las presiones en el horario de 7 a 9 a.m. luego se mantiene constante hasta el intervalo de 3 a 5 p.m. Las viviendas

C1 y C14, no muestran variaciones en la lectura esto se debe la existencia de pocas viviendas que se alimentan de ese ramal, y a la topografía muy pronunciada donde se encuentran ubicadas; las viviendas C2 y C15 al encontrarse en la parte alta, y alimentándose del ramal principal son más susceptible a la variación de presiones, las C31, C35 y C44 al encontrarse en el ramal que abastece a más edificaciones, muestra que los puntos más elevados (C31 Y C35) tienen una fluctuación de presiones más notables, en comparación con la vivienda C44 que es la más alejada y pertenece al mismo ramal.

Tabla 8

Media de presiones registradas

Hora	Presiones (m.c.a)							
	C1	C2	C14	C15	C17	C31	C35	C44
7:00	68.5	21.7	9.5	24.5	39.6	38.8	17.6	15.6
9:00	68.2	16.9	9.3	19.9	38.6	38.3	17.2	15.1
11:00	68.7	23.6	9.5	26.3	40	40.5	18.7	15.8
13:00	68.6	24.5	9.5	27.1	40.2	40.6	18.8	15.6
15:00	68.1	23.9	9.5	26.6	40.1	40.6	17.6	15.5
17:00	68.5	21.1	9.5	23.9	39.5	39.6	17.9	15.3

Nota: Las presiones mostradas son el promedio de las registradas cada dos horas durante 7 días.

4.1.4 Simulación inicial

Los valores asignados para patrones de consumo son el promedio horario de las lecturas diarias registradas de los caudales salientes del reservorio (Pattern) registrado en el total de 7 días como se muestran en la siguiente tabla:

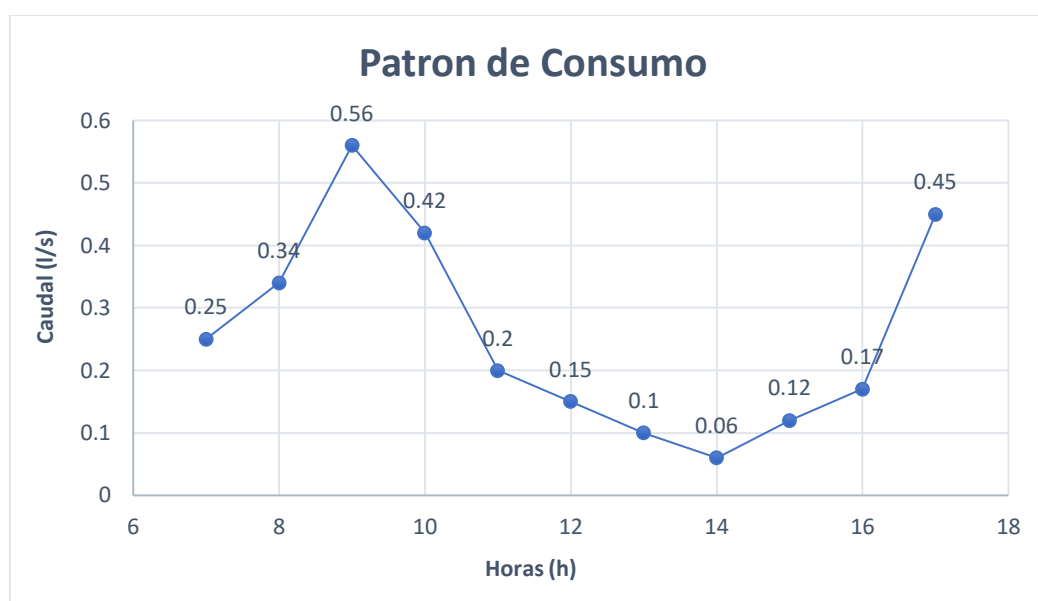
Tabla 9

Patrones de consumo iniciales para modelo hidráulico

Hora	Caudal promedio (l/s)
7:00	0.25
8:00	0.34
9:00	0.56
10:00	0.42
11:00	0.2
12:00	0.15
13:00	0.1
14:00	0.06
15:00	0.12
16:00	0.17
17:00	0.45

Figura 25

Grafica de patrones de consumo



Para la asignación de presiones se registró en cada vivienda las lecturas promedio cada 2 horas, estos se muestran en la Tabla 8 del capítulo anterior, con estos valores se realizó la primera simulación

4.1.5 Comparación inicial de presiones medidas y simuladas

Se analizó los datos de presiones simuladas en el modelo hidráulico en un periodo extendido de 24 horas, se comparó presiones simuladas, con las medidas en campo a esa misma hora, esto se hizo en las 8 viviendas de la muestra. Los resultados de estas mediciones se presentan en la Tabla 10, se puede observar el error porcentual supera hasta en un 40% al valor medido en campo; La comparativa evidencia diferencias significativas en las presiones de algunas viviendas, por lo cual es imperativo calibrar el modelo hidráulico; el registro de presiones se muestra en el Anexo 8.

Tabla 10

Comparativa entre las presiones medidas y las presiones simuladas inicialmente

Hora	Presion (m.c.a.)	Viviendas							
		C1	C2	C14	C15	C17	C31	C35	C44
07:00	Med.	68.5	21.7	9.5	24.5	39.6	40.3	18.6	15.6
	Sim.	70.2	25	12	20	32	43	22	16.5
	Error(%)	6.7%	20.1%	21.3%	18.4%	19.2%	6.7%	18.3%	5.8%
09:00	Med.	67.2	16.9	9.3	19.9	38.6	39.8	18.2	15.1
	Sim.	72	15	10	25.5	35	32	14	12
	Error(%)	7.1%	11.2%	7.5%	28.1%	9.3%	19.6%	23.1%	10.5%
11:00	Med.	68.7	23.6	9.5	26.3	40	40.5	18.7	15.8
	Sim.	73.3	26	9	27.5	41	47	19	17
	Error(%)	16.4%	10.2%	5.3%	4.6%	2.5%	16.0%	1.6%	7.6%
13:00	Med.	69.6	24.5	9.5	27.1	40.2	40.6	18.8	15.8
	Sim.	63.2	19	8	24.3	36.4	46.1	20.5	18
	Error(%)	20.3%	22.5%	15.8%	20.1%	22.6%	21.2%	9.0%	13.9%
15:00	Med.	69.1	23.9	9.5	26.6	40.1	40.6	18.8	15.8
	Sim.	63	27	11.5	29	39	38	15	12.5
	Error(%)	8.8%	13.0%	21.1%	9.0%	2.7%	6.4%	20.2%	20.9%
17:00	Med.	67.5	21.1	9.5	23.9	39.5	40.3	18.5	15.5
	Sim.	76	17	10	22	33	42	17.5	15
	Error(%)	20.0%	22.1%	5.3%	7.9%	16.5%	4.2%	5.4%	3.2%

El análisis de la Tabla 10 refleja que los valores de presión medidos y simulados presentan una variación que supera el 20% del error porcentual, superando los rangos aceptables según indica Walski (2004), por lo tanto, es necesario desarrollar una etapa de calibración.

4.1.6 Calibración del modelo hidráulico

4.1.6.1 Estimación del nuevo coeficiente de rugosidad para calibración del modelo

La edad estimada de las tuberías fue de 22 años en base a la información suministrada por pobladores y encargados de la JASS, el material es PVC, con estos datos se empleó la fórmula empírica para ajustar el coeficiente de Hazen-Williams “C” en función de la edad.

Cálculo:

Para PVC de 22 años de antigüedad, se usó la siguiente fórmula de ajuste:

$$C_{\text{ajustado}} = C_{\text{inicial}} - K \times (\text{edad}) \quad (9)$$

donde:

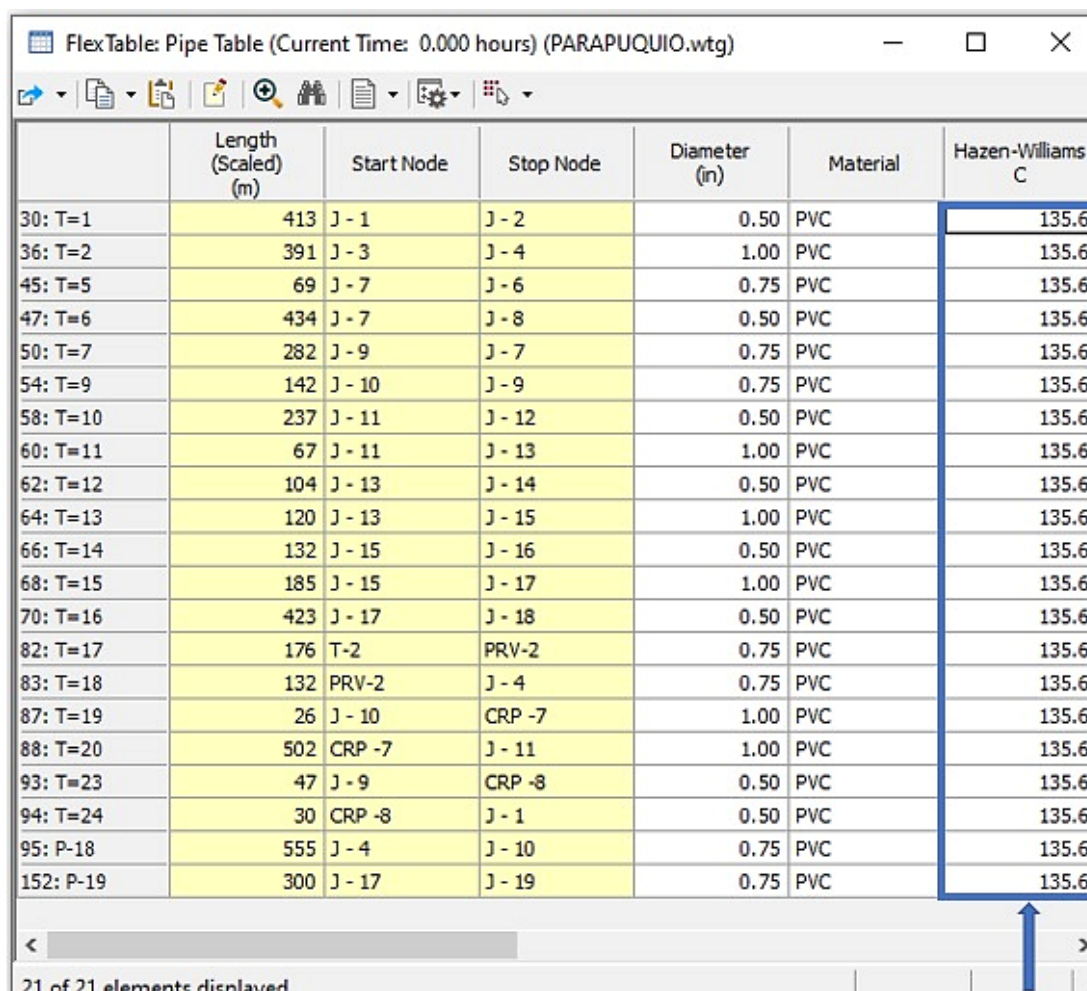
- $C_{\text{inicial}}=140$ (valor inicial para PVC nuevo).
- $\text{edad}=22$ años.
- K es la constante de desgaste. Asumiremos $K=0.2$ (cuando la edad de la tubería esta entre 20 a 50 años), ya que el PVC suele mantener su rugosidad, pero podría experimentar un leve incremento con el tiempo (Walski, 2004).

$$C_{\text{ajustado}} = 140 - (0.2 \times 22)$$

El nuevo coeficiente de rugosidad de Hazen-Williams C ajustado para las tuberías de PVC con 22 años de antigüedad es 135.6. Este valor se asignó uniformemente a todas las tuberías en tu modelo para reflejar la posible reducción en la suavidad interna debido a la antigüedad.

Figura 26

Asignación de nuevos coeficientes estimados de rugosidad de Hazen-Williams al modelo hidráulico.



	Length (Scaled) (m)	Start Node	Stop Node	Diameter (in)	Material	Hazen-Williams C
30: T=1	413	J - 1	J - 2	0.50	PVC	135.6
36: T=2	391	J - 3	J - 4	1.00	PVC	135.6
45: T=5	69	J - 7	J - 6	0.75	PVC	135.6
47: T=6	434	J - 7	J - 8	0.50	PVC	135.6
50: T=7	282	J - 9	J - 7	0.75	PVC	135.6
54: T=9	142	J - 10	J - 9	0.75	PVC	135.6
58: T=10	237	J - 11	J - 12	0.50	PVC	135.6
60: T=11	67	J - 11	J - 13	1.00	PVC	135.6
62: T=12	104	J - 13	J - 14	0.50	PVC	135.6
64: T=13	120	J - 13	J - 15	1.00	PVC	135.6
66: T=14	132	J - 15	J - 16	0.50	PVC	135.6
68: T=15	185	J - 15	J - 17	1.00	PVC	135.6
70: T=16	423	J - 17	J - 18	0.50	PVC	135.6
82: T=17	176	T-2	PRV-2	0.75	PVC	135.6
83: T=18	132	PRV-2	J - 4	0.75	PVC	135.6
87: T=19	26	J - 10	CRP -7	1.00	PVC	135.6
88: T=20	502	CRP -7	J - 11	1.00	PVC	135.6
93: T=23	47	J - 9	CRP -8	0.50	PVC	135.6
94: T=24	30	CRP -8	J - 1	0.50	PVC	135.6
95: P-18	555	J - 4	J - 10	0.75	PVC	135.6
152: P-19	300	J - 17	J - 19	0.75	PVC	135.6

En comparativa a este resultado, La publicación *Hanbook of PVC Pipe Design and construction*, recomienda un valor inicial de “C” de 140 en simulación de modelos hidráulicos para tuberías nuevas de PVC, debido a la superficie lisa del material, lo que generalmente reduce la fricción y aumenta el flujo en comparación con materiales más antiguos. Sin embargo, conforme las tuberías de PVC envejecen y desarrollan cierta rugosidad en la superficie, el coeficiente puede disminuir ligeramente, acercándose al valor estimado entre 130-140 observado en tuberías envejecidas (PVC Pipe Association, 2012).

Además, estudios citados por IPEX indican que incluso las tuberías de PVC envejecidas

mantienen valores de “C” elevados, frecuentemente entre 130-140, gracias a la resistencia del PVC a la formación de incrustaciones internas y al aumento de la rugosidad, lo que lo hace menos susceptible a pérdidas por fricción a lo largo del tiempo en comparación con otros materiales como el hierro fundido o el hierro dúctil, los cuales experimentan un mayor deterioro (IPEX, 2022).

4.1.6.2 Variación de patrones de consumo para calibración del modelo

La variación de los patrones de consumo se realizó en base a las lecturas medidas y registradas de los caudales salientes del reservorio, considerando el intervalo de los valores máximos y mínimos en base al análisis de las presiones medidas y las simuladas:

Tabla 11

Intervalo de variación horaria para patrones de consumo

Hora	Caudal	Caudal
	Mínimo (L/s)	Máximo (L/s)
07:00	0.18	0.29
08:00	0.24	0.38
09:00	0.40	0.56
10:00	0.31	0.44
11:00	0.14	0.23
12:00	0.11	0.18
13:00	0.06	0.13
14:00	0.04	0.09
15:00	0.09	0.16
16:00	0.12	0.22
17:00	0.34	0.48

Consideraciones para la selección valores de patrones de consumo:

- Uso del promedio de caudales: El valor promedio se usó como punto de partida con mayores o menores consumos en función de los patrones observados.

- Horas pico y horas de bajo consumo: Los valores de caudal en las horas en las que las presiones simuladas y medidas son cercanas se mantienen sin ajustarlas, manteniendo el error bajo el 20%.
- Reducción del coeficiente de Hazen-Williams: El ajuste de este coeficiente (de 140 a 135.6) redujo ligeramente las presiones en el sistema, lo cual ajustó las simulaciones hacia valores más reales.

Después de haber realizado el análisis de los valores de los caudales mostrados en la Tabla 7, se seleccionaron aquellos que mantienen errores porcentuales por debajo del 20% en el mayor número de viviendas, y se muestran a continuación:

Tabla 12

Patrones de consumo finales usados para el modelo calibrado

Hora	Patrón de consumo (L/s)
07:00	0.21
08:00	0.34
09:00	0.56
10:00	0.42
11:00	0.20
12:00	0.15
13:00	0.06
14:00	0.04
15:00	0.09
16:00	0.14
17:00	0.47

Justificación de la selección:

- **Horas Pico** (como 09:00 y 17:00): Se ha elegido un caudal cercano a los valores más altos (0.56 y 0.45 L/s) debido al aumento en el consumo, que usualmente reduce la presión en estas horas, lo cual se alinea con la calibración que has realizado.

- **Horas de Bajo Consumo** (como 13:00 y 14:00): Se han elegido caudales bajos (0.10 y 0.06 L/s) para reflejar un consumo menor y, por lo tanto, una presión simulada más alta, que contribuye a reducir el error en las horas donde el consumo es bajo.

Tabla 13

Resultados de calibración de modelo hidráulico

Hora	Presión (m.c.a.)	Viviendas								E	RSR
		C1	C2	C14	C15	C17	C31	C35	C44		
07:00	Med.	68.5	21.7	9.5	24.5	39.6	40.3	18.6	15.6	0.9237	0.3416
	Sim.	60	19	10	22	37	42	20	16		
	Error(%)	12.4%	12.4%	5.3%	10.2%	6.6%	4.2%	7.5%	2.6%		
09:00	Med.	67.2	16.9	9.3	19.9	38.6	39.8	18.2	15.1		
	Sim.	70	18.5	10	21.5	36.5	38.5	17	14		
	Error(%)	4.2%	9.5%	7.5%	8.0%	5.4%	3.3%	6.6%	7.3%		
11:00	Med.	68.7	23.6	9.5	26.3	40	40.5	18.7	15.8		
	Sim.	69	25.5	10	27	39.5	39.5	19	16		
	Error(%)	0.4%	8.1%	5.3%	2.7%	1.3%	2.5%	1.6%	1.3%		
13:00	Med.	69.6	24.5	9.5	27.1	40.2	40.6	18.8	15.8		
	Sim.	66	21	9	26	38	39.5	19	15.5		
	Error(%)	5.2%	14.3%	5.3%	4.1%	5.5%	2.7%	1.1%	1.9%		
15:00	Med.	69.1	23.9	9.5	26.6	40.1	40.6	18.8	15.8		
	Sim.	66.5	25	10	27	39	39	18	16		
	Error(%)	3.8%	4.6%	5.3%	1.5%	2.7%	3.9%	4.3%	1.3%		
17:00	Med.	67.5	21.1	9.5	23.9	39.5	40.3	18.5	15.5		
	Sim.	68	20.5	9.8	23.5	38.5	39.5	18	15		
	Error(%)	0.7%	2.8%	3.2%	1.7%	2.5%	2.0%	2.7%	3.2%		

4.1.6.3 Eficiencia del modelo hidráulico

Los resultados de la eficiencia de la calibración se detallan en la Tabla 14, donde (E) alcanza un valor de 0,9237, mientras que RSR presenta un valor de 0,3416; ambos indicadores sugieren una calificación "muy buena" de acuerdo a los valores de la tabla 2.

En consecuencia, se puede concluir que el modelo ha sido calibrado de manera apropiada, demostrando una capacidad notable para representar con precisión el comportamiento real del sistema de abastecimiento.

Tabla 14*Índices de eficiencia de la calibración hidráulica*

Índice	Calibración	
	Valor	Calificación
E	0.9237	Muy bueno
RSR	0.3416	Muy bueno

4.2 Evaluación del Modelo de Decaimiento de Cloro**4.2.1 Monitoreo del PH del agua**

Los valores de PH medidos en la red de distribución registrados en el reservorio y en 5 viviendas revelan valores cercanos a 8, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 15*Resultados de monitoreo de PH*

PUNTO	PH medido	DESCRIPCIÓN
Res.	7.86	Reservorio
3	7.9	Vivienda
14	8.09	Vivienda
17	8.02	Vivienda
26	8.07	Vivienda
41	7.95	Vivienda

Análisis de los datos de PH:**Reservorio (7.86):**

- El pH está ligeramente fuera del rango ideal para la desinfección óptima.
- El desinfectante seguirá funcionando, pero con menor eficacia. Se podría requerir un aumento en la dosis de hipoclorito de calcio para mantener un nivel adecuado de cloro residual.

Viviendas (7.90 - 8.09):

- En todas las viviendas, el pH supera el rango ideal.
- La proporción de ácido hipocloroso disminuye, lo que reduce la capacidad

desinfectante.

- Este rango de pH puede permitir que ciertos microorganismos sean menos susceptibles al desinfectante.

4.2.2 Resultados de dureza, manganeso y hierro

Los parámetros analizados (dureza, manganeso y hierro) se encuentran todos muy por debajo de sus respectivos límites máximos permisibles según la normativa. Ninguno de ellos afecta de manera significativa la cloración ni la efectividad del hipoclorito de calcio como desinfectante en el sistema analizado; la estabilidad del cloro residual no será alterada por estos niveles de dureza, manganeso o hierro.

Tabla 16

Resultados de dureza, hierro y manganeso

PARAMETRO	Resultado (mg/l)	Límite máximo permisible (mg/l)
Dureza (mg/l)	219	500
Manganeso (mg/l)	0.003	0,4
Hierro (mg/l)	0.023	0,3

4.2.3 Monitoreo de Cloro residual

El monitoreo de cloro residual realizado en 18 viviendas y en el reservorio revela una preocupante realidad. En el reservorio se registró una concentración promedio de 0.45 mg/l de cloro residual, mientras que el análisis de las muestras tomadas en la red de distribución muestra un promedio mensual por nodo con valores significativamente menores. El nodo 4, el más cercano al reservorio, presentó la concentración máxima de 0.36 mg/l en el día uno, medida seis horas después de la cloración en el reservorio, este valor decae hasta 0.2 mg/l al estabilizarse las concentraciones (ver figura 26). En contraste, el nodo 13 registró la concentración mínima de 0.01 mg/l, evidenciando un marcado decaimiento a medida que el

agua se distribuye por la red.

La figura 25 muestra que los valores de cloro residual iniciales suelen ser elevados y, con el tiempo, se estabilizan en un rango de variación con una tendencia relativamente constante. En algunos nodos, la presencia de cloro se registra al segundo día de habilitar el sistema de cloración, mientras que en otros ocurre aproximadamente cuatro horas después. Esto coincide con lo señalado por García (2019), quien indica que la dinámica del cloro puede tardar hasta 72 horas en alcanzar una tendencia estable, la figura 26, 27 y 28 muestran que al segundo día las concentraciones de cloro en los nodos intermedios el cloro residual tiende a estar entre 0.1 y 0.2 mg/L, muestran una tendencia de variación entre estos rangos.

Figura 27

Grafico de resultados de monitoreo de cloro residual en las viviendas ubicadas extremos de la red

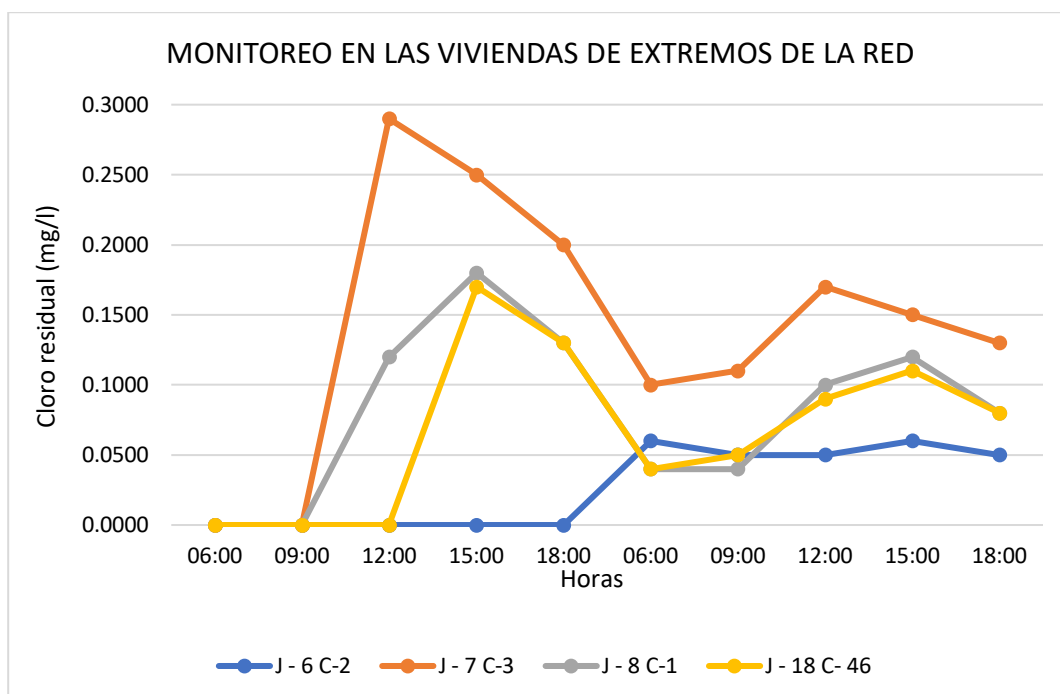


Figura 28

Grafico de resultados de monitoreo de cloro residual en los nodos extremos de la red

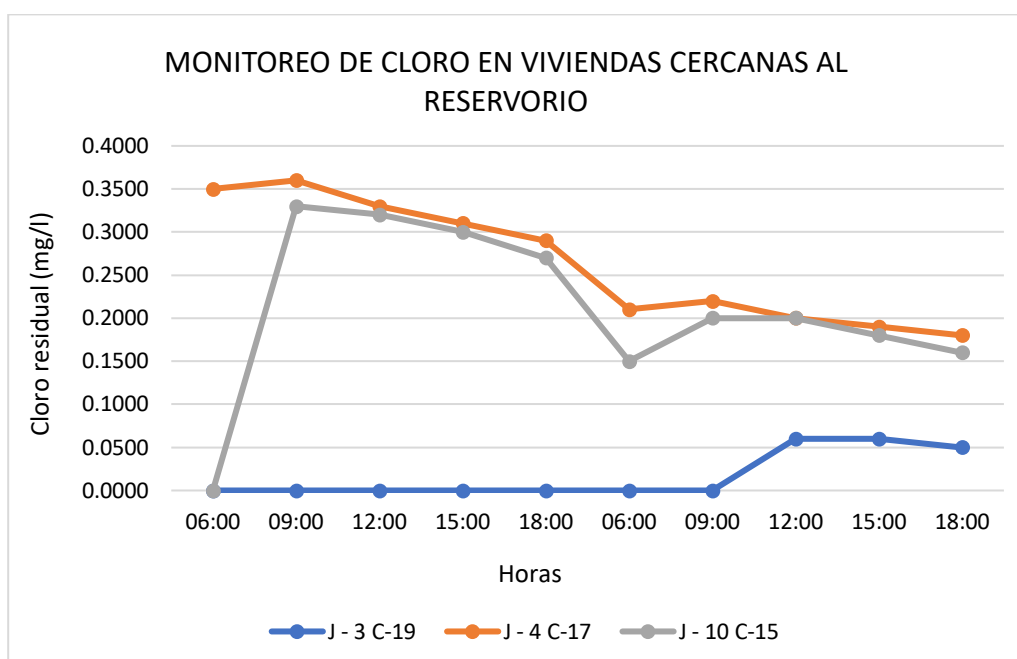


Figura 29

Monitoreo de cloro en viviendas 9,14,8,15,26 en zona intermedia de la red

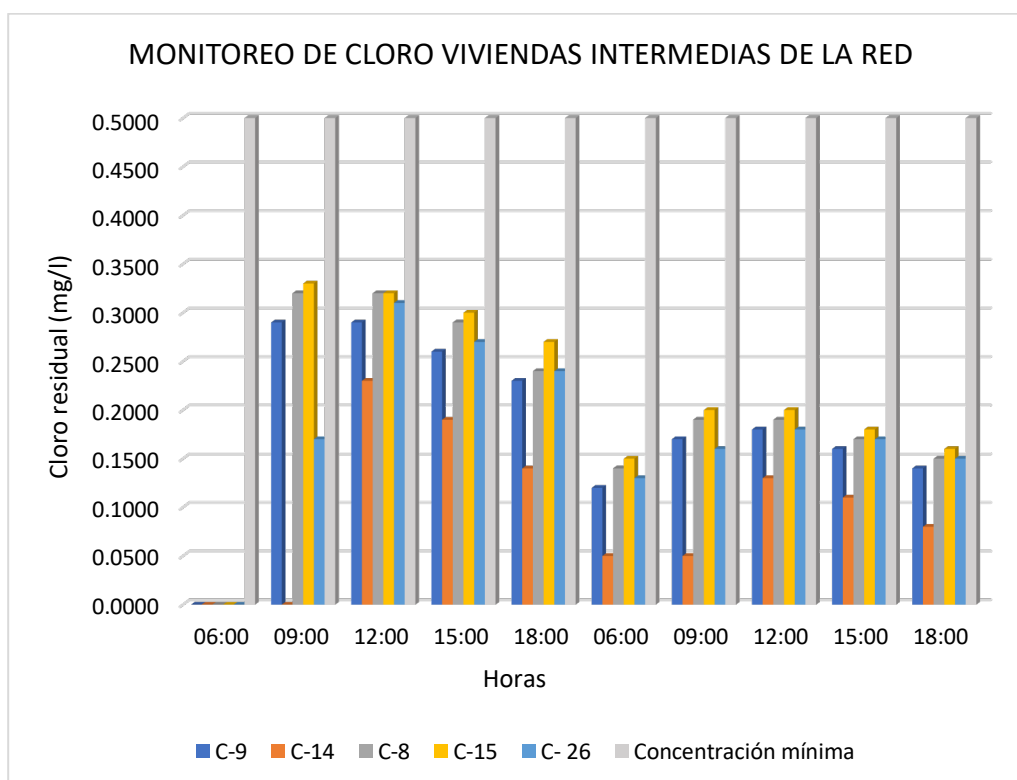
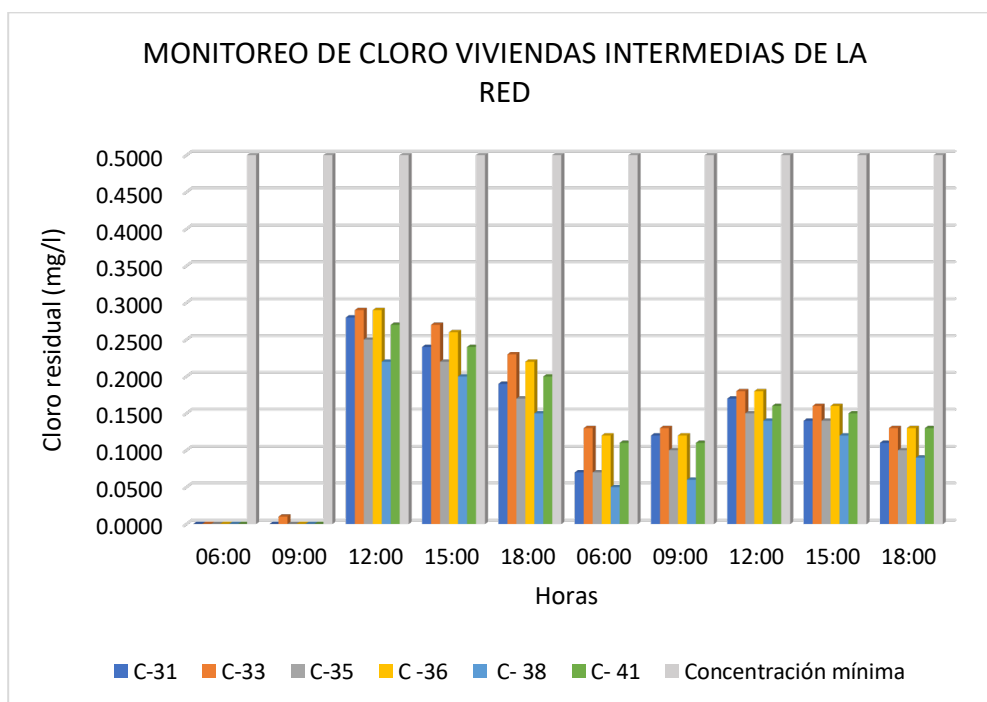


Figura 30

Monitoreo de cloro en viviendas 31,33,35,36,38 y 41 en zona intermedia de la red

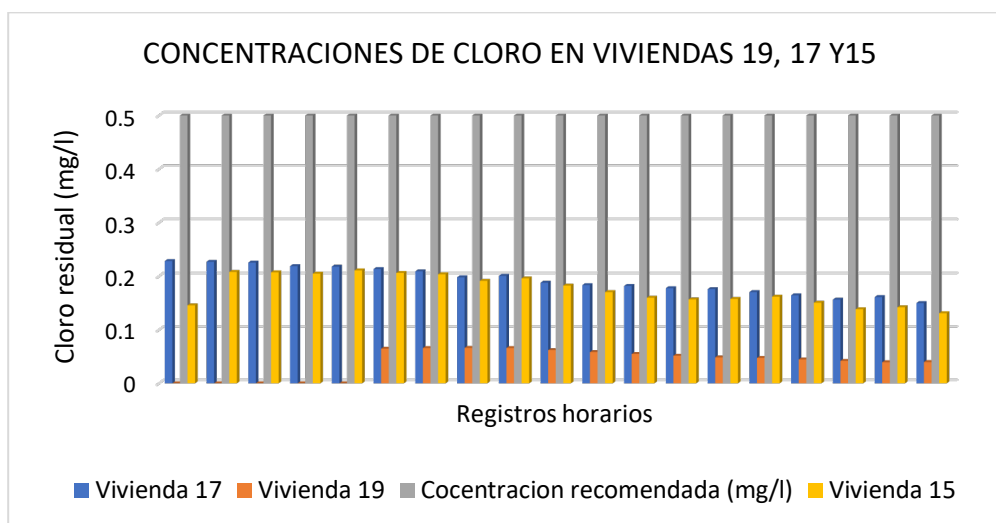


4.2.4 Identificación de puntos críticos

El análisis de las concentraciones de cloro residual revela como uno de los puntos crítico a la vivienda 19, para el análisis se tomó de referencia la vivienda intermedia N° 17 que presenta concentraciones de hasta 0.3 mg/l siendo la más cercana al reservorio, por el contrario la vivienda 19 ubicada a una distancia de 300 metros hacia el sur-oeste de la numero 17 presenta valores cercanos al 0.05, hacia el nor-este de la numero 17 se encuentra ubicada la N° 15, que pese a estar más alejada a una distancia aproximada de 550 m las concentraciones registradas se mantienen cercanas al 0.2 mg/l, esto refleja un preocupante decaimiento de la concentración de cloro, en base a la información recolectada existió anteriormente rupturas por actividades agrícolas ya que la tubería se encuentra a poca profundidad, adicional a esto en esta vivienda se destina en su mayoría a la crianza de animales porcinos.

Figura 31

Análisis del punto crítico en la vivienda N° 19



A continuación, se exponen los posibles factores que podrían estar contribuyendo al preocupante decaimiento del cloro observado en la vivienda N° 19:

A pesar de que todas las tuberías de la red son de PVC, que generalmente presenta una baja interacción química con el cloro, el decaimiento observado en la vivienda N° 19 puede explicarse por otros factores relacionados con la hidráulica de la red, la calidad del agua y las condiciones operativas. A continuación, se analizan los posibles motivos:

1. Condiciones específicas de las tuberías de PVC

Biofilm en las paredes internas: Aunque el PVC es menos susceptible a incrustaciones, la acumulación de biofilm sigue siendo posible si no se realiza un mantenimiento adecuado, especialmente en tramos con bajo flujo. El biofilm puede consumir el cloro residual a través de reacciones biológicas.

Historial de reparaciones: Las rupturas previas en la red de tuberías de PVC, pueden haber dejado residuos orgánicos o bacterias en los tramos reparados, produciendo una mayor demanda de cloro.

2. Consumo irregular de agua

Menor consumo en la vivienda N° 19: El bajo consumo en esta vivienda podría

aumentar el tiempo de residencia del agua en las tuberías, lo que permite un mayor decaimiento del cloro, incluso en sistemas con materiales inertes como el PVC.

3. Contaminación localizada

Actividad porcina y conexiones inseguras: Aunque el PVC es resistente a muchas reacciones químicas, la posible contaminación por ingreso de materia orgánica (por ejemplo, desde la actividad porcina) podría generar una mayor demanda de cloro en esta área específica.

Entrada de contaminantes tras reparaciones: Si las reparaciones previas no incluyeron una adecuada desinfección del tramo afectado, podrían haber quedado bacterias o partículas que interactúan con el cloro residual.

4. Hidráulica de la red

Flujo lento en el ramal de la vivienda N° 19: Un flujo más lento en este ramal puede aumentar el tiempo de residencia del agua, incrementando las oportunidades para el decaimiento del cloro. Aunque el PVC no reacciona químicamente, el contacto prolongado del cloro con la materia orgánica natural en el agua puede acelerar su degradación.

Estancamiento parcial: Si el tramo hacia la vivienda N° 19 tiene zonas de bajo caudal o estancamiento, el agua podría permanecer en las tuberías durante más tiempo, facilitando la pérdida de cloro residual.

Condiciones favorables hacia la vivienda N° 15: A pesar de estar más alejada, la vivienda N° 15 podría beneficiarse de un flujo más constante y menor tiempo de residencia esto debido a que se abastece del ramal principal, lo que explicaría las concentraciones más altas de cloro en comparación con la vivienda N° 19.

5. Calidad del agua

Mayor presencia de materia orgánica en el agua para la vivienda N° 19: Aunque el PVC no contribuye directamente al consumo de cloro, la calidad del agua en este tramo podría diferir ligeramente debido a reparaciones previas o influencias externas, incrementando la demanda

de cloro.

Desigualdad en la mezcla del cloro: Si la mezcla del cloro en el sistema no es homogénea, las viviendas más cercanas al reservorio podrían presentar una variabilidad en las concentraciones de cloro, incluso entre puntos cercanos como las viviendas N° 17 y N° 19.

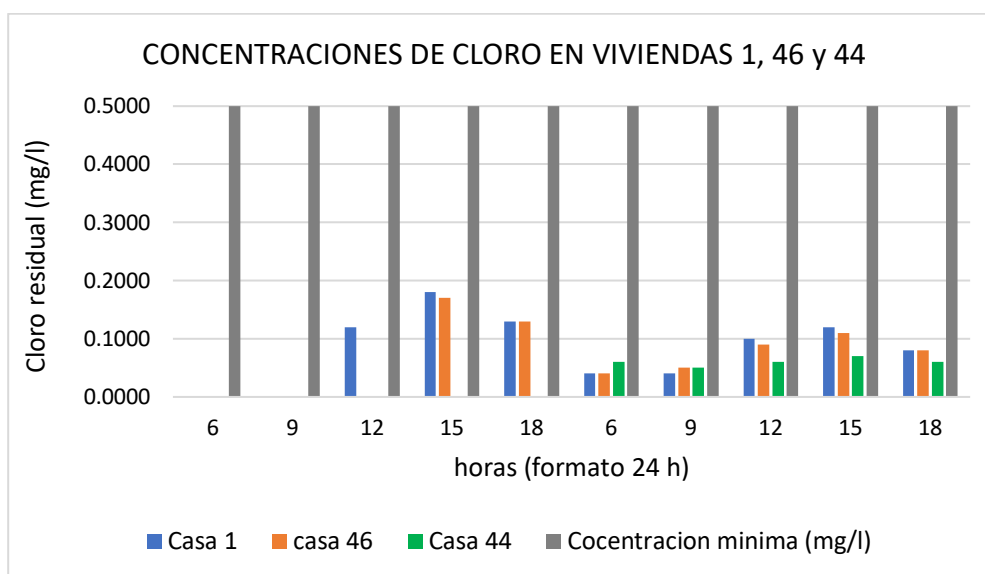
Conclusión

El análisis muestra que, a pesar de la utilización de tuberías de PVC, factores como el biofilm, el tiempo de residencia, la actividad porcina y las condiciones hidráulicas del ramal hacia la vivienda N° 19 son posibles determinantes en el decaimiento del cloro. Walski (2003) destaca la importancia de evaluar la interacción entre estos factores para identificar soluciones efectivas. Se recomienda realizar mediciones adicionales y simulaciones hidráulicas para confirmar los patrones de flujo y las concentraciones de cloro en toda la red.

Adicional a esto se identificó que en las zonas más alejadas como es de esperarse los niveles de cloro residual tienen menor concentración que en los demás puntos, los monitoreos reflejaron que las viviendas 1, 46 y 44 al estar ubicadas en los puntos extremos de la red tienen concentraciones de cloro muy bajas.

Figura 32

Concentraciones de cloro en vivienda 1, 46 y 44



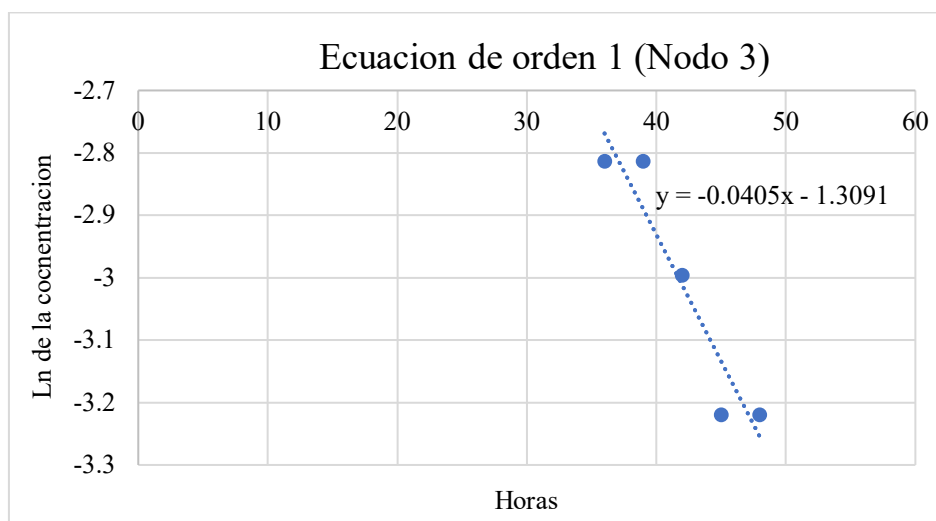
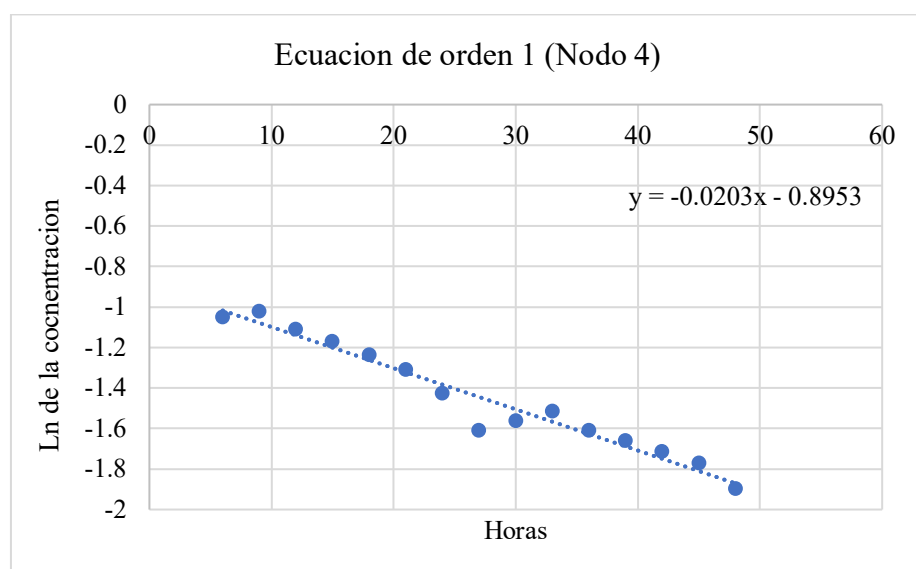
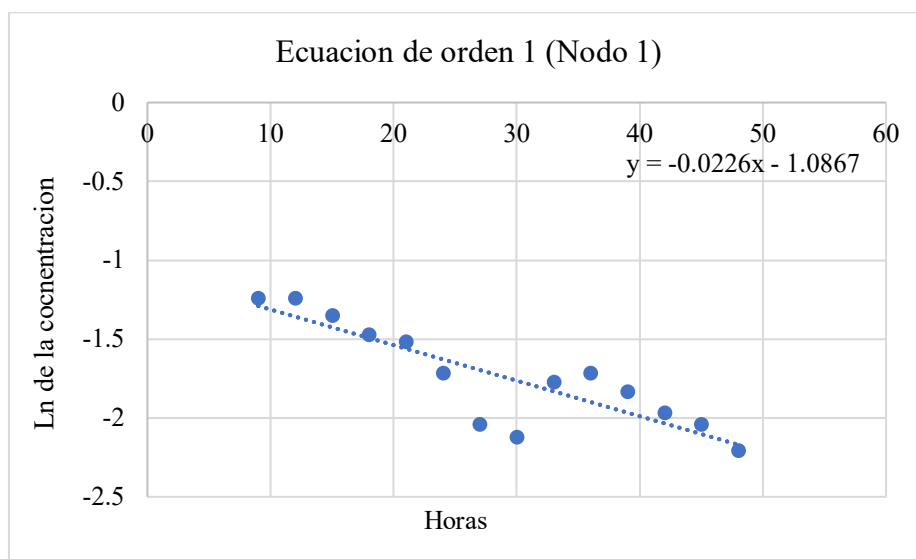
El gráfico muestra concentraciones de cloro residual bajas en las viviendas extremas de la red (Casas 1, 46 y 44), posiblemente debido al tiempo de residencia prolongado por su ubicación periférica. Aunque las concentraciones aumentan ligeramente al mediodía, todas están por debajo de la concentración mínima requerida de 0.5 mg/l. La casa 1 presenta los niveles más altos, probablemente por un mejor suministro hidráulico, aunque el ramal que la alimenta está expuesto a sobrepresiones de hasta 70 m.c.a.; ante esta situación, el propietario ha instalado válvulas de control para intentar mitigar las sobrepresiones. Por otro lado, las casas 46 y 44, ubicadas en un ramal con más edificaciones, tienen concentraciones más bajas, posiblemente debido a estancamiento o menor presión en sus ramales. Las condiciones mostradas reflejan desafíos en la distribución y mezcla del cloro, especialmente en los extremos de la red.

4.2.5 Determinación del coeficiente de reacción del cloro con la masa del agua

Para determinar el coeficiente de reacción K_b , se realizó el gráfico del orden de reacción de orden 1, debido a que el cloro es una sustancia no conservativa; para ello se graficó en $\ln(C)$ contra el tiempo en horas, donde C viene a ser la concentración del cloro. Así, para las ecuaciones presentadas en la Figura 33, en el nodo 1 el valor del coeficiente de masa (k_b) es igual a -0.226 h^{-1} , para el nodo 4 se obtuvo un valor de -0.0203 h^{-1} , de esta manera se calculó el coeficiente para cada nodo; el signo negativo indica que el valor del cloro va a decaer a razón de cada hora que pase, para poder usar este valor en el programa WaterGEMS, se necesita transformar a un factor diario en vez de horario, por ello se multiplica por 24 h, estos valores se muestran en la Tabla 17.

Figura 33

Orden de reacción 1 del nodo 1,3 y 4



Como muestra el grafico del análisis de la ecuación de orden 1 de los datos recolectados en la vivienda 19 que son los empleados para el nodo 3, se ve un decaimiento repentino en base a las concentraciones medidas en campo, por lo tanto, se tiene que asignar el valor del coeficiente $K_b = -0.97 \text{ d}^{-1}$ ese nodo.

Tabla 17

Coeficientes de decaimiento de cloro libre (K_b) en puntos de muestreo

Nodo	h^{-1}	d^{-1}	Prom. h^{-1}	Prom. d^{-1}
J - 1	-0.0226	-0.5424		
J - 2	-0.0029	-0.0696		
J - 3	-0.0405	-0.9720		
J - 4	-0.0203	-0.4872		
J - 6	-0.0228	-0.5472		
J - 7	-0.0241	-0.5784		
J - 8	-0.0207	-0.4968		
J - 9	-0.0232	-0.5568	-0.0222	-0.5336
J - 10	-0.0224	-0.5376		
J - 11	-0.0172	-0.4128		
J - 12	-0.0265	-0.636		
J - 13	-0.0237	-0.5688		
J - 14	-0.0233	-0.5592		
J - 15	-0.0237	-0.5688		
J - 16	-0.0283	-0.6792		
J - 17	-0.0233	-0.5592		
J - 18	-0.0205	-0.4920		
J - 19	-0.0142	-0.3408		

Nota: El cálculo de los coeficientes se muestran en el anexo 10.

El valor seleccionando para elaborar el modelo será -0.5336 d^{-1}

Para el nodo 3 se asignó un coeficiente $K_b = -0.972 \text{ d}^{-1}$ ya que tiene un decaimiento más elevado.

4.2.6 Estimación del coeficiente de reacción en la pared de la tubería " K_w "

Para determinar el valor del coeficiente K_w , se recurrió a otros estudios, destacando a (Rossman, 1993), éste señala la relación de K_w con respecto al diámetro de la tubería, los valores determinados van desde los $-0.00156 \text{ m.d}^{-1}$ a -0.11 m.d^{-1} en diámetros inferiores a 2

pulgadas, en la investigación realizada por (García, 2019), se encontró valores inferiores de 0.1 md^{-1} para diámetros menores a 2 pulgadas, de igual manera establece una relación entre los valores de los coeficientes, donde si K_b en 97,54 % y k_w 2,46 % respectivamente, en base a esto se calculó un valor inicial de 0.02 md^{-1} .

Se tiene:

K_b calculado = -0.5336 d^{-1} (ver Tabla 17)

Nuevo K_b = 97.54% * K_b calculado = $0.5336 \times 0.9754 = 0.51 \text{ d}^{-1}$

K_w = 2.46% * K_b calculado = -0.02 m.d^{-1}

4.2.7 Simulación Inicial

El valor del factor K_b obtenido con las mediciones de los meses junio, julio y agosto, permitieron analizar la consistencia de los datos obtenidos en la simulación inicial, de esta manera se pudo hacer el ajuste de los valores K_b y/o K_w . Se ingreso al programa WaterGEMS los valores de la concentración inicial medida en el tanque de 0.45 mg/l, un K_b de (0.51 md^{-1}) y K_w (0.02 md^{-1}), estos valores fueron calculados en el paso anterior.

Tabla 18

Comparación inicial de cloro medido y simulado

Nodo	Cloro medido (mg/l)	Cloro Simulado (mg/l)	Error residual	Error Porcentual (%)
J - 1	0.19	0.16	0.03	19.18
J - 2	0.10	0.08	0.03	23.90
J - 3	0.05	0.03	0.02	32.00
J - 4	0.24	0.21	0.03	12.26
J - 6	0.07	0.04	0.03	37.88
J - 7	0.16	0.14	0.02	10.20
J - 8	0.09	0.06	0.03	33.33
J - 9	0.21	0.18	0.03	12.20
J - 10	0.22	0.20	0.02	7.37
J - 11	0.19	0.16	0.03	16.15
J - 12	0.14	0.12	0.03	17.38
J - 13	0.16	0.15	0.02	9.78
J - 14	0.13	0.10	0.03	22.81

Nodo	Cloro medido (mg/l)	Cloro Simulado (mg/l)	Error residual	Error Porcentual (%)
J - 15	0.16	0.13	0.03	15.91
J - 16	0.11	0.09	0.02	14.55
J - 17	0.16	0.13	0.03	19.31
J - 18	0.09	0.06	0.03	29.13
J - 19	0.06	0.04	0.02	28.07

Nota: El error residual es la diferencia entre el cloro medido y el cloro simulado, la simulación inicial indica que el error porcentual que supera el 37%.

4.2.8 Calibración del modelo de decaimiento de cloro residual

La calibración del modelo de decaimiento de cloro se llevó a cabo mediante el procedimiento de prueba y error. Se ajustó valores de kb en algunos nodos, es decir se introdujo valores inferiores a 0.02 d⁻¹; igualmente, se ajustó Kb (de 0.51 d⁻¹ a 0.50 md⁻¹) y Kw (de -0.02 md⁻¹ a 0.01 md⁻¹), en el nodo 3 se estableció un Kb = -0.97 d⁻¹ con estos valores se puede observar, que se ha reducido el error entre los valores de cloro libre medidos y simulados, es decir que los valores medidos en campo están cerca de los valores simulados en WaterGEMS.

Por lo tanto, para la etapa de calibración los valores finales de Kb y Kw son:

$$Kb = -0.50 \text{ md}^{-1} \quad Kw = 0.01 \text{ md}^{-1}$$

Para el nodo 3 se estableció un Kb = -0.97 d⁻¹

Tabla 19

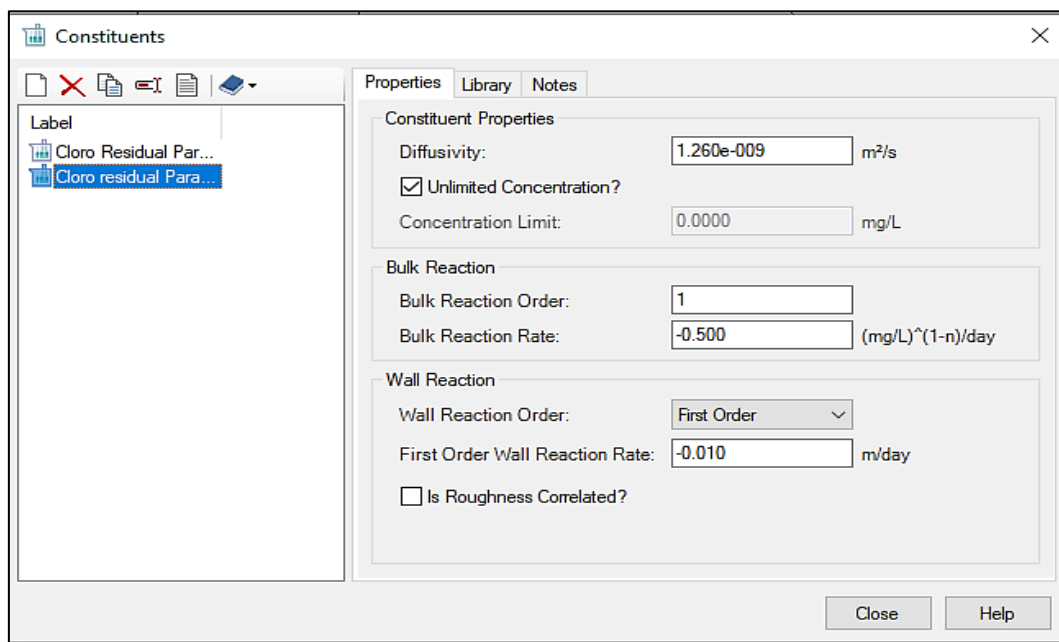
Valores comparativos de calibración

Nodo	Cloro medido (mg/l)	Cloro Simulado (mg/l)	Error residual (mg/l)	Error medio
J - 1	0.19	0.17	0.02	12.02
J - 2	0.10	0.09	0.02	14.34
J - 3	0.05	0.04	0.01	20.00
J - 4	0.24	0.23	0.02	6.13
J - 6	0.07	0.06	0.01	15.15
J - 7	0.16	0.14	0.02	9.56
J - 8	0.09	0.08	0.01	11.11

Nodo	Cloro medido (mg/l)	Cloro Simulado (mg/l)	Error residual (mg/l)	Error medio
J - 9	0.21	0.19	0.02	7.32
J - 10	0.22	0.20	0.02	9.21
J - 11	0.19	0.17	0.02	8.08
J - 12	0.14	0.12	0.02	13.90
J - 13	0.16	0.15	0.02	9.17
J - 14	0.13	0.11	0.02	15.20
J - 15	0.16	0.14	0.02	9.55
J - 16	0.11	0.09	0.02	18.18
J - 17	0.16	0.14	0.02	9.65
J - 18	0.09	0.08	0.01	5.83
J - 19	0.06	0.05	0.01	8.77

Figura 34

Valores de Kb y Kw establecidos en WaterGEMS



Fuente: Reporte software WaterGEMS

En análisis de los datos de la tabla 19, se obtienen los valores de calibración diferencias inferiores al 20%, donde E tiene un valor de 0,8047; el RSR tiene un valor de 0,4418, estos representan una calificación “muy buena”. Por tanto, se puede deducir que el modelo está bien calibrado para el cloro residual libre.

4.2.9 Validación del modelo de decaimiento de cloro residual

La validación se realizó con datos medidos en campo durante el mes de septiembre, estos son diferentes a los usados en la calibración, se escogieron 10 viviendas a las cuales se tuvieron acceso donde se midió las concentraciones de cloro en diferentes horas, estos valores se compararon posteriormente con los simulados en el modelo de decaimiento de cloro en ese mismo intervalo de tiempo del día.

Validación en vivienda 16:

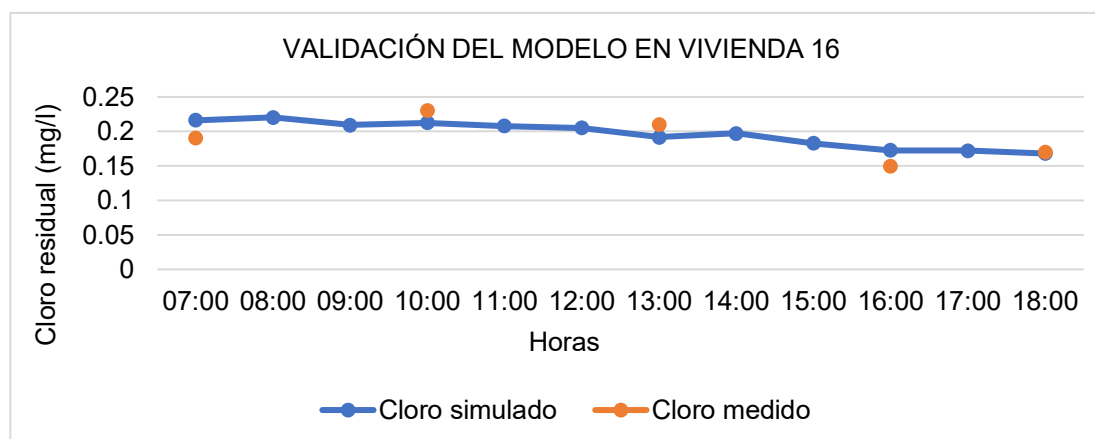
Tabla 20

Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 16

Hora	Cloro simulado	Cloro medido	Hora de medición	Error medio	E	RSR
07:00	0.3609					
08:00	0.3618	0.32	08:10	13.06		
09:00	0.3499					
10:00	0.3526					
11:00	0.3445					
12:00	0.3388	0.31	12:30	9.29	0.564	0.475
13:00	0.3165					
14:00	0.3253					
15:00	0.3011					
16:00	0.2837	0.3	16:25	5.43		
17:00	0.2854					
18:00	0.2801	0.26	18:52	7.73		

Figura 35

Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 16



Los resultados de la eficiencia de validación que se presentan en la Tabla 20, se observa que E tiene un valor de 0,564 lo que indica que el modelo presenta un rendimiento satisfactorio; RSR tiene un valor de 0,475 esto indica que el rendimiento es muy bueno ya que el error cuadrático medio normalizado tiende a cero (ver Tabla 2), Esto confirmó que el modelo de decaimiento de cloro es válido, presentando una considerada aproximación con la realidad de la red de abastecimiento.

Validación en vivienda 7:

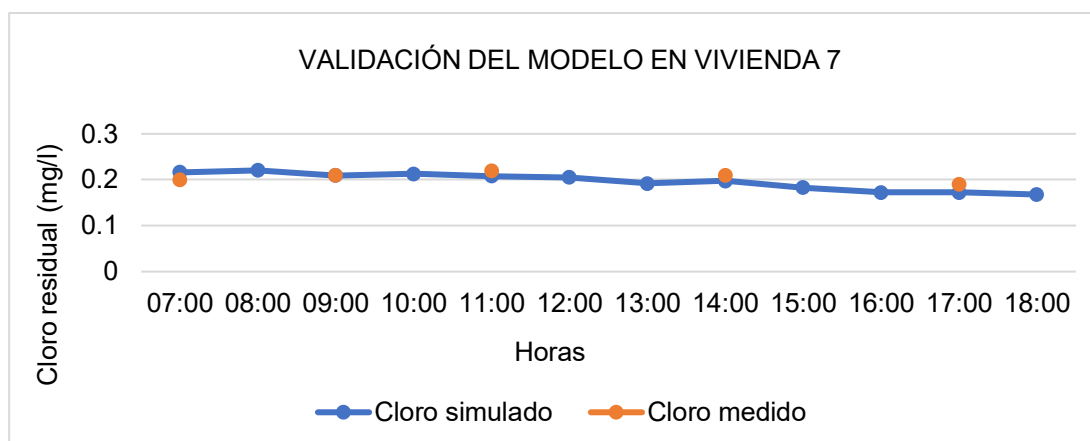
Tabla 21

Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 7

Hora	Cloro simulado	Cloro medido	Hora de medición	Error medio	E	RSR
07:00	0.2161	0.2	07:05	8.05	0.502	0.548
08:00	0.2204					
09:00	0.2094	0.21	09:00	0.29		
10:00	0.2127					
11:00	0.2079	0.22	11:06	5.50		
12:00	0.2053					
13:00	0.1918					
14:00	0.1974	0.21	14:12	6.00		
15:00	0.1827					
16:00	0.1724					
17:00	0.1722	0.19	17:17	9.37		
18:00	0.1679					

Figura 36

Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 7



Los resultados de la eficiencia de validación que se presentan en la Tabla 21, se observa que E tiene un valor de 0,502 lo que indica que el modelo presenta un rendimiento satisfactorio; RSR tiene un valor de 0,548 esto indica que el rendimiento es muy bueno ya que el error cuadrático medio normalizado tiende a cero (ver Tabla 2), Esto confirmó que el modelo de decaimiento de cloro es válido, presentando una considerada aproximación con la realidad de la red de abastecimiento.

Validación en vivienda 4:

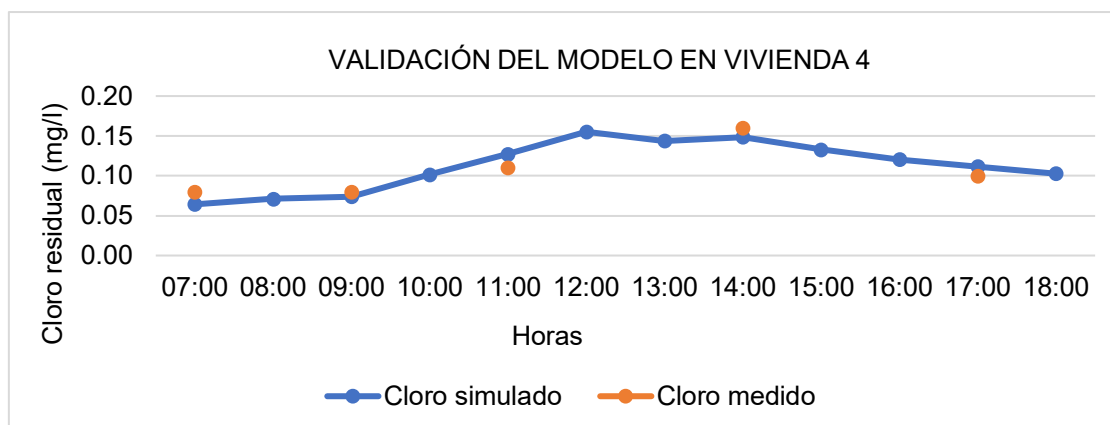
Tabla 22

Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 4

Hora	Cloro simulado	Cloro medido	Hora de medición	Error medio	E	RSR
07:00	0.0642	0.08	07:05	19.75	0.543	0.675
08:00	0.0712					
09:00	0.0740	0.08	09:00	7.50		
10:00	0.1016					
11:00	0.1273	0.11	11:07	15.73		
12:00	0.1552					
13:00	0.1437					
14:00	0.1485	0.16	14:12	7.19		
15:00	0.1328					
16:00	0.1203					
17:00	0.1117	0.1	17:17	11.70		
18:00	0.1030					

Figura 37

Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 4



Los resultados de la eficiencia de validación que se presentan en la Tabla 22, se observa que E tiene un valor de 0,543 lo que indica que el modelo presenta un rendimiento satisfactorio; RSR tiene un valor de 0,675 esto indica que el rendimiento es muy bueno ya que el error cuadrático medio normalizado tiende a cero (ver Tabla 2), Esto confirmó que el modelo de decaimiento de cloro es válido, presentando una considerada aproximación con la realidad de la red de abastecimiento.

Validación en vivienda 10:

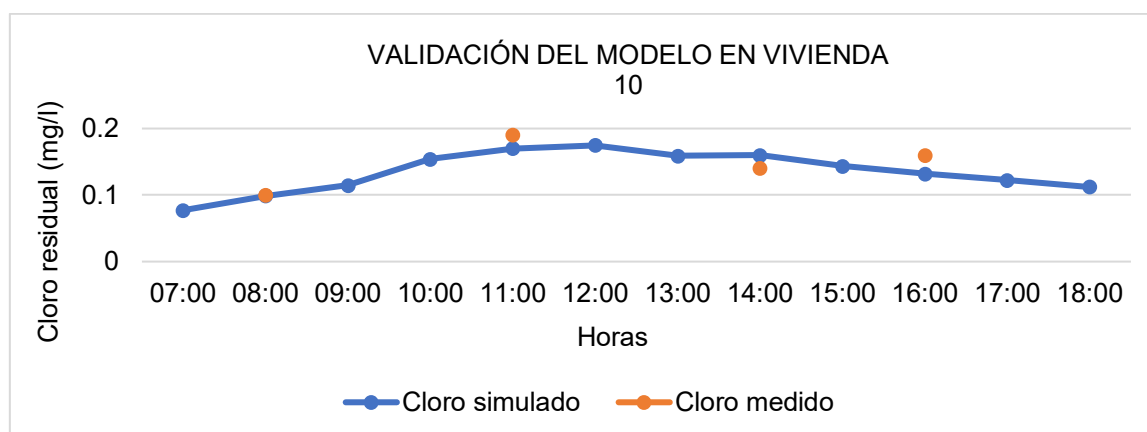
Tabla 23

Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 10

Hora	Cloro simulado	Cloro medido	Hora de medición	Error medio	E	RSR
07:00	0.0772					
08:00	0.0987	0.1	08:12	1.30		
09:00	0.1149					
10:00	0.1543					
11:00	0.1702	0.19	11:06	10.42		
12:00	0.1746				0.528	0.63
13:00	0.1589					
14:00	0.1599	0.14	14:12	14.21		
15:00	0.1436					
16:00	0.1318	0.16	16:22	17.63		
17:00	0.1223					
18:00	0.1125					

Figura 38

Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 10



Los resultados de la eficiencia de validación que se presentan en la Tabla 23, se observa que E tiene un valor de 0,528 lo que indica que el modelo presenta un rendimiento satisfactorio; RSR tiene un valor de 0,63 esto indica que el rendimiento es muy bueno ya que el error cuadrático medio normalizado tiende a cero (ver Tabla 2), Esto confirmó que el modelo de decaimiento de cloro es válido, presentando una considerada aproximación con la realidad de la red de abastecimiento.

Validación en vivienda 13:

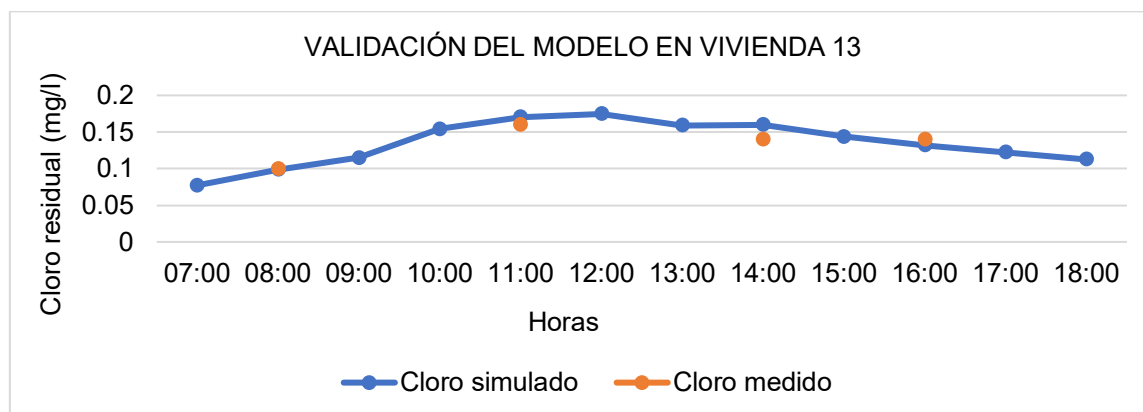
Tabla 24

Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 13

Hora	Cloro simulado	Cloro medido	Hora de medición	Error medio	E	RSR
07:00	0.0642	0.08	07:05	19.75	0.543	0.675
08:00	0.0712					
09:00	0.0740	0.08	09:00	7.50		
10:00	0.1016					
11:00	0.1273	0.11	11:06	15.73		
12:00	0.1552					
13:00	0.1437					
14:00	0.1485	0.16	14:12	7.19		
15:00	0.1328					
16:00	0.1203					
17:00	0.1117	0.1	17:17	11.70		
18:00	0.1030					

Figura 39

Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 13



Los resultados de la eficiencia de validación que se presentan en la Tabla 24, se observa que E tiene un valor de 0,543 lo que indica que el modelo presenta un rendimiento satisfactorio; RSR tiene un valor de 0,675 esto indica que el rendimiento es muy bueno ya que el error cuadrático medio normalizado tiende a cero (ver Tabla 2), Esto confirmó que el modelo de decaimiento de cloro es válido, presentando una considerada aproximación con la realidad de la red de abastecimiento.

Validación en vivienda 25:

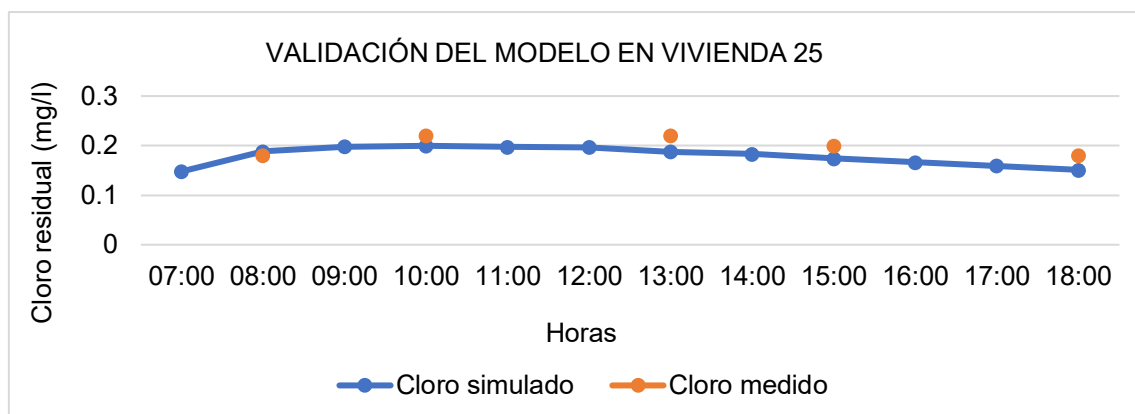
Tabla 25

Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 25

Hora	Cloro simulado	Cloro medido	Hora de medición	Error medio	E	RSR
07:00	0.1479					
08:00	0.1885	0.18	08:45	4.72		
09:00	0.1979					
10:00	0.1996	0.22	10:02	9.27		
11:00	0.1972					
12:00	0.1964					
13:00	0.1877	0.22	13:17	14.68	0.544	0.548
14:00	0.1829					
15:00	0.1737	0.2	15:50	13.15		
16:00	0.1663					
17:00	0.1594					
18:00	0.151	0.18	18:10	16.11		

Figura 40

Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 25



Los resultados de la eficiencia de validación que se presentan en la Tabla 25, se observa que E tiene un valor de 0,544 lo que indica que el modelo presenta un rendimiento satisfactorio; RSR tiene un valor de 0,548 esto indica que el rendimiento es muy bueno ya que el error cuadrático medio normalizado tiende a cero (ver Tabla 2), Esto confirmó que el modelo de decaimiento de cloro es válido, presentando una considerada aproximación con la realidad de la red de abastecimiento.

Validación en vivienda 28:

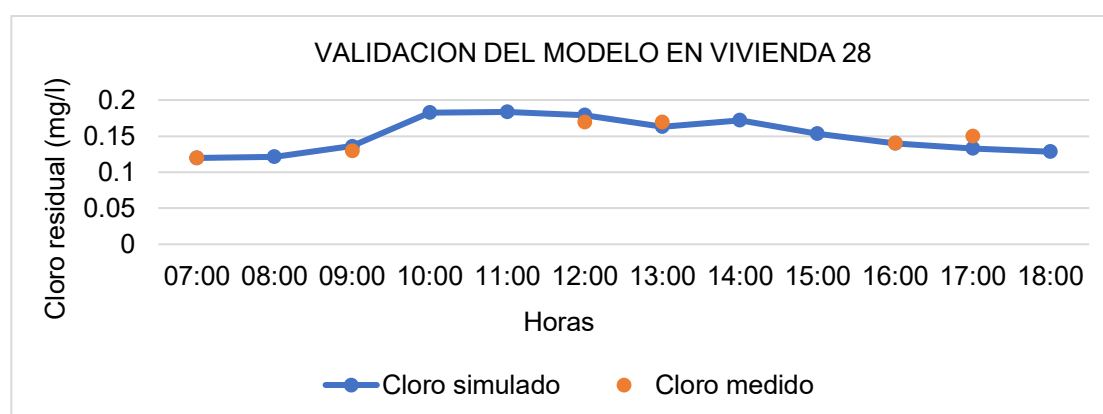
Tabla 26

Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 28

Hora	Cloro simulado	Cloro medido	Hora de medición	Error medio	E	RSR
07:00	0.1197	0.12	07:05	0.25	0.7914	0.41
08:00	0.1214					
09:00	0.1363	0.13	09:17	4.85		
10:00	0.1825					
11:00	0.1835					
12:00	0.1793	0.17	12:15	5.47		
13:00	0.1634	0.17	13:17	3.88		
14:00	0.1721					
15:00	0.1536					
16:00	0.1403	0.14	16:00	0.21		
17:00	0.1329	0.15	17:17	11.40		
18:00	0.1287					

Figura 41

Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 28



Los resultados de la eficiencia de validación que se presentan en la Tabla 26, se observa que E tiene un valor de 0,7914 lo que indica que el modelo presenta un rendimiento satisfactorio; RSR tiene un valor de 0,41 esto indica que el rendimiento es muy bueno ya que el error cuadrático medio normalizado tiende a cero (ver Tabla 2), Esto confirmó que el modelo de decaimiento de cloro es válido, presentando una considerada aproximación con la realidad de la red de abastecimiento.

Validación en vivienda 36:

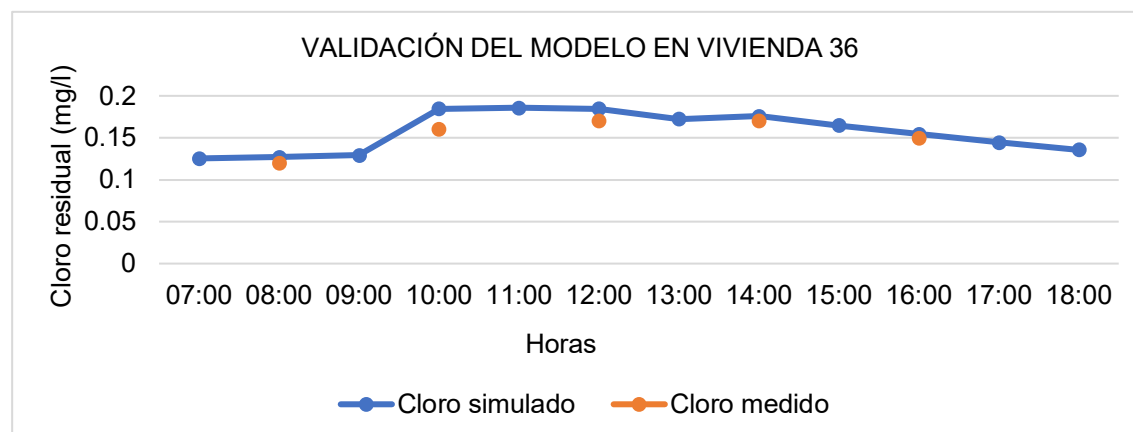
Tabla 27

Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 36

Hora	Cloro simulado	Cloro medido	Hora de medición	Error medio	E	RSR
07:00	0.1254					
08:00	0.1271	0.12	08:19	5.92		
09:00	0.1292					
10:00	0.1847	0.16	10:02	15.44		
11:00	0.1859					
12:00	0.1847	0.17	12:16	8.65	0.7535	0.44
13:00	0.1725					
14:00	0.1758	0.17	14:03	3.41		
15:00	0.1649					
16:00	0.1545	0.15	16:21	3.00		
17:00	0.1446					
18:00	0.1356					

Figura 42

Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 36



Los resultados de la eficiencia de validación que se presentan en la Tabla 27, se observa que E tiene un valor de 0,7535 lo que indica que el modelo presenta un rendimiento satisfactorio; RSR tiene un valor de 0,44 esto indica que el rendimiento es muy bueno ya que el error cuadrático medio normalizado tiende a cero (ver Tabla 2), Esto confirmó que el modelo de decaimiento de cloro es válido, presentando una considerada aproximación con la realidad de la red de abastecimiento.

Validación en vivienda 43:

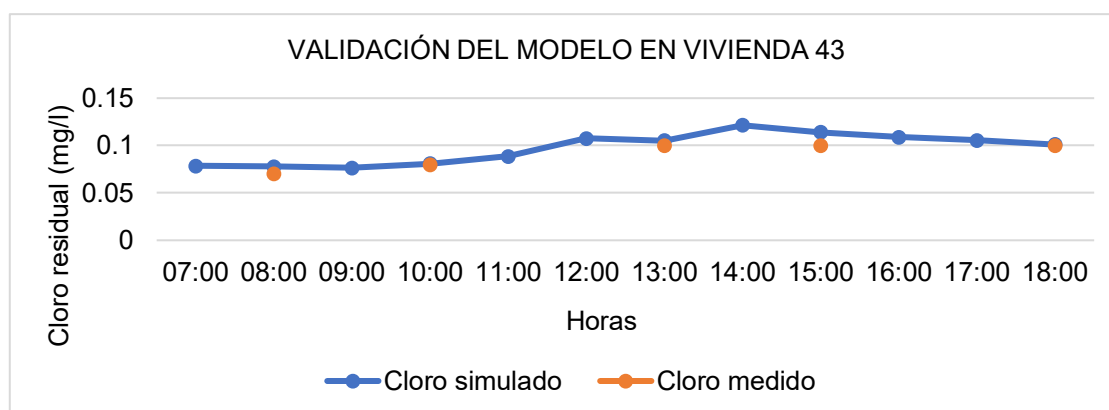
Tabla 28

Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 43

Hora	Cloro simulado	Cloro medido	Hora de medición	Error medio	E	RSR
07:00	0.0786				0.638	0.54
08:00	0.078	0.07	08:02	11.43		
09:00	0.0766					
10:00	0.0808	0.08	10:15	1.00		
11:00	0.0888					
12:00	0.1077					
13:00	0.1052	0.1	13:07	5.20		
14:00	0.1214					
15:00	0.114	0.1	15:09	14.00		
16:00	0.1088					
17:00	0.1056					
18:00	0.1013	0.1	18:06	1.30		

Figura 43

Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 43



Los resultados de la eficiencia de validación que se presentan en la Tabla 28, se observa que E tiene un valor de 0,638 lo que indica que el modelo presenta un rendimiento satisfactorio; RSR tiene un valor de 0,54 esto indica que el rendimiento es muy bueno ya que el error cuadrático medio normalizado tiende a cero (ver Tabla 2), Esto confirmó que el modelo de decaimiento de cloro es válido, presentando una considerada aproximación con la realidad de la red de abastecimiento.

Validación en vivienda 45:

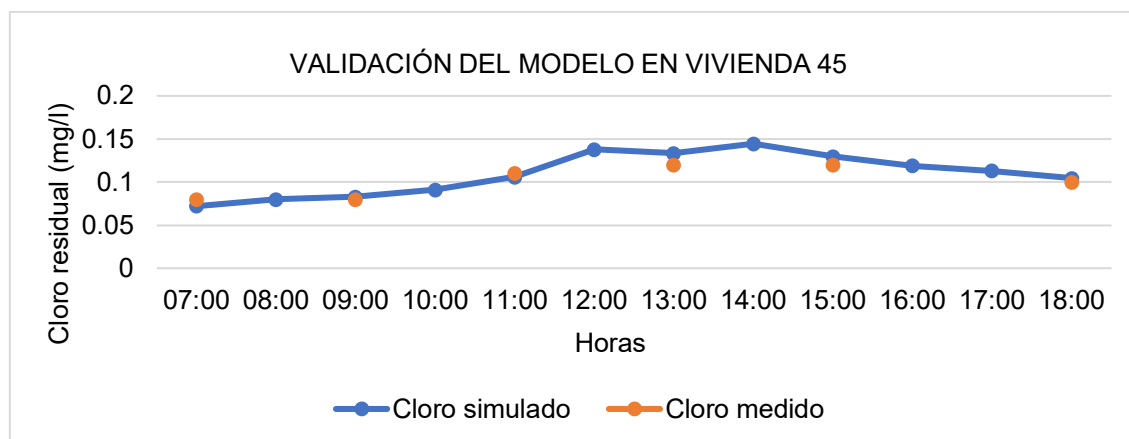
Tabla 29

Validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 45

Hora	Cloro simulado	Cloro medido	Hora de medición	Error medio	E	RSR
07:00	0.072	0.08	07:15	10.00	0.8247	0.38
08:00	0.0799					
09:00	0.0829	0.08	09:06	3.63		
10:00	0.0912					
11:00	0.1059	0.11	11:12	3.73		
12:00	0.1377					
13:00	0.1332	0.12	13:09	11.00		
14:00	0.1445					
15:00	0.1298	0.12	15:12	8.17		
16:00	0.119					
17:00	0.1129					
18:00	0.1044	0.1	18:03	4.40		

Figura 44

Gráfico de valores de validación de modelo de decaimiento de cloro en vivienda N° 45



Los resultados de la eficiencia de validación que se presentan en la Tabla 29, se observa que E tiene un valor de 0,8247 lo que indica que el modelo presenta un rendimiento satisfactorio; RSR tiene un valor de 0,38 esto indica que el rendimiento es muy bueno ya que el error cuadrático medio normalizado tiende a cero (ver Tabla 2), Esto confirmó que el modelo de decaimiento de cloro es válido, presentando una considerada aproximación con la realidad de la red de abastecimiento.

4.2.10 Análisis de sensibilidad del modelo

La Tabla 30 muestra los efectos de los parámetros seleccionados durante el análisis de sensibilidad del modelo de decaimiento de cloro. El parámetro kb tiene el efecto más significativo sobre la concentración de cloro residual en la red de distribución. Una variación del 30% en el parámetro kb aumenta la concentración de cloro en 47%. El parámetro Kw (

Tabla 31) muestra el menor efecto de variación sobre la concentración de cloro simulado en la red de distribución. Una variación del 30% en el parámetro Kw aumenta la concentración de cloro en 41%.

Tabla 30

Variación de la concentración del cloro en base al coeficiente Kb

NODOS	Cl (mg/l) Kb = -0.5	Cl (mg/l) Kb = - 0.65	Diferencia Cl (mg/l)	Variación %	Promedio %
J - 1	0.17	0.32	0.15	46.81	47.47
J - 2	0.09	0.17	0.08	45.97	
J - 3	0.04	0.09	0.05	55.56	
J - 4	0.23	0.39	0.16	40.74	
J - 6	0.06	0.09	0.03	33.33	
J - 7	0.14	0.29	0.15	51.87	
J - 8	0.08	0.17	0.09	53.24	
J - 9	0.19	0.34	0.15	44.66	
J - 10	0.20	0.36	0.16	44.82	
J - 11	0.17	0.30	0.13	42.71	
J - 12	0.12	0.27	0.15	55.86	
J - 13	0.15	0.25	0.10	40.96	

Nota: Se modifico el coeficiente Kb en un 30 %.

Tabla 31

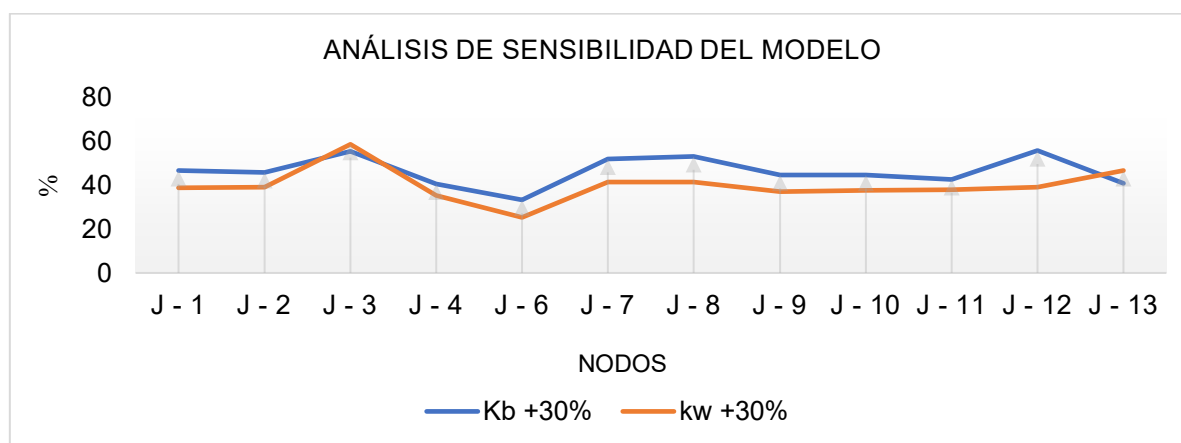
Variación de la concentración del cloro en base al coeficiente Kw

NODOS	Cl (mg/l) Kw = -0.1	Cl (mg/l) Kw= -0.13	Diferencia Cl (mg/l)	Variación %	Promedio %
J - 1	0.17	0.28	0.11	38.95	41.221
J - 2	0.09	0.15	0.06	39.16	
J - 3	0.04	0.10	0.06	58.70	
J - 4	0.23	0.36	0.13	35.23	
J - 6	0.06	0.08	0.02	25.33	
J - 7	0.14	0.24	0.10	41.46	
J - 8	0.08	0.14	0.06	41.54	
J - 9	0.19	0.30	0.11	37.07	
J - 10	0.2	0.32	0.12	37.73	
J - 11	0.17	0.27	0.10	37.96	
J - 12	0.12	0.13	0.05	39.20	
J - 13	0.15	0.09	0.04	46.71	

Nota: Se modifico el coeficiente Kw en un 30 %.

Figura 45

Análisis de sensibilidad del modelo

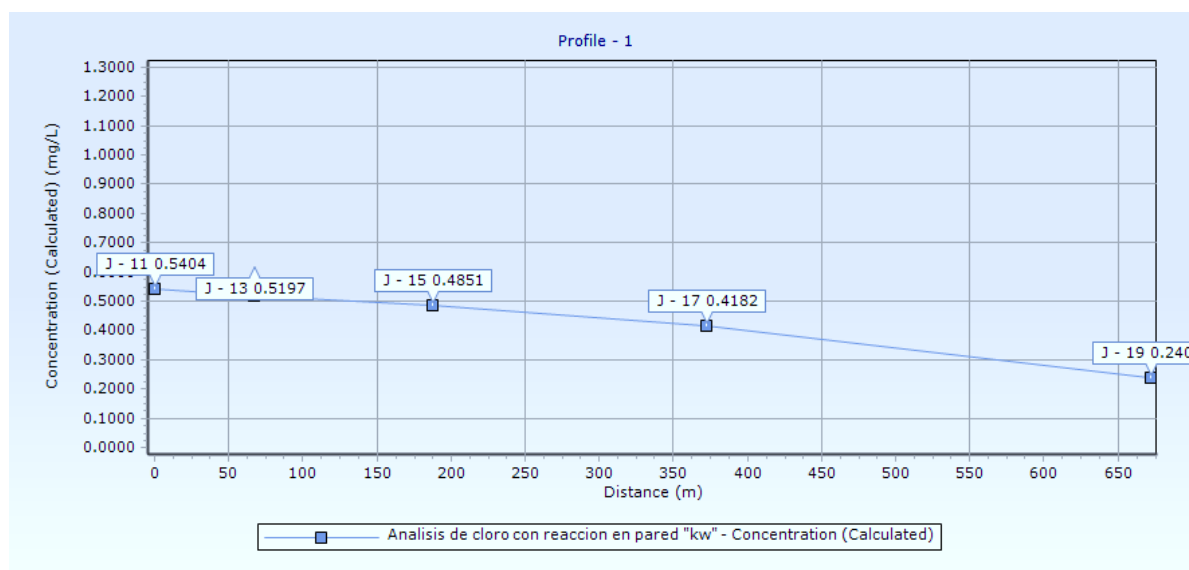


4.2.11 Determinación de concentración de cloro

Para determinar la concentración óptima se probaron distintos valores considerando siempre analizando los puntos críticos de la red de distribución que son los nodos más alejados, de esta manera se obtuvo una concentración inicial en el reservorio de 1.8 mg/l, lo cual garantiza que el 95% de los puntos de red tengan como mínimo una concentración de 0.5 mg/l cumpliendo con lo estipulado en como el DS. N° 031-2010-SA.

Figura 46

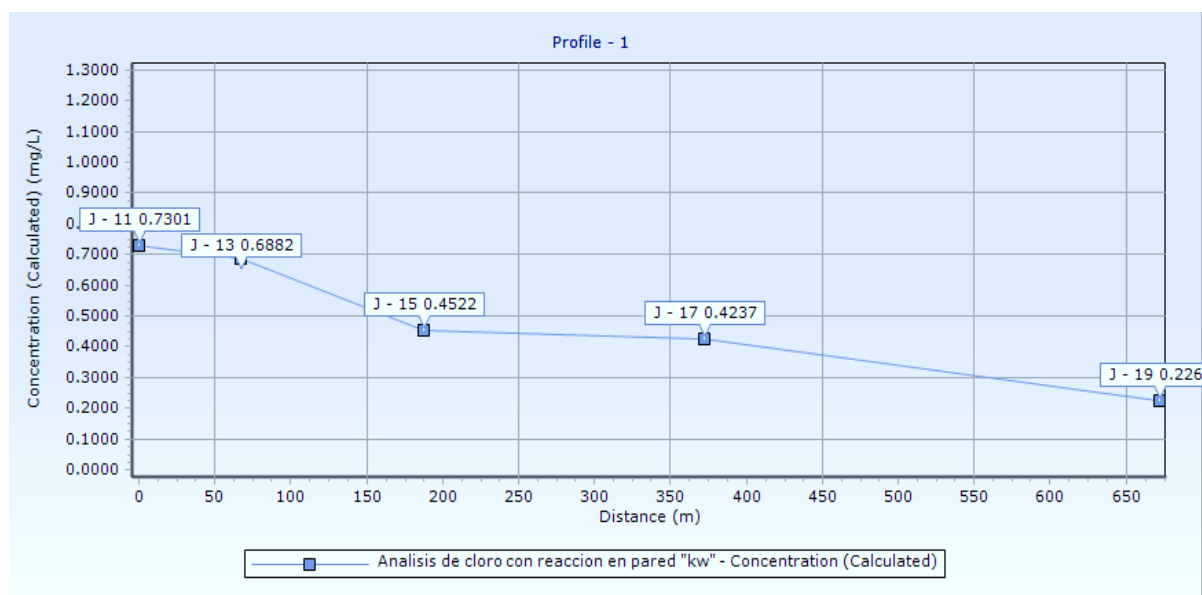
Perfil de concentración de cloro simulado a las 7:00 am



Fuente: Reporte de perfiles de simulación de modelo de decaimiento de cloro en WaterGEMS.

Figura 47

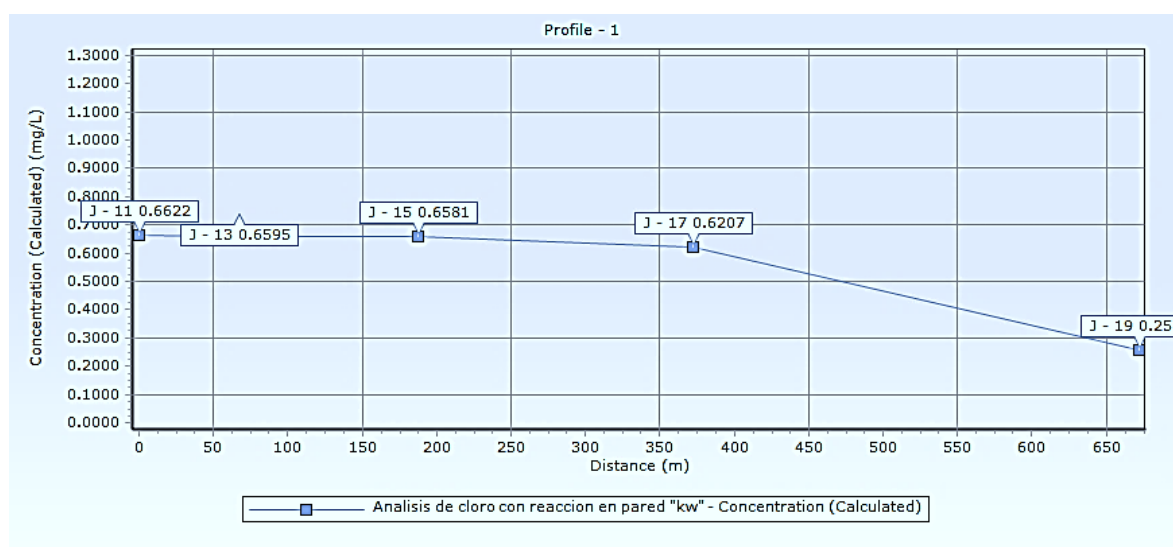
Perfil de concentración de cloro simulado a las 9:00 am



Fuente: Reporte de perfiles de simulación de modelo de decaimiento de cloro en WaterGEMS.

Figura 48

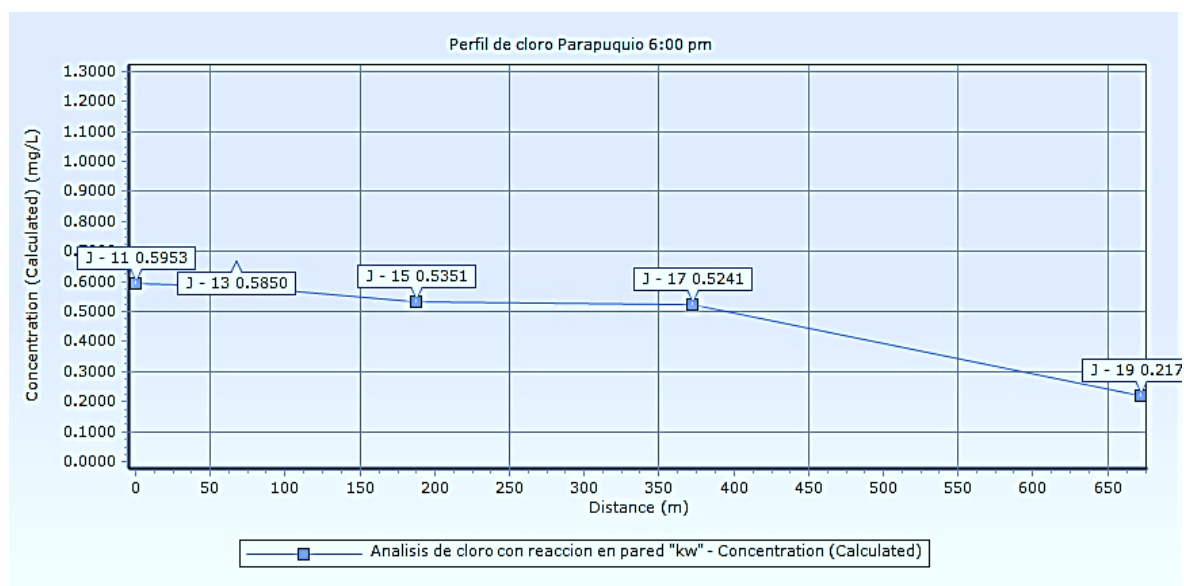
Perfil de concentración de cloro simulado 3:00 pm



Fuente: Reporte de perfiles de simulación de modelo de decaimiento de cloro en WaterGEMS.

Figura 49

Perfil de concentración de cloro simulado 6:00 pm



Fuente: Reporte de perfiles de simulación de modelo de decaimiento de cloro en WaterGEMS.

El análisis de las figuras anteriores indica una evolución en el cloro residual simulado, teniendo valores a las 7 a.m. de 0.54 mg/l a 0.24 mg/l, entre el nodo más cercano y el más lejano

respectivamente, incrementando la concentración a las 9 a.m. entre 0.72 mg/l y 0.226, lo que indica el ingreso de agua clorada desde el reservorio al nodo 11 y el decaimiento en el nodo 19, donde aún no se ha renovado el agua y sigue actuando el coeficiente K_w ; los valores se estabilizan a las 3:00 p.m. desde 0.66 mg/l hasta 0.255 mg/l, comenzado su disminución a partir de las 6:00 p.m.

Esto es un indicativo de que las bajas concentraciones de cloro, se debe a que durante la noche este decae, por un mayor tiempo de contacto debido a la reacción prolongada con los coeficientes K_b y K_w , a medida que pasa el tiempo durante el día, la concentración de cloro aumenta debido al consumo y consecuente circulación de agua clorada en las viviendas.

4.3 Validación de las hipótesis

4.3.1 Validación de hipótesis general

Antes de proceder con la prueba de correlación, entre los valores promedio de cloro residual medidos y los simulados durante la etapa de validación; es fundamental verificar la normalidad de los datos del modelo de decaimiento de cloro elaborado en WaterGEMS, el que se utilizara como herramienta para analizar y optimizar el proceso de cloración en la red de distribución de agua del caserío Parapuquio, provincia de Celendín, Cajamarca. Para comprobar la normalidad de los datos, se aplicará la prueba de Kolmogórov-Smirnov, ya que la muestra en la etapa de la validación es mayor a 50, en caso de que los datos no sigan una distribución normal, se considerarán transformaciones de datos o la utilización de correlaciones no paramétricas, como la correlación de Spearman, para validar la hipótesis planteada en este estudio.

Para el tratamiento de la hipótesis se utilizaron los valores obtenidos durante la etapa de la validación del modelo de decaimiento de cloro, ya que son los que contrastan la similitud entre los valores simulados y los medidos en la red de distribución.

Tabla 32

Valores validados de cloro simulado y medio en el modelo de decaimiento de cloro.

Cloro simulado	Cloro medido	Cloro simulado	Cloro medido
0,36	0,32	0,19	0,18
0,34	0,31	0,20	0,22
0,28	0,30	0,19	0,22
0,28	0,26	0,17	0,20
0,22	0,19	0,15	0,18
0,21	0,23	0,12	0,12
0,19	0,21	0,14	0,13
0,17	0,15	0,18	0,17
0,17	0,17	0,16	0,17
0,22	0,20	0,14	0,14
0,21	0,21	0,13	0,15
0,21	0,22	0,13	0,12
0,20	0,21	0,18	0,16
0,17	0,19	0,18	0,17
0,06	0,08	0,18	0,17
0,07	0,08	0,15	0,15
0,13	0,11	0,08	0,07
0,15	0,16	0,08	0,08
0,11	0,10	0,11	0,10
0,10	0,10	0,11	0,10
0,17	0,19	0,10	0,10
0,16	0,14	0,07	0,08
0,13	0,16	0,08	0,08
0,10	0,10	0,11	0,11
0,17	0,16	0,13	0,12
0,16	0,14	0,13	0,12
0,13	0,14	0,10	0,10

Determinación de la normalidad de datos:

H0: La muestra sigue una distribución normal

H1: La muestra no sigue una distribución normal

Regla de decisión:

Donde p-valor es el valor de la probabilidad y $\alpha=0.05$ es el nivel de significancia.

Si p-valor $\leq \alpha$ se rechaza la hipótesis nula.

Si $p\text{-valor} > \alpha$ no se rechaza la hipótesis nula.

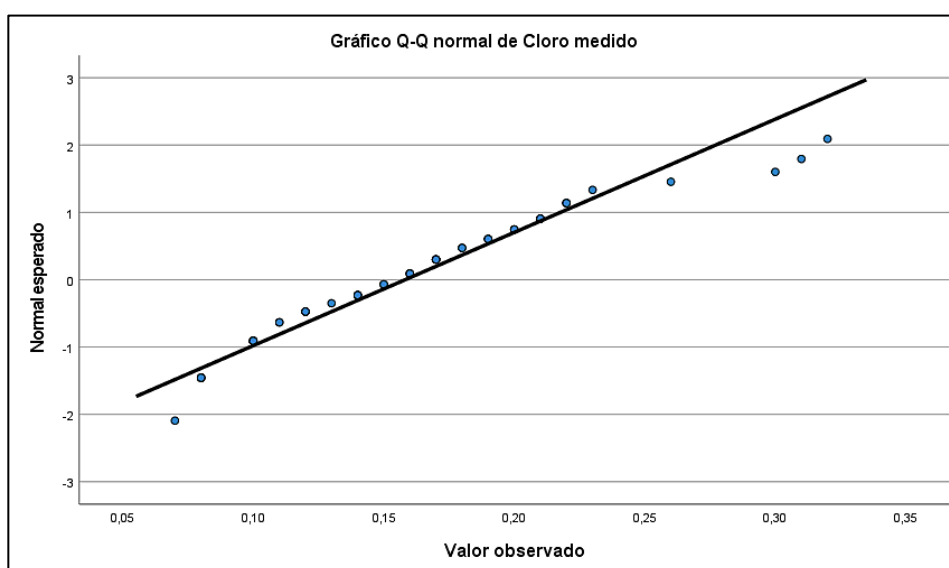
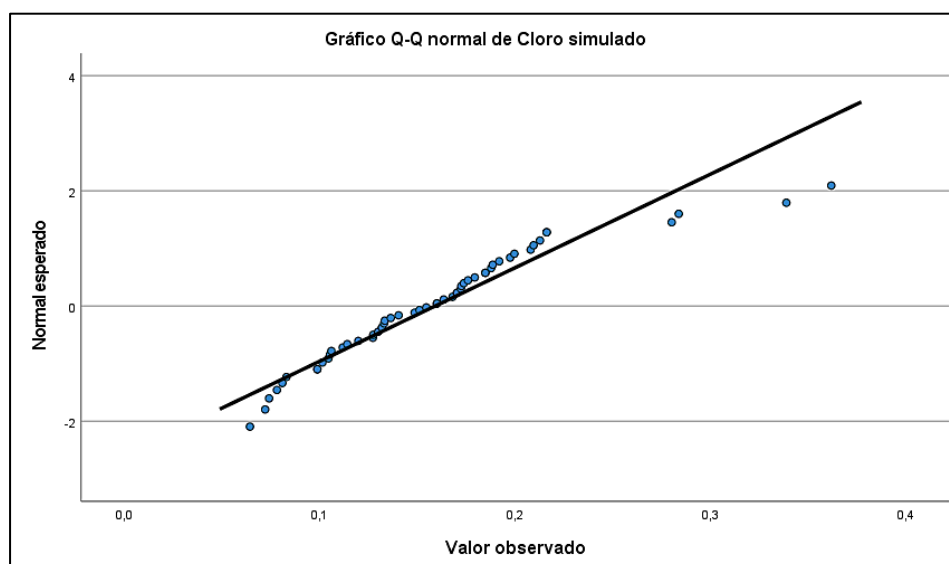
Tabla 33

Prueba de normalidad para hipótesis general

	Kolmogorov-Smirnov ^a		
	Estadístico	gl	Sig.
Cloro simulado	,102	54	,200*
Cloro medido	,091	54	,200*

Nota. Los valores a evaluar para determinar la normalidad de datos son los de la columna “Sig.”

De la tabla se obtiene los valores de p-valor que son 0,200 para el cloro simulado y 0,200 para el cloro medido en campo.



Interpretación: Se acepta la hipótesis alterna “H₁”, este resultado confirma que los datos siguen una distribución normal.

Prueba de correlación de Pearson

Para el análisis la hipótesis general, se recurrió a la Tabla 32, donde validan los valores simulados con las mediciones de cloro residual en campo.

Hipótesis alterna: El modelo de decaimiento de cloro elaborado en WaterGEMS, basado en cloro simulado y medido en campo, presentará una precisión superior al 80% al ser utilizado como herramienta en el análisis y optimización del proceso de cloración, en la red de distribución del sistema de agua potable del caserío Parapuquio, provincia de Celendín, Cajamarca.

Hipótesis Nula: El modelo de decaimiento de cloro elaborado en WaterGEMS, basado en cloro simulado y medido en campo, no presentará una precisión superior al 80% al ser utilizado como herramienta en el análisis y optimización del proceso de cloración, en la red de distribución del sistema de agua potable del caserío Parapuquio, provincia de Celendín, Cajamarca.

Tabla

34

Resultados de prueba de correlación de Pearson para hipótesis General

		Cloro simulado
Cloro medido	Correlación de Pearson	,964**
	Sig. (bilateral)	,000
	N	54

Decisión estadística

Según la prueba estadística de correlación de Pearson existe una fuerte correlación entre el cloro medio y el cloro simulado de 0.964, y un p-valor que es menor a 0,05; por ende, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

Conclusión estadística

Por lo tanto, se concluye que “El modelo de decaimiento de cloro elaborado en WaterGEMS, basado en cloro simulado y medido en campo, presenta una precisión superior al 80% al ser utilizado como herramienta en el análisis y optimización del proceso de cloración, en la red de distribución del sistema de agua potable del caserío Parapuquio, provincia de Celendín, Cajamarca”.

4.3.2 Validación de hipótesis específica 1

Para el análisis la hipótesis específica uno, se evaluó la relación entre los patrones de consumo y las presiones simulados, del modelo hidráulico calibrado, para ello se tomó una vivienda al azar en este caso la C17.

Tabla 35

Valores para validación de hipótesis específica 1

Patrón de consumo (l/s)	Presiones simuladas
	C17 (m.c.a.)
0.21	37
0.56	36.5
0.2	39.5
0.06	26
0.09	39
0.47	38.5

Prueba de Normalidad

Determinación de la normalidad de datos:

H0: La muestra sigue una distribución normal

H1: La muestra no sigue una distribución normal

Regla de decisión:

Donde p-valor es el valor de la probabilidad y $\alpha=0.05$ es el nivel de significancia.

Si p-valor $\leq \alpha$ se rechaza la hipótesis nula.

Si $p\text{-valor} > \alpha$ no se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 36

Prueba de normalidad para hipótesis específica 1

	Shapiro-Wilk			
	Estadístico	gl	Sig.	Estadístico
Patrones de consumo	,211	06	,38	,810
Presiones simuladas	,238	06	,21	,803

Nota. Los valores a evaluar para determinar la normalidad son los de la columna “Sig.”

- Para Patrones de consumo el valor $\alpha=0.38 > 0.05$
- Para Presión simuladas el valor $\alpha=0.21 > 0.05$

Interpretación: Por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna, este resultado confirma que los datos de cloro medido y simulado siguen una distribución normal.

Prueba de correlación de Pearson:

Hipótesis alterna(H_1): Existe una correlación fuerte entre los patrones de consumo y las presiones simuladas en el modelo hidráulico elaborado en el software WaterGEMS.

Hipótesis Nula(H_0): No existe una correlación fuerte entre los patrones de consumo y las presiones simuladas en el modelo hidráulico elaborado en el software WaterGEMS.

Tabla 37

Resultados de prueba de correlación de Pearson para hipótesis específica 1

		Correlaciones	
		Patrones de consumo	Presión simulada
Patrones de consumo	Correlación de Pearson	--	
	N	06	
Presión simulada	Correlación de Pearson	,992**	--
	Sig. (bilateral)	<.0001	
	N	06	06

** . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral).

Decisión estadística

Según la prueba estadística correlación de Pearson existe una fuerte correlación entre el Patrones de consumo y presión simulada de 0.992, y un p-valor que es menor a 0,05; por ende, se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula.

Conclusión estadística

Existe una fuerte correlación entre las los patrones de consumo y las presiones simuladas en el modelo hidráulico elaborado en el software WaterGEMS.

4.4 Discusión de resultados

4.4.1 Discusión de resultados de objetivo general

Los resultados obtenidos demuestran que la implementación de un modelo que simula el decaimiento de cloro residual en base a una dosificación inicial de cloro de 0.45mg/L utilizando WaterGEMS, permitió evaluar el proceso de dosificación alcanzando una similitud superior al 80% entre los valores de cloro simulados con los medidos en campo, lo que sugiere un grado de similitud alto en base a lo descrito por Tzatchkov (2016), con un margen de error del 19.75% durante la etapa de contrastación de datos de cloro residual simulados y medidos en campo. Este margen se traduce en una diferencia de tan solo 0.02 mg/l en la vivienda 19, lo que puede atribuirse a la baja concentración de cloro en la red, con valores que oscilan entre 0.05 y 0.2 mg/l. Estos resultados son consistentes con los hallazgos reportados por otros autores. En el caso de García (2019) obtuvo una alta precisión en la simulación de concentraciones de cloro, con coincidencias superiores al 90% en la mayoría de los nodos de la red. De manera similar, Sánchez Martínez (2020) reportó la utilidad de los modelos computacionales para simular el comportamiento de la red, con errores inferiores al 2%, lo que destaca la efectividad de estas herramientas en contextos específicos y el proceso de cloración.

Por otro lado, Tuero y Huamani (2021) lograron una correlación alta del 98.9% entre los valores medidos y simulados, lo que subraya la capacidad de los modelos computacionales

para reproducir fielmente las condiciones reales de la red de distribución de agua. Córdova Peña (2023) también reportó resultados óptimos, con un error porcentual inferior al 20% al comparar las lecturas de cloro residual libre en campo con las simuladas en su modelo hidráulico. En comparación con los resultados de otros autores, se observa que el margen de error obtenido en esta investigación se encuentra dentro de rangos aceptables, especialmente cuando se consideran las bajas concentraciones de cloro en la red.

Sin embargo, es notable que algunos estudios, como el de Sánchez Martínez (2020) y Tuero y Huamani (2021), reportaron errores significativamente menores con una precisión de casi el 99%, lo que sugiere que factores como la calibración del modelo y las características específicas de la red podrían influir en la precisión de las simulaciones. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar las particularidades de cada sistema y de ajustar los parámetros del modelo para mejorar la exactitud en la dosificación y simulación del decaimiento de cloro residual en diferentes contextos.

4.4.2 Discusión de resultados de objetivo específico 1

Los resultados obtenidos demuestran que el modelo hidráulico elaborado en WaterGEMS, basado en la medición simultánea de caudales (patrones de consumo) y presiones muestran una precisión superior al 85%, con un margen de error mínimo del 0.5% en la vivienda C1 y el error más alto de 14,3% en la vivienda C2, durante la etapa de calibración del modelo de los datos simulados y medidos en campo con valores de presiones máximos simulados de 70 m.c.a y mínimos de 9 m.c.a. Estos resultados son consistentes con los hallazgos reportados por otros autores.

En el caso de García (2019) obtuvo una alta precisión en la simulación del modelo hidráulico bajo presiones, con coincidencias superiores al 90% en la mayoría de los nodos de la red. De manera similar, Sánchez Martínez (2020) reportó la utilidad de los modelos hidráulicos para simular el comportamiento de la red, con errores inferiores al 2%, lo que

destaca la efectividad de estas herramientas en contextos específicos. En cuanto a la elaboración del modelo hidráulico basado en presiones, se logró unos valores promedio por encima del 90% ya que no se presenta mayor variación de presiones debido al bajo consumo de agua teniendo presiones mínimas de 2.4 m.c.a hasta la existencia de sobrepresiones que llegan hasta los 70 m.c.a debido a la topografía donde está emplazada la red de distribución, un caso similar es de Priori y Acurio, (2021), donde se presentaron presiones de entre 40 y 68 m.c.a, y existencia de rebose constante en el reservorio son indicativos de bajo consumo de agua, teniendo así presiones constantes.

El análisis de la eficiencia del modelo hidráulico a través de la métrica estadística del índice de Nash-Sutcliffe y la métrica normalizada del Error Cuadrático Medio Normalizado (RSR), presentan valores de 0.9237 y 0.3416 respectivamente, lo que en sus rangos de evaluación sugieren que el modelo muestra una eficiencia “muy buena” debido a la fuerte correlación entre los datos simulados y medidos en consecuencia y se puede decir que el modelo ha sido calibrado de manera apropiada, demostrando una capacidad notable para representar con precisión el comportamiento real del sistema de abastecimiento. En contraste, García (2019) obtuvo valores de 0.9612 y 0.4071 para estas métricas,

Además, Priori y Acurio (2021) encontraron que, al evaluar la eficiencia de su modelo, el valor del índice de Nash-Sutcliffe tienden a acercarse a 1 y el RSR con valor de 0.46 muy cercano al valor óptimo de 0.5 lo que indica una fuerte correlación entre los datos simulados y medidos en campo haciendo evidente un alto grado de eficiencia y un rendimiento “muy bueno”, estos valores son consecuencia de un monitoreo de caudales más especializado debido al uso de caudalímetros electrónicos en diferentes secciones de la red, lo que genera una mayor eficiencia en el modelo al contar con mayor precisión de datos.

4.4.3 *Discusión de resultados de objetivo específico 2*

El monitoreo de las concentraciones de cloro residual en Parapuquio mostró valores promedio de 0.45 mg/L en el reservorio, 0.3 mg/L en la vivienda más cercana, entre 0.2 mg/L y 0.1 mg/L en puntos intermedios, y de 0.1 mg/L a 0.05 mg/L en los puntos más críticos, lo que está por debajo de lo recomendado por el reglamento de calidad del agua. Comparado con investigaciones previas, se observa que García (2019) logró mantener 0.56 mg/L en los puntos críticos de Azogues con una dosificación inicial de 1.12 mg/L, mientras que Sánchez (2020) reportó caídas mayores, alcanzando hasta 0.02 mg/L en los extremos de Chapinero. Por otro lado, Priori y Acurio (2021) lograron una cobertura del 88.5% con concentraciones superiores a 0.5 mg/L utilizando una dosificación inicial de 1.5 mg/L, destacando la importancia de una dosificación adecuada.

A nivel nacional Córdova (2023); Apumatay y Paitan (2021) reportaron valores en rangos de 0.48 mg/L a 1.14 mg/L y 0.33 mg/L a 1.21 mg/L, respectivamente. En comparación, los valores en Parapuquio reflejan una caída más pronunciada en las zonas críticas, subrayando la necesidad de optimizar el proceso de dosificación y evaluar factores como el tiempo de residencia y la demanda biológica y química para garantizar la calidad del agua en toda la red de distribución.

4.4.4 *Discusión de resultados de objetivo específico 3*

El análisis de las concentraciones de cloro residual permitió identificar zonas críticas, principalmente en los extremos de la red, donde las concentraciones suelen ser más bajas. Sin embargo, el punto 17 presentó una situación atípica al registrar 0.05 mg/L, pese a estar cerca del reservorio, mientras que las viviendas cercanas alcanzaron 0.2 mg/L. Esto podría deberse a contaminación por materia orgánica, rupturas o reparaciones deficientes en tuberías, que favorecen la formación de biofilm y aumentan la demanda de cloro. Factores como el tiempo de residencia del agua, la actividad porcina en la zona y las condiciones hidráulicas del ramal

también influyen, destacando la necesidad de evaluar estas interacciones para proponer soluciones efectivas. Tuero y Huamani (2021) identificaron una correlación significativa entre el coeficiente de decaimiento biológico (K_b) y la reducción de cloro en puntos críticos. En este caso, el comportamiento observado en el punto 17 de su red podría estar relacionado con la presencia de biofilm, un aspecto que también se destacó en su investigación.

Apumatay y Paitan (2021), identificaron 21 puntos críticos con concentraciones de cloro entre 0.33 mg/L dichas concentraciones 1.21 mg/L. Este estudio demostró que los puntos críticos generalmente se localizan en los extremos de la red, donde las presiones hidráulicas y las velocidades de flujo son más bajas, lo que favorece el decaimiento del cloro. García (2019), al analizar el sistema de Azogues, Ecuador, determinó que los puntos más críticos se encontraban en los extremos de la red y que una concentración inicial adecuada en la planta de tratamiento podría garantizar niveles mínimos de cloro en estos nodos.

4.4.5 Discusión de resultados de objetivo específico 4

El modelo desarrollado en WaterGEMS permitió simular la dinámica de las concentraciones de cloro al introducir una dosificación promedio en el reservorio, en base a esto se determinó una concentración inicial óptima de cloro en el reservorio al aumentar de 0.45 mg/l a 1.8 mg/l garantizando que el 95 % de los puntos de red tengan como mínimo una concentración de 0.5 mg/l cumpliendo con lo estipulado en como el DS. N° 031-2010-SA, en contraste Priori & Acurio, (2021) determinó que el aumento de la concentración de 0.76 mg/l a 1.5 mg/l en el reservorio se lograría un 88.5% y a 2.01 mg/l el 99.37 % de los de nodos cumplirían con recomendado por la OMS, García (2019) estimo que con un concentración de 1.12 mg/l en la PTAP garantiza un mínimo de 0.56 mg/l en los puntos más críticos en contraste Tuero y Huamani (2021) determinaron una dosificación inicial de 1.8 mg/L, destacando el modelo como una herramienta valiosa para optimizar los procesos de desinfección y la gestión de la calidad del agua.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos demuestran la utilidad del modelo de decaimiento de cloro desarrollado en WaterGEMS, al ser empleado como herramienta para analizar y optimizar el proceso de cloración; al contrastar los datos simulados con los medidos en campo, se observa un porcentaje de similitud superior al 80%. Sin embargo, en los nodos más alejados de la red, donde las concentraciones de cloro son inferiores a 0.05 mg/l, se presentan errores cercanos al 20%. Este fenómeno puede atribuirse a las bajas concentraciones de cloro en estas zonas, que varían entre 0.05 y 0.2 mg/l. Estos hallazgos subrayan la capacidad del modelo para simular sistemas con bajos niveles de cloro, lo que resalta su utilidad en la optimización de procesos de desinfección en redes de distribución.

Los resultados obtenidos evidencian que el modelo hidráulico desarrollado en WaterGEMS, calibrado con datos de caudales y patrones de consumo, muestra una precisión superior al 85% en la simulación de la red de distribución de agua del caserío Parapuquio. La precisión del modelo se valida con un margen de error mínimo del 0.5% en la vivienda C1 y un error máximo del 14.3% en la vivienda C2, reflejando un ajuste adecuado entre los valores de presión simulados y los medidos en campo. Los valores medidos y simulados de presión alcanzan un máximo de 70 m.c.a y un mínimo de 9 m.c.a, lo cual se ajusta al rango esperado en redes con topografía variada.

EL monitoreo de las concentraciones de cloro residual en la red de distribución de Parapuquio presentan un comportamiento decreciente desde el reservorio hacia los puntos más distantes, con valores promedio de 0.45 mg/L en el reservorio, 0.3 mg/L en la vivienda más cercana, 0.2 mg/L a 0.1 mg/L en puntos intermedios y de 0.1 mg/L a 0.05 mg/L en los puntos más críticos. Estas concentraciones están por debajo de lo establecido en el reglamento de calidad del agua, lo que compromete la eficacia de la desinfección y la seguridad del agua

suministrada. La presencia de concentraciones tan bajas en puntos críticos sugiere la necesidad de implementar medidas para optimizar la dosificación de cloro en el reservorio.

En base al registro de las concentraciones de cloro residual se pudo identificar zonas críticas, principalmente en los extremos de la red, donde las concentraciones suelen ser más bajas. Sin embargo, el punto 19 presentó una situación atípica al registrar 0.05 mg/L, pese a estar cerca del reservorio, mientras que las viviendas cercanas alcanzaron 0.2 mg/L. Esto podría deberse a contaminación externa, que favorecen la formación de biofilm y aumentan la demanda de cloro.

El análisis de las simulaciones realizadas con el modelo de decaimiento de cloro sugiere que, al aumentar la concentración inicial de cloro en el reservorio de 0.45 mg/l a 1.8 mg/l, se aseguraría que el 95% de los puntos de la red de distribución tendrían una concentración mínima de 0.5 mg/l. Esto garantizaría el cumplimiento de los estándares de calidad establecidos en el DS. N° 031-2010-SA, asegurando una desinfección adecuada en toda la red y minimizando los riesgos de contaminación en los tramos más alejados de la red de distribución. Este ajuste técnico es crucial para la optimización de los procesos de cloración en sistemas de abastecimiento de agua potable.

En resumen, los resultados obtenidos en esta investigación sugieren que la simulación del decaimiento de cloro residual, la elaboración de modelos hidráulicos como herramienta para analizar y optimizar proceso de dosificación de cloro y el análisis de la eficiencia del modelo, han demostrado ser útil en la simulación y comprensión del comportamiento de la red de distribución de agua potable en el caserío Parapuquio. Estas conclusiones son consistentes con la literatura existente y respaldan la utilidad de estas herramientas en la gestión y operación de sistemas de agua potable a nivel local.

RECOMENDACIONES:

- Instalación de dispositivos de medición de caudal en puntos clave de la red: Colocar medidores de caudal en puntos estratégicos de la red de distribución permitirá obtener datos precisos y en tiempo real sobre los patrones de consumo en diferentes zonas del sistema. Esta información es crucial para mejorar la calibración del modelo hidráulico, facilitando una representación más precisa del comportamiento de la red. Con datos de caudal precisos, se puede ajustar el modelo en función de las variaciones diarias y estacionales en el consumo de agua, lo que a su vez permite una mejor planificación y optimización de la operación del sistema.
- Actualización periódica del modelo hidráulico: Es recomendable realizar actualizaciones periódicas del modelo hidráulico en WaterGEMS para reflejar cambios y asegurar que las simulaciones mantengan un alto nivel de precisión. Al actualizar el modelo regularmente, se podrán prever y mitigar problemas de presión o caudal que puedan surgir en el futuro, garantizando un suministro de agua estable y de calidad.
- Instalación de cámaras rompe-presiones en zonas con sobrepresión: Las zonas de la red que presentan sobrepresión, debido a la topografía o la variabilidad en el consumo, pueden generar estrés en las tuberías y otros componentes de la infraestructura. Para evitar daños y prolongar la vida útil de la red, se recomienda instalar cámaras rompe-presiones en estas áreas críticas. Estas cámaras no solo protegen la infraestructura, sino que también ayudan a mantener una presión estable en toda la red, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo los riesgos de fallas y fugas en el sistema.
- Monitoreo continuo de cloro residual en el sistema de distribución: Esto permitirá realizar ajustes en la dosificación de cloro en tiempo real, asegurando que los niveles se mantengan dentro de los rangos recomendados por las normas de calidad de agua potable.

- Capacitación continua para el personal técnico en el uso de WaterGEMS y gestión de redes hidráulicas: La capacitación del personal técnico de la municipalidad es clave para el éxito en la implementación y mantenimiento de modelos hidráulicos. Se recomienda proporcionar formación en el uso de herramientas de simulación como WaterGEMS, con un enfoque en la interpretación de resultados y en la calibración de modelos. Esto permitirá que el personal pueda responder a cambios en el sistema y mejorar la toma de decisiones en la operación y mantenimiento de la red de distribución, promoviendo una gestión más eficiente y proactiva del recurso hídrico.
- Desarrollar protocolos de mantenimiento preventivo y correctivo: Para complementar las herramientas de modelado y monitoreo, es fundamental contar con protocolos de mantenimiento preventivo y correctivo que incluyan inspecciones regulares de la red, verificación de dispositivos de medición y revisión de los niveles de cloro en puntos críticos. Un enfoque de mantenimiento planificado contribuirá a reducir los costos de reparación y a evitar interrupciones en el servicio, mejorando así la confiabilidad del sistema de abastecimiento de agua.
- Se recomienda realizar el cálculo preciso de la cantidad de cloro granular en gramos que se tiene que utilizar; a fin de colocar la suficiente solución de cloro para cumplir con los rangos mínimos de cloro residual establecidos por el DS. N° 031-2010-SA. Para el año 2023 con el caudal de ingreso de 3 (l/s) en el reservorio y con un volumen de 600 l del tanque dosificador para un goteo de 60 ml/min; con ayuda de la ecuación (1) descrita en el apartado *dosificación de cloro por goteo*, se obtiene como resultado 3890 gr de cloro granular al 70%.
- Este tipo de modelos es recomendable implementarlos en sistemas de agua nuevos o en los que se lleve a cabo una limpieza y desinfección periódica, para prevenir la distorsión de resultados por factores externos preexistentes en la red de agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguerrin, F., & Alcocer Yamanaka, V. (2004). *Decaimiento del cloro por reacción con el agua en las redes de distribución*. México: Morelos.
- Aguilar Siguenza, J. (2015). *Modelación para evaluar cloro residual en la red principal del sistema de agua potable de Buenavista, cantón Pasaje, provincia de El Oro*. [Tesis de grado. Universidad Técnica de Machala] .
- Alcantara, G. (2011). *Fisiografía del departamento de Cajamarca*. Cajamarca.
- Al-Zahrani, M. (2014). Modeling and Simulation of Water Distribution System. *Arabian Journal for Science and Engineering*(39), 1621-1636. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s13369-013-0782-z>
- ANA. (2015). *Evaluación de recursos hídricos en la cuenca Marañón*. INCALAM PERÚ. Obtenido de https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/39/ANA0000053_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Apumatay Huamani, M., & Paitan Montañez, W. (2021). *Modelamiento y simulacion de la cocrntracion de cloro residual mediante el software WaterCAD en la red de Emapa de Huancavelica*. [Tesis de grado. Universidad Nacional de Huancavelica].
- Arsene T., C. (2011). Operational Decision Support in the Presence of Uncertainties. *Water Distribution Systems, III*(2), 22-25. Obtenido de <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1701/1701.04681.pdf>
- AWWA. (2011). *Water Quality and Treatment: A Handbook on Drinking Water* (6ta edición ed.). Nueva York: McGraw-Hill Education.
- AWWA. (2020). Water Distribution System Modeling: Past & Present. *112*(9), 10-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/awwa.1572>
- Bakar Radhi, B. (Octubre de 2016). The Effect of a Distance from Water Treatment. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 3(10), 181-187. Recuperado el 6 de Octubre de 2023, de <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers/310.29>
- Barrantes. (2015). *Watercad, ¿Qué es Watercad?* Lima, Peru.
- Bendezu Quispe, G. (2018). *Concentración inadecuada de cloro residual libre en agua de hogares de lima metropolitana*. Lima: Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Publica. Obtenido de

<https://repositorio.upch.edu.pe/handle/20.500.12866/4270>

- Bentley. (2010). *WaterCAD/GEMS V8i, Curso de Modelación y Diseño de Sistemas de Distribución, Intermedio (sistema métrico)*. Bentley Institute. Obtenido de https://www.academia.edu/35222715/WaterCAD_GEMS_V8i_Curso_de_Modelaci%C3%B3n_y_Dise%C3%B1o_de_Sistemas_de_Distribuci%C3%B3n_Intermedio_sistema_m%C3%A9trico
- Berardi, L., Simone, A., Laucelli, D., & Giustolisi, O. (2017). Feasibility of mass balance approach to Water Distribution Network model calibration. *Procedia Engineering*(186), 551-558.
- Bruno, F. D. (2021). *A Pressure Monitoring System for Water Distribution Networks Based on Arduino Microcontroller* (Vol. 13). Water. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w13172321>
- Casanova Matera, L. (2022). *Topografía Plana*. Merida: ULA. Recuperado el 7 de Octubre de 2023, de http://www.serbi.ula.ve/serbiula/libros-electronicos/Libros/topografia_plana/pdf/topografia.pdf
- CEPIS. (2004). *Tratamiento de agua para consumo humano. Plantas de filtración rápida*. (Vol. Manual I: Teoría Tomo II). Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Obtenido de https://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1_tomo1_indice.pdf
- CEPIS. (2022). *Control y vigilancia de la calidad de agua de consumo humano*. Lima, Perú: CEPIS. Obtenido de <https://iris.paho.org/handle/10665.2/55439>
- Comisión Nacional del Agua. (2018). *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, Modelación Hidráulica y de Calidad del Agua en Redes de Distribución*. (Vol. XIII). Mexico. Recuperado el 04 de 10 de 2023, de <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro13.pdf>
- Cooperación Alemana. (2017). *Manual para cloración del agua en sistemas de abastecimiento de agua potable en el ámbito rural*. Miraflores: Implementada por la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Córdova , R., & Zelaya, W. (2017). *Generación de un modelo de simulación para la optimización de redes de agua potable de las ciudades de Huaraz e Independencia provincia Huaraz-Ancash*. [Tesis de grado. Universidad Nacional de Santiago Antunes de Mayolo].
- Cordova Peña, D. (2023). *Modelamiento y simulación de cloro residual en aguapotable*,

- para determinar la calidad microbiológica del agua del centro poblado Marona.* [Tesis de Grado.Universidad Nacional de San Martín]. Obtenido de <https://repositorio.unsm.edu.pe/handle/11458/5132>
- DIGESA. (2010). *REGLAMENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO.* Lima. Obtenido de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/273650/reglamento-de-la-calidad-del-agua-para-consumo-humano.pdf?v=1561937448>
- DIRESA. (18 de 06 de 2024). *Dirección Regional de Saud Cajamarca.* Obtenido de Reporte De Vigilancia De Calidad De Agua: <https://www.diresacajamarca.gob.pe/portal/mn/1949>
- Dominguez Asencio, L. (2021). *Modelamiento de la calidad de agua potable en la red de distribución de la Parroquia Chanduy mediante el uso del programa WaterCAD.* [Tesis de Grado.UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA].
- Enríquez Hurtado, R. (2022). *AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO EN EL PERÚ.* Lima. Obtenido de <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/peru/20507.pdf>
- García Avila, F. (2019). *Modelo de decaimiento de cloro libre en la red de distribución de agua potable en la ciudad de Azogues, Ecuador.* [Tesis Doctoral. Universidad Nacional Agraria La Molina]. Obtenido de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3845>
- gob.pe. (22 de agosto de 2024). *gob.pe.* Obtenido de <https://www.gob.pe/institucion/sunass/noticias/1008128-4-6-millones-de-pobladores-de-zonas-rurales-consumen-agua-con-niveles-inadecuados-de-cloro>
- HANNA. (27 de enero de 2024). *HANNA instruments.* Obtenido de <https://www.hannainst.es/blog/1572/Sabias-que-existen-diferentes-tipos-de-cloro#:~:text=Cloro%20Libre%3A%20Esta%20forma%20de,causa%20irritaciones%20y%20malos%20olores.>
- INEI. (2017). *Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades.* Perú.
- INEI. (2022). *Acceso a los servicios básicos en el Perú.* Lima. Obtenido de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1863/libro.pdf
- INGEMMET. (s.f.). *Instituto Geológico y Metalúrgico de Perú .* Recuperado el 2023 de 11 de 05, de <https://repositorio.ingemmet.gob.pe/handle/20.500.12544/157#files>

- IPEX. (2022). MUNICIPAL PIPING SYSTEMS. *Hydraulics of PVC Pipe*, III(12), 2. Obtenido de <https://ipexna.com/wp-content/uploads/2022/08/bulletin-caen-ipex-hydraulics-of-pvc-pipe.pdf>
- Kępa, U., & Stańczyk-Mazanek, E. (2014). A hydraulic model as a useful tool in the operation of a water-pipe network. *Pol. J. Environ. Stud.*, 23(3), 995-1001. Obtenido de <http://www.pjoes.com/pdf-89274-23132?filename=A+Hydraulic+Model+as+a.pdf>
- Mayorga Ponce, R., Graciano Ventura, D., Hernández c, A., & Moctezuma Jiménez, P. (2022). Cuadro comparativo de Análisis Paramétrico y No Paramétrico. *Educación y Salud Boletín Científico Instituto de Ciencias de la Salud Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*, X(20), 90-93. Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/ICSA/article/download/9143/8958/>
- MINEDU. (2023). *ESCALE*. Obtenido de Estadística de la Calidad Educativa: https://escale.minedu.gob.pe/PadronWeb/info/ce?cod_mod=d97b776dc275d43f72a689bb57418fc8&anexo=e5b2cd081051c13812069b7b77f0b41c
- MINSA. (2011). *Reglamento de la Calidad del Agua para CONsumo HUmano*. Lima. Obtenido de http://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento_Calidad_Agua.pdf
- MINSA. (2023). *BOLETIN EPIDEMIOLOGICO DEL PERU*. Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades. Obtenido de https://www.dge.gob.pe/epipublic/uploads/boletin/boletin_202315_15_141523.pdf
- MINSA. (2023). *Número de episodios de diarreas agudas, Peru 2018 al 2023*. Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades. Obtenido de <https://www.dge.gob.pe/portal/docs/vigilancia/sala/2023/SE19/edas.pdf>
- Moreno, F., & Lopez, R. (1991). *Determinacion de Cloro Residual. Manual N° 06*. IMTA.
- Moriasi, D., & Arnold, J. (2007). Corrosion in water supply pipe stainless steel 304 and a supply line of helium in stainless steel 316. *Model valuation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*, 50(III), 885-900.
- OMS. (2006). *Guías para la calidad del agua potable [recurso electrónico]: incluye el primer apéndice*. (Tercera edición. Versión electrónica para la web. ed., Vol. Vol.

- 1: Recomendaciones).
- OMS. (2022). *Guidelines for drinking-water quality*. Ginebra: Organización Mundial de la Salud. <https://doi.org/https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
- Priori, J. J., & Acurio, H. E. (2021). *Modelamiento hidráulico y de la calidad del agua en un sistema de suministro de agua potable en una zona rural del Caton Azogues*. [Tesis de grado. Universidad de Cuenca]. Recuperado el 12 de setiembre de 2023, de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/37668>
- PVC Pipe Association. (2012). *Handbook of PVC Pipe Design and Construction* (Vol. FIFTH EDITION). Industrial Press Inc. Obtenido de <https://www.uni-bell.org/portals/0/ResourceFile/pvcpcdc-chapter9.pdf>
- Ramos, L. (2013). *Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación*. Universidad de Valencia. Obtenido de <https://gdocu.upv.es/alfresco/service/api/node/content/workspace/SpacesStore/d2365119-5420-4d78-bbae-7ae140ea17ea/5599.pdf?guest=true>
- Rossman, L. A. (1993). *EPANET water quality model* (Vol. 2). Cincinnati, United States.
- Sanchez Martinez, O. (2020). *Modelación de cloro libre en la red de distribución de ACUALCOS S.A.E.S.P. que abastece los barrios de la UPZ 89: San Isidro Patios – Localidad*. [Tesis de gra. Universidad Piloto de Colombia].
- Sánchez Ruiz, C. (2022). *Aplicación de la herramienta EPANET 2 toolkit para la modelación del destino y transporte de cloro residual en redes de distribución de agua como herramienta de mejoramiento operacional*. [Tesis de Maestri, Uniuersidad Nacional de Colombia].
- SENAMHI. (2020). Recuperado el 03 de 10 de 2023, de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Tuero, D., & Huamani, K. (2021). *Simulación de cloro residual mediante el software Watercad en la red de distribución de la comunidad campesina de Sacsamarca, distrito de Huancavelica*. [Tesis de grado. Universidad Continental]. Recuperado el 12 de setiembre de 2023, de <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12129>
- Tzatchkov, V. G. (2016). Modelación de la variación del consumo de agua potable con métodos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, VII(3), 115-133.
- Unidad de epidemiologia y salud ambiental. (2022). *GUIA TECNICA PARA LA CLORACION PARA LA CLORACION DEL AGUA EN CASO DE VERIFICAR QUE EL CLORO RESIDUAL LIBRE SEA MENOR A 0.5 PPM*. Obtenido de

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5566029/4951026-guia-tecnica-para-la-cloracion-del-agua.pdf?v=1702918195>

- Vargas Cordero, Z. (2009). *LA INVESTIGACIÓN APLICADA: UNA FORMA DE CONOCER LAS REALIDADES CON EVIDENCIA* (Vol. 33). San Pedro, Montes de Oca, Costa Rica: Educacion. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44015082010>
- Warton, B, Heitz, A, Joll, C, & Kagi, R. (2006). *A new method for calculation of the chlorine* (Vol. 40). Reino Unido: Water Research .
- White, G. C. (2010). *andbook of Chlorination and Alternative Disinfectants* (5ta edicion ed.). Hoboken, Nueva Jersey.: John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470561331>
- WHO. (2006). *Guidelines for Drinking-Water Quality* (Vol. I). Ginebra. Obtenido de [ttps://www.who.int/publications/i/item/9241546964](https://www.who.int/publications/i/item/9241546964).

VI. ANEXOS

Anexo 1: Panel Fotográfico.

Anexo 2: Plano de ubicación de la zona de estudio.

Anexo 3: Plano de red de distribución de agua potable.

Anexo 4: Plano de puntos de muestreo.

Anexo 5: Plano de concentraciones de cloro residual.

Anexo 6: Plano de simulación hidráulica.

Anexo 7: Registro de caudales salientes del reservorio.

Anexo 8: Presiones horarias.

Anexo 9: Mediciones de cloro a partir de la activación del sistema de cloración.

Anexo 10: Gráficos de ecuaciones de orden de reacción 1.

Anexo 11: Padrón de vivienda con cantidad habitantes.

Anexo 12: Permiso para uso de información.

Anexo 1: Panel Fotográfico.

Figura 50

Obtención de equipo para el levantamiento topográfico



Figura 51

Levantamiento de punto de entrega de agua en Escuela Primaria (C-33 en plano)



Figura 52

Medidor instalado en línea de aducción

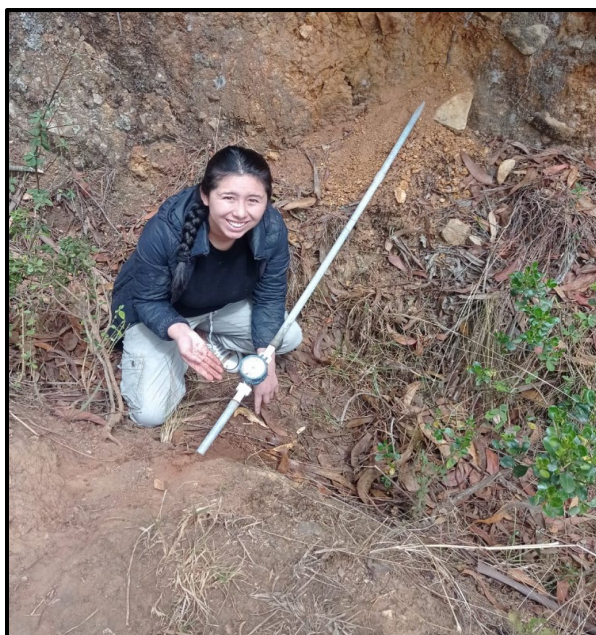


Figura 53

Toma de muestras en vivienda 37



Figura 54

Monitoreo de cloro en el nodo 8



Figura 55

Manómetros para monitoreo de presiones



Figura 56

Capacitación para monitoreo de presiones



Figura 57

Capacitación e instalación de manómetro en vivienda C1



Figura 58

Monitoreo de cloro vivienda 8



Figura 59

Verificación de válvulas de control



Figura 60

Lectura de presiones

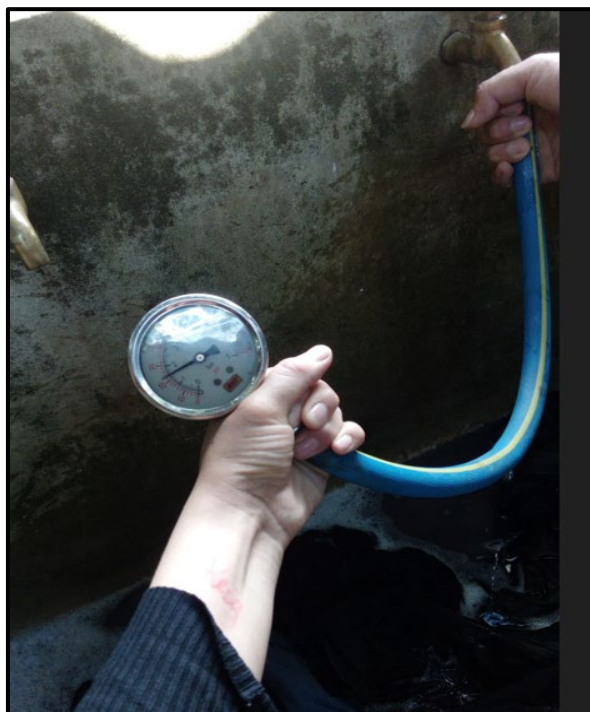


Figura 61

Vista panoramica de parapuquio



Figura 62

Resultados de monitoreo de PH en reservorio



Figura 63

Monitoreo de PH en la vivienda 17



Figura 64

Kit multiparámetros laboratorio UNC-Celendín



Figura 65

Comparador visual de PH

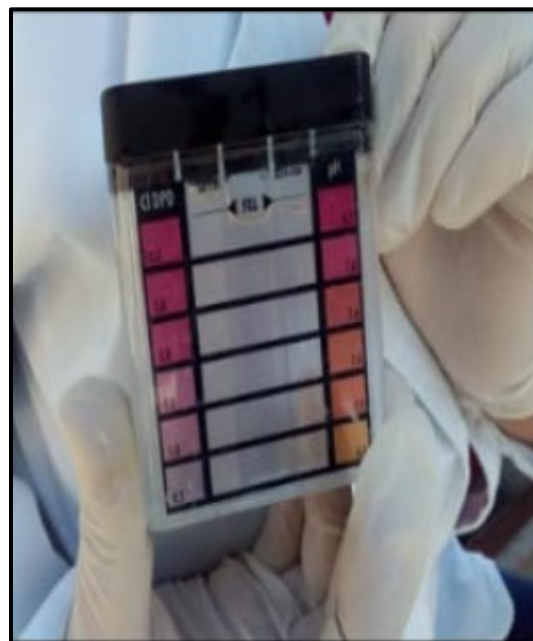


Figura 66

Visita a captación tres melones en compañía de responsables de ATM



Figura 67

Muestreo para determinación de parámetros de dureza, hierro y manganeso



Anexo 2: Plano de ubicación de la zona de estudio.

Anexo 3: Plano de red de distribución de agua potable.

Anexo 4: Plano de puntos de muestreo.

Anexo 5: Plano de concentraciones de cloro residual.

Anexo 6: Plano de simulación hidráulica.

Anexo 7: horario de caudales salientes del reservorio

Hora Martes	Miércoles	Hora Miércoles	Jueves	Hora Jueves	Viernes	Hora Viernes	Sábado	Hora Sábado	Domingo	Hora Domingo
07:02	0.286	07:01	0.235	07:04	0.275	07:05	0.2	07:03	0.18	07:02
08:07	0.382	08:03	0.315	08:04	0.342	08:06	0.268	08:08	0.24	08:02
09:01	0.518	09:04	0.557	09:05	0.533	09:03	0.428	09:06	0.403	09:07
10:05	0.44	10:08	0.417	10:03	0.386	10:04	0.339	10:02	0.308	10:01
11:03	0.23	11:02	0.202	11:04	0.192	11:06	0.157	11:07	0.14	11:05
12:05	0.174	12:03	0.153	12:02	0.163	12:01	0.119	12:04	0.106	12:08
13:01	0.134	13:05	0.122	13:03	0.101	13:04	0.08	13:07	0.064	13:08
14:06	0.093	14:02	0.082	14:01	0.07	14:07	0.051	14:03	0.041	14:05
15:05	0.161	15:03	0.131	15:06	0.142	15:04	0.102	15:07	0.09	15:02
16:07	0.22	16:01	0.194	16:04	0.173	16:05	0.143	16:03	0.122	16:06
17:02	0.464	17:04	0.443	17:01	0.45	17:08	0.363	17:05	0.341	17:03

Anexo 8: Presiones horarias

Tabla 38

Presiones horarias registradas durante los 7 días de monitoreo de presiones (m.c.a.)

Día	Hora	C1	C2	C14	C15	C17	C31	C35	C44
1	07:00	68.5	21.7	9.5	24.5	39.6	38.8	17.6	15.6
	09:00	68.2	16.9	9.3	19.9	38.6	38.3	17.2	15.1
	11:00	68.7	23.6	9.5	26.3	40	40.5	18.7	15.8
	13:00	68.6	24.5	9.5	27.1	40.2	40.6	18.8	15.6
	15:00	68.1	23.9	9.5	26.6	40.1	40.6	17.6	15.5
	17:00	68.5	21.1	9.5	23.9	39.5	39.6	17.9	15.3
2	07:00	68.6	21.9	9.7	24.7	39.8	39	17.8	15.7
	09:00	68.3	17	9.4	20	38.7	38.4	17.3	15.2
	11:00	68.8	23.7	9.6	26.4	40.1	40.6	18.9	15.9
	13:00	68.7	24.6	9.6	27.3	40.3	40.7	18.9	15.7
	15:00	68.2	24	9.6	26.7	40.2	40.7	17.7	15.6
	17:00	68.6	21.3	9.6	24	39.6	39.7	18	15.4
3	07:00	68.4	21.8	9.6	24.6	39.7	38.9	17.7	15.6
	09:00	68.1	16.8	9.2	19.8	38.5	38.2	17.1	15
	11:00	68.6	23.5	9.5	26.2	39.9	40.4	18.6	15.8
	13:00	68.5	24.4	9.5	27	40.1	40.5	18.7	15.5
	15:00	68	23.8	9.4	26.5	40	40.5	17.5	15.4
	17:00	68.4	21	9.4	23.8	39.4	39.5	17.8	15.2
4	07:00	68.5	21.6	9.4	24.4	39.5	38.7	17.5	15.5
	09:00	68.2	16.7	9.2	19.7	38.4	38.1	17	14.9

	11:00	68.7	23.4	9.4	26.1	39.8	40.3	18.5	15.7
	13:00	68.6	24.3	9.4	26.9	40	40.4	18.6	15.4
	15:00	68.1	23.7	9.3	26.4	39.9	40.4	17.4	15.3
	17:00	68.5	20.9	9.3	23.7	39.3	39.4	17.7	15.1
5	07:00	68.6	21.7	9.5	24.5	39.6	38.8	17.6	15.6
	09:00	68.3	16.8	9.3	19.8	38.5	38.2	17.1	15.1
	11:00	68.8	23.5	9.5	26.2	40	40.4	18.6	15.8
	13:00	68.7	24.4	9.5	27	40.1	40.5	18.7	15.6
	15:00	68.2	23.8	9.4	26.5	40	40.5	17.5	15.5
	17:00	68.6	21	9.4	23.8	39.4	39.5	17.8	15.3
6	07:00	68.4	21.9	9.7	24.6	39.7	39	17.8	15.7
	09:00	68.1	17	9.5	20	38.7	38.3	17.3	15.2
	11:00	68.6	23.8	9.7	26.5	40.1	40.7	18.9	15.9
	13:00	68.5	24.7	9.7	27.3	40.3	40.8	18.9	15.7
	15:00	68	24.1	9.6	26.7	40.2	40.8	17.7	15.6
	17:00	68.5	21.3	9.6	24	39.6	39.7	18	15.4
7	07:00	68.6	21.8	9.6	24.7	39.7	38.9	17.7	15.6
	09:00	68.3	16.9	9.4	19.9	38.6	38.3	17.2	15.1
	11:00	68.8	23.6	9.6	26.3	40	40.5	18.7	15.8
	13:00	68.7	24.5	9.6	27.1	40.2	40.6	18.8	15.6
	15:00	68.2	23.9	9.5	26.6	40.1	40.6	17.6	15.5
	17:00	68.6	21.1	9.5	23.9	39.5	39.6	17.9	15.3

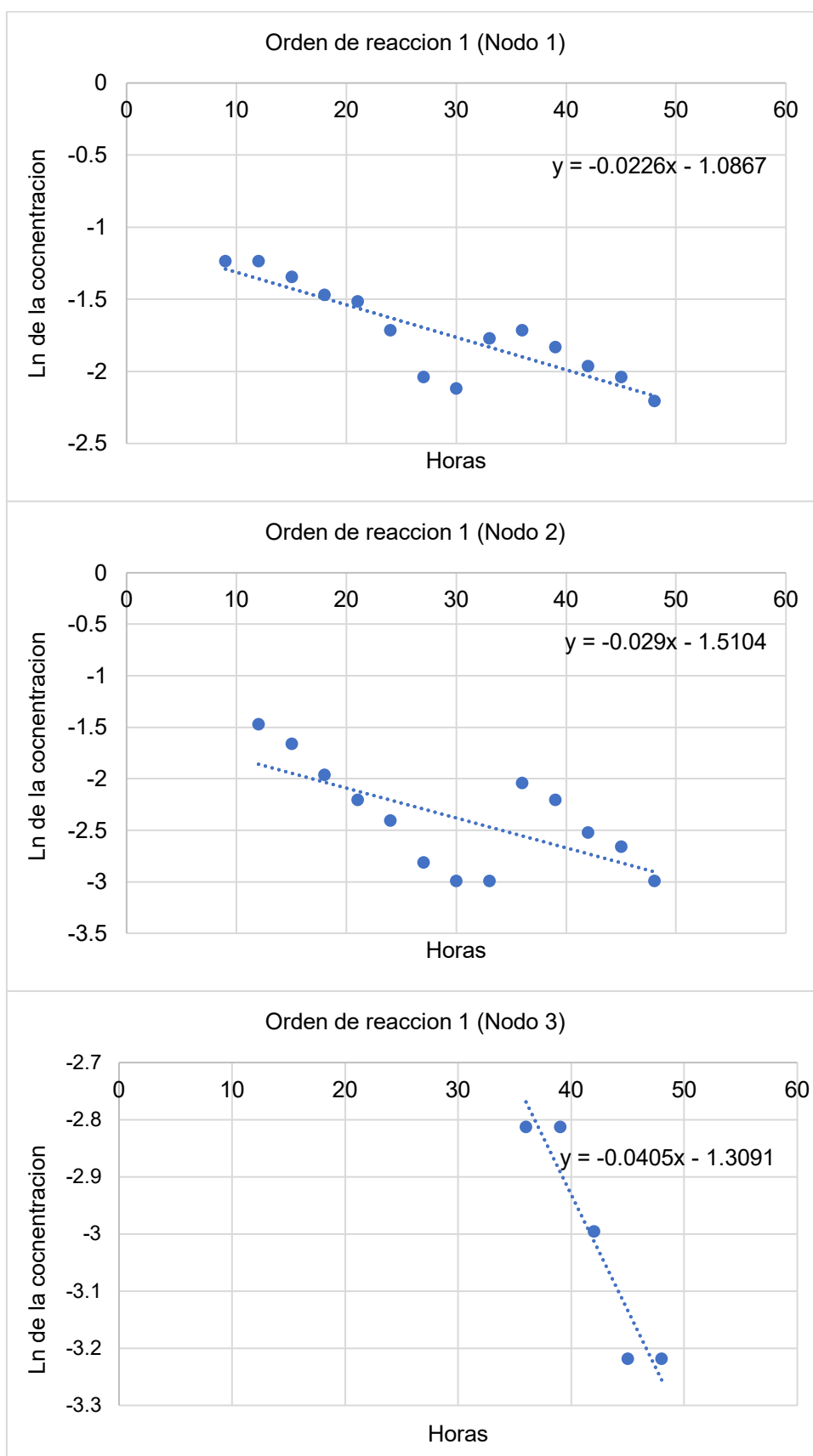
Anexo 9: Mediciones de cloro a partir de la activación del sistema de cloración.

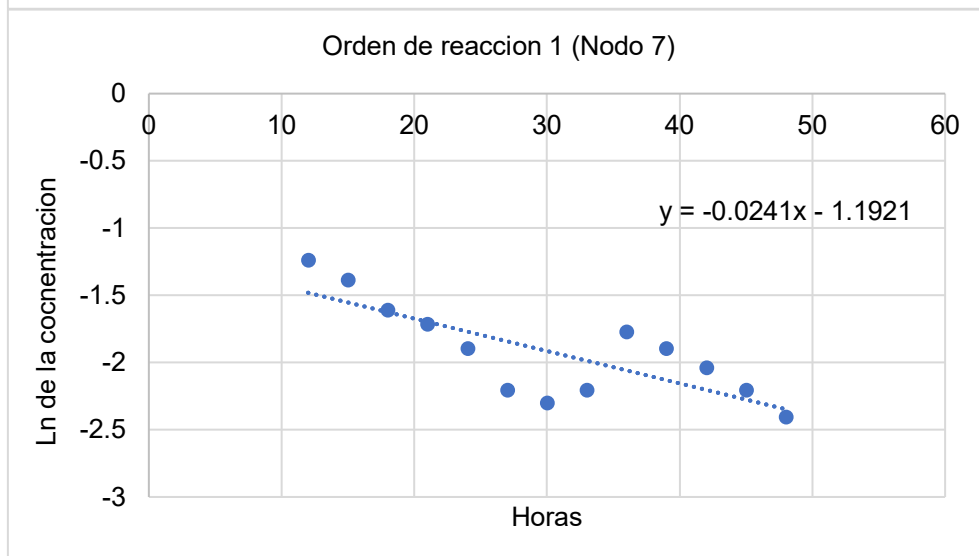
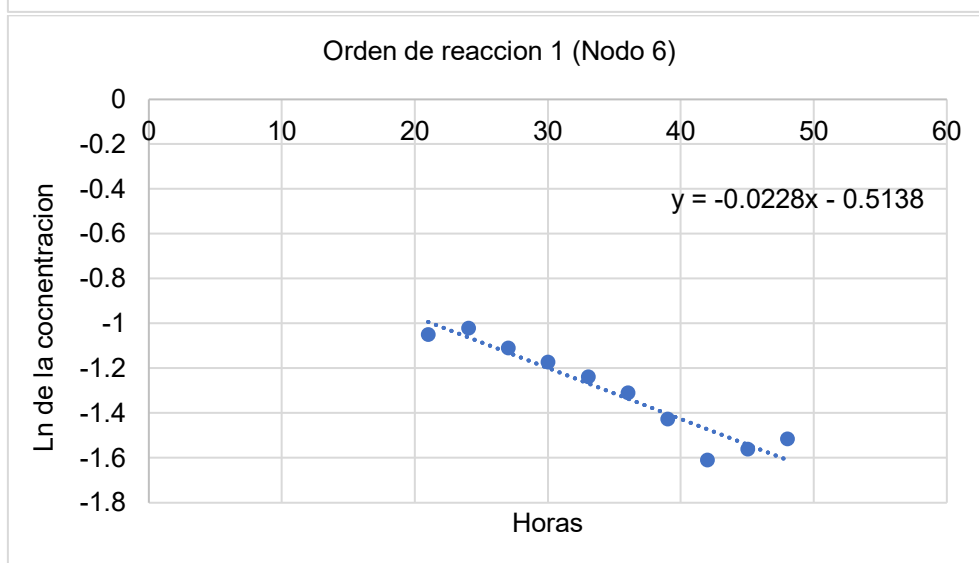
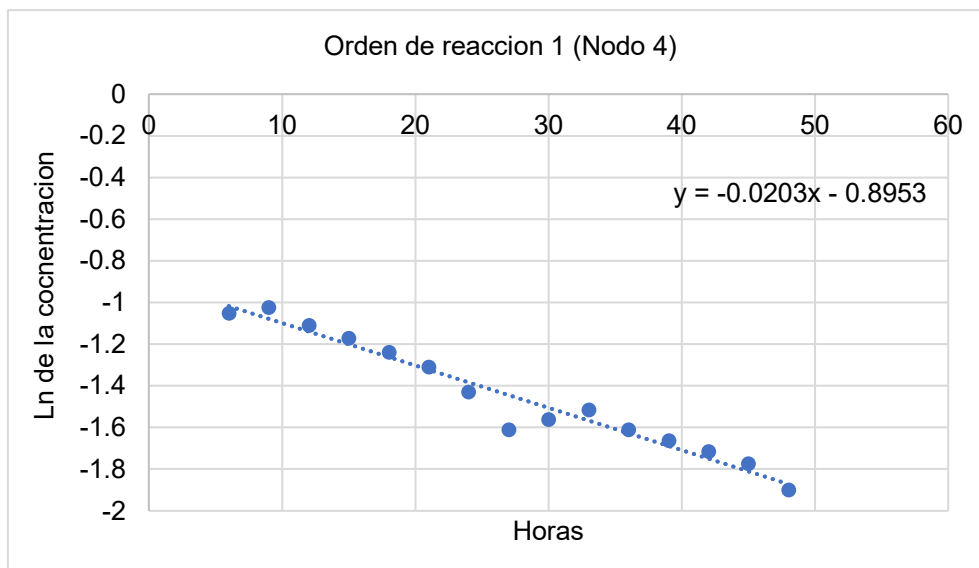
Tabla 39

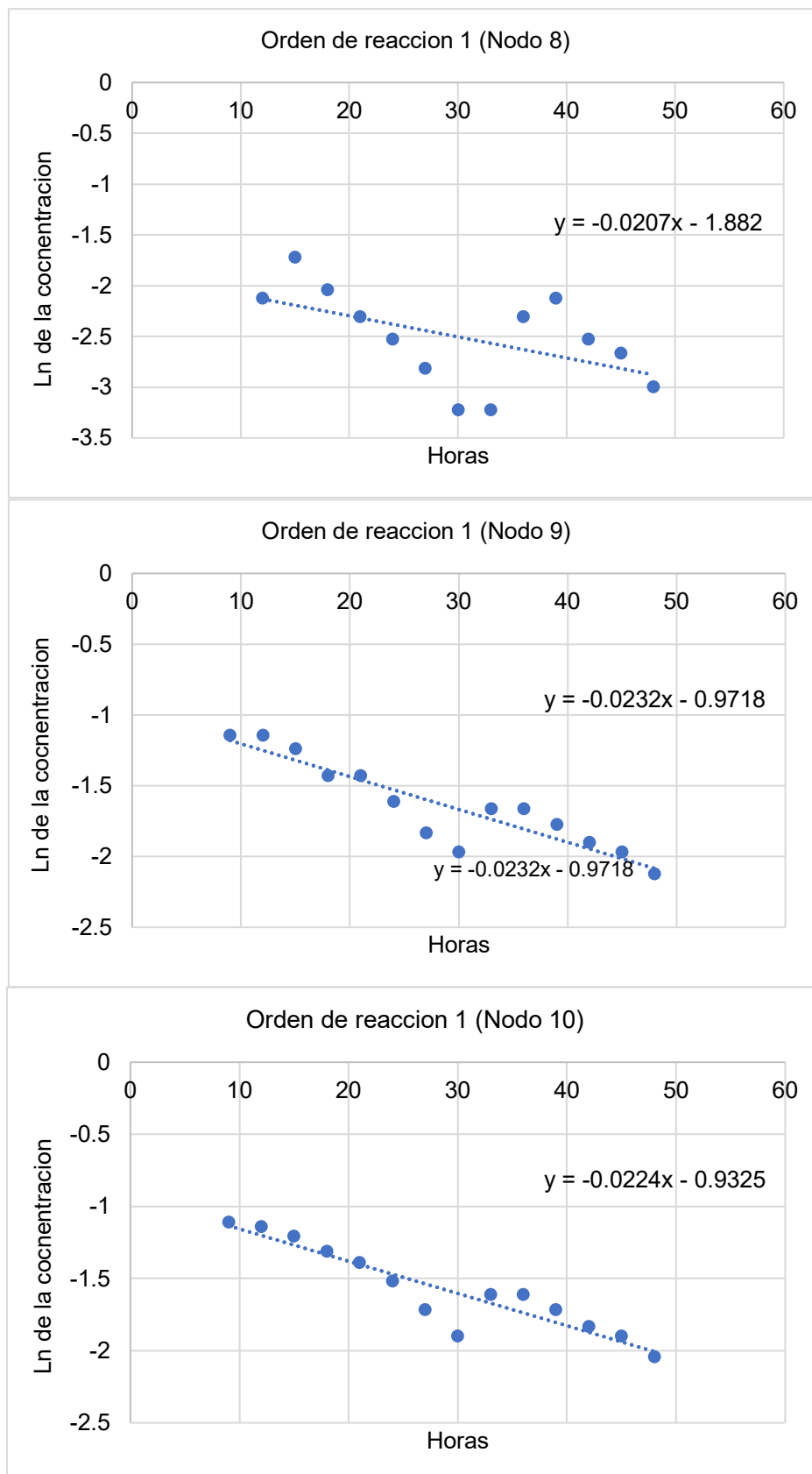
Valores promedio de cloro residual medidos en campo a partir de la activación del sistema de cloración

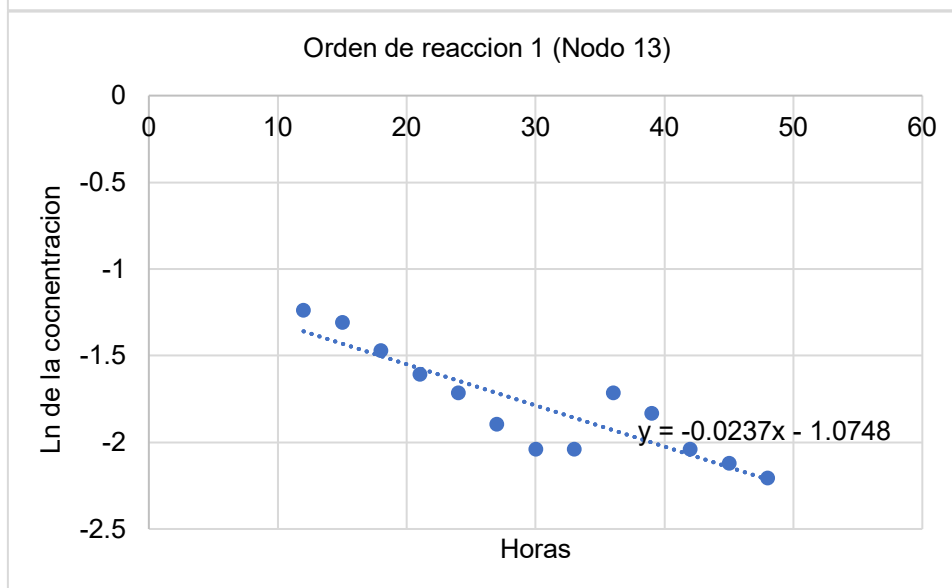
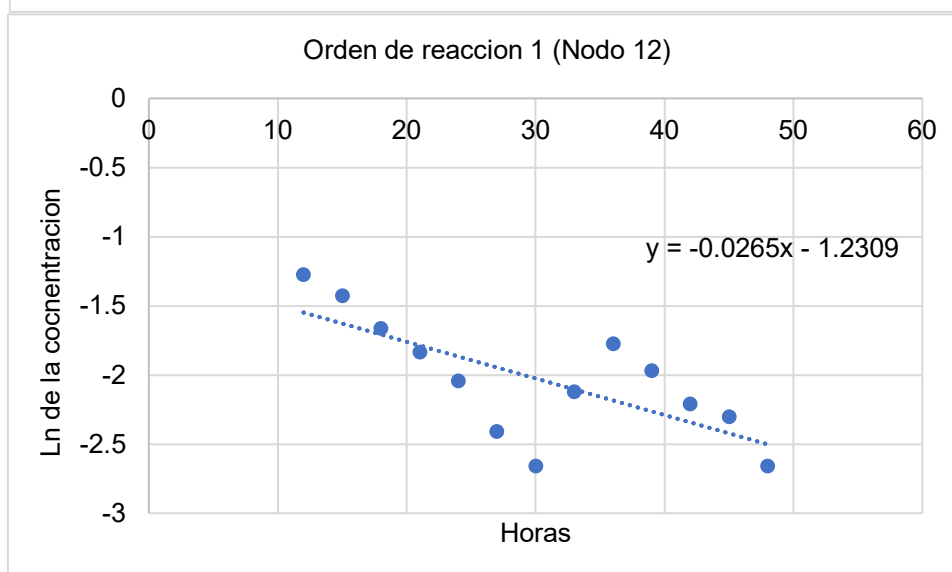
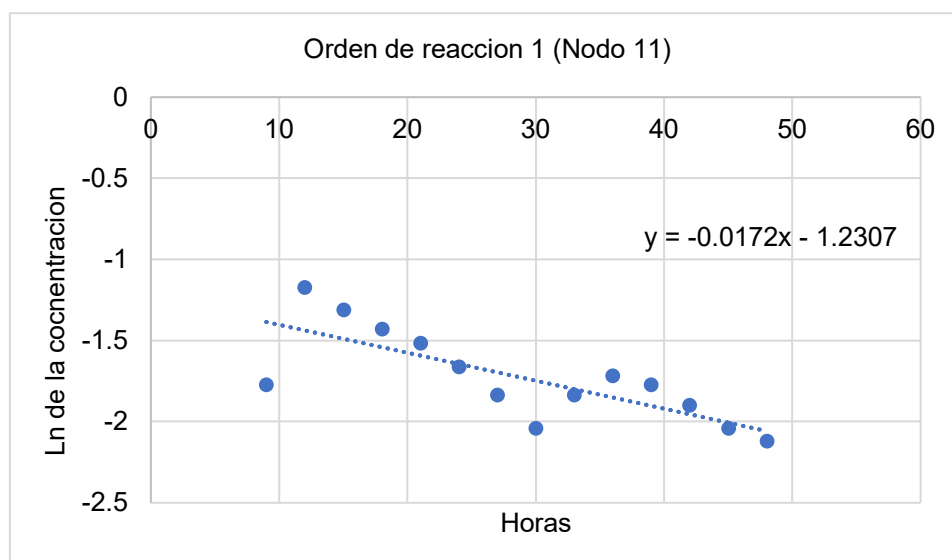
HORAS	J - 1	J - 2	J - 3	J - 4	J - 6	J - 7	J - 8	J - 9	J - 10	J - 11	J - 12
0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1.5	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
6	0.0000	0.0000	0.0000	0.3500	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
9	0.2900	0.0000	0.0000	0.3600	0.0000	0.0000	0.0000	0.3200	0.3300	0.1700	0.0000
12	0.2900	0.2300	0.0000	0.3300	0.0000	0.2900	0.1200	0.3200	0.3200	0.3100	0.2800
15	0.2600	0.1900	0.0000	0.3100	0.0000	0.2500	0.1800	0.2900	0.3000	0.2700	0.2400
18	0.2300	0.1400	0.0000	0.2900	0.0000	0.2000	0.1300	0.2400	0.2700	0.2400	0.1900
21	0.2200	0.1100	0.0000	0.2700	0.1100	0.1800	0.1000	0.2400	0.2500	0.2200	0.1600
24	0.1800	0.0900	0.0000	0.2400	0.0900	0.1500	0.0800	0.2000	0.2200	0.1900	0.1300
27	0.1300	0.0600	0.0000	0.2000	0.0700	0.1100	0.0600	0.1600	0.1800	0.1600	0.0900
30	0.1200	0.0500	0.0000	0.2100	0.0600	0.1000	0.0400	0.1400	0.1500	0.1300	0.0700
33	0.1700	0.0500	0.0000	0.2200	0.0500	0.1100	0.0400	0.1900	0.2000	0.1600	0.1200
36	0.1800	0.1300	0.0600	0.2000	0.0500	0.1700	0.1000	0.1900	0.2000	0.1800	0.1700
39	0.1600	0.1100	0.0600	0.1900	0.0600	0.1500	0.1200	0.1700	0.1800	0.1700	0.1400
42	0.1400	0.0800	0.0500	0.1800	0.0500	0.1300	0.0800	0.1500	0.1600	0.1500	0.1100
45	0.1300	0.0700	0.0400	0.1700	0.0600	0.1100	0.0700	0.1400	0.1500	0.1300	0.1000
48	0.1100	0.0500	0.0400	0.1500	0.0600	0.0900	0.0500	0.1200	0.1300	0.1200	0.0700

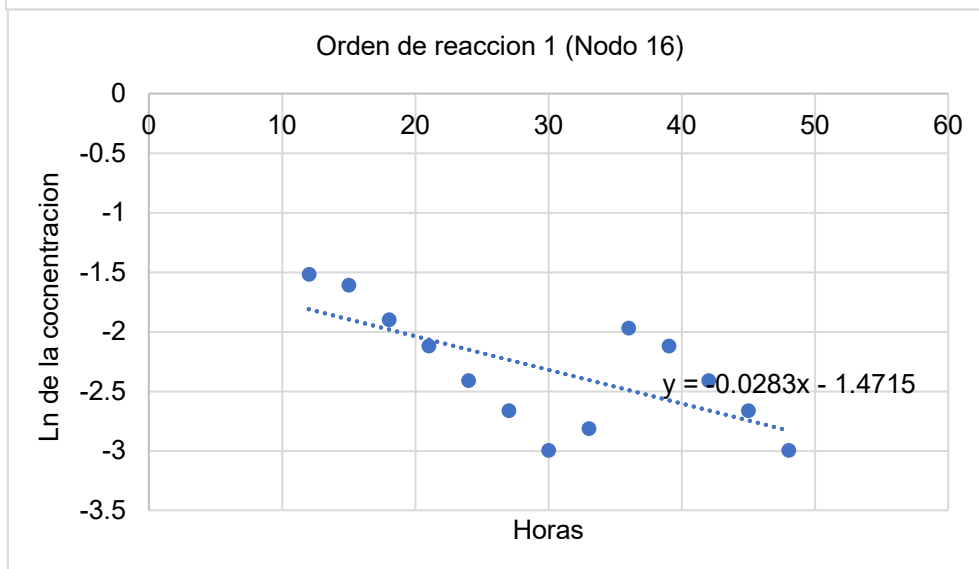
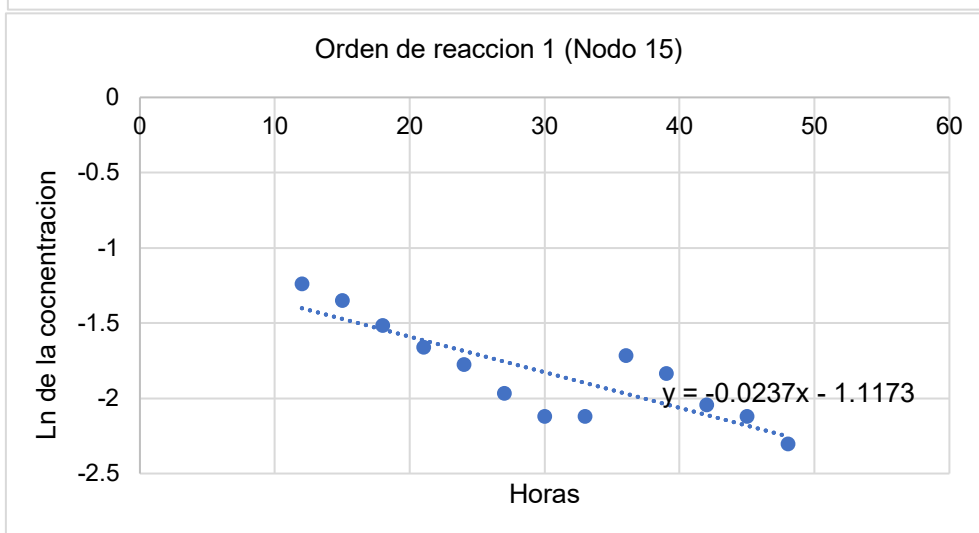
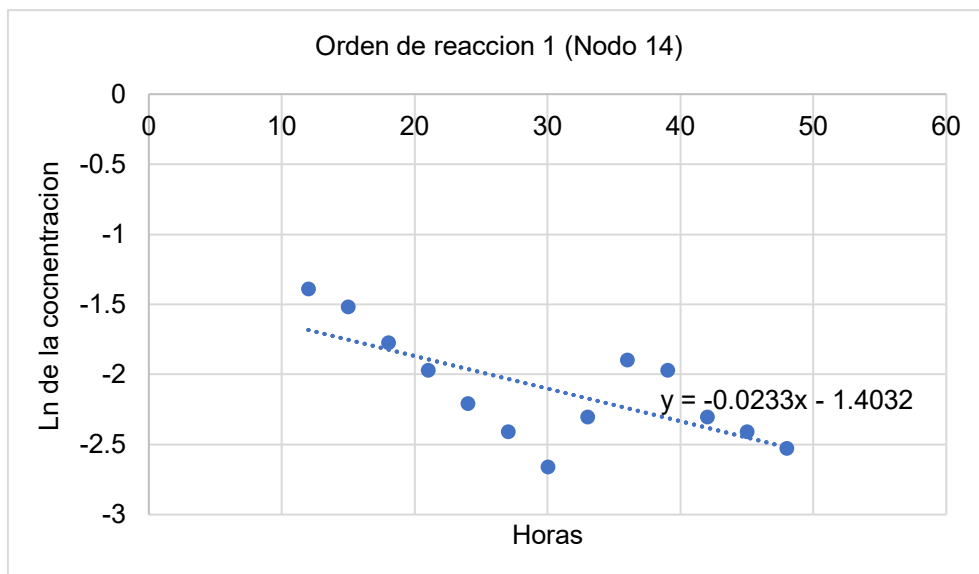
Anexo 10: Gráficos de ecuaciones de orden de reacción 1.

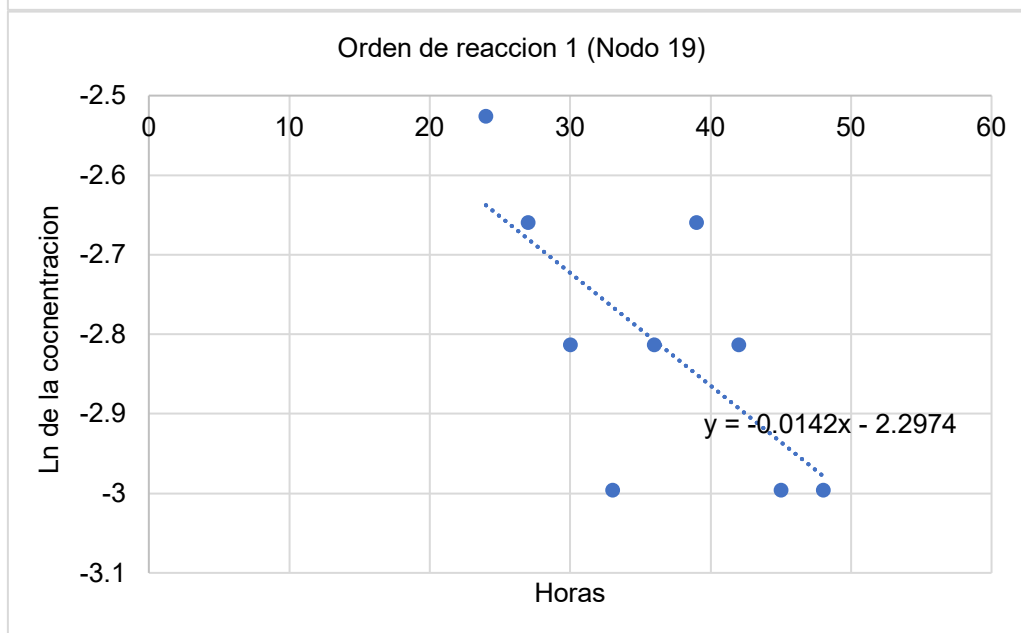
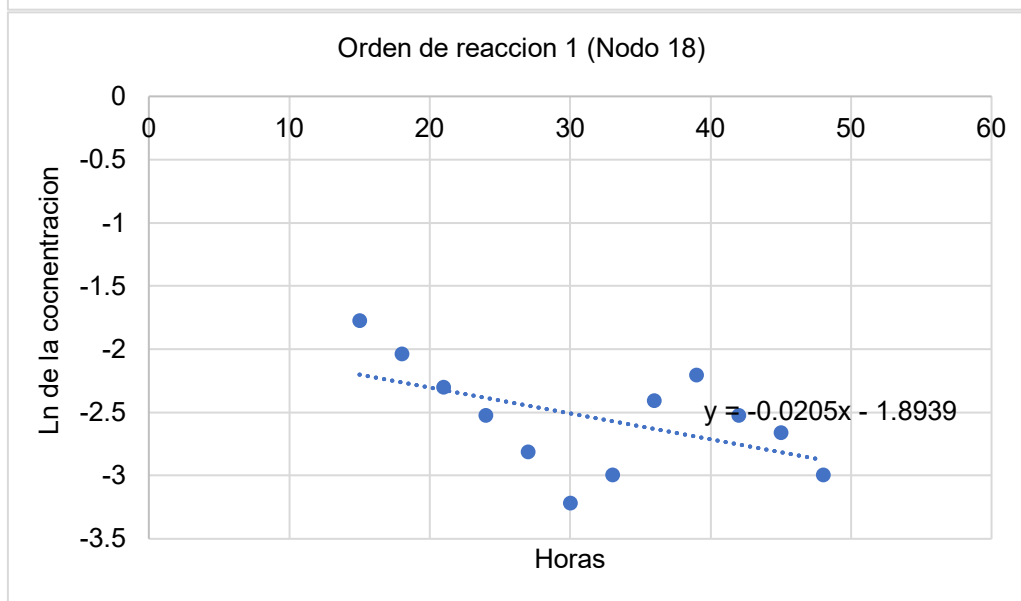
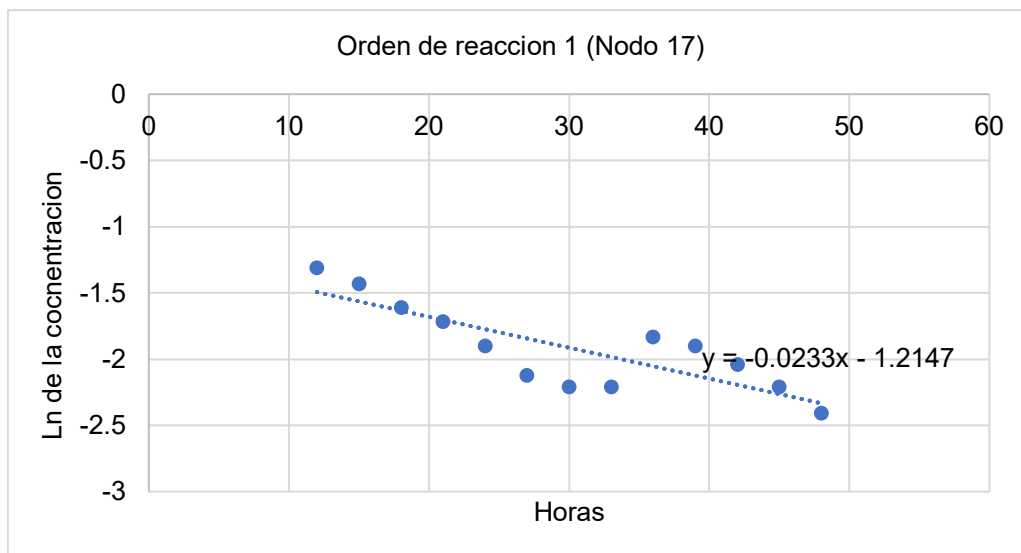












Anexo 11: Padrón de vivienda con cantidad habitantes.

PADRÓN DE ASOCIADOS

ORGANIZACIÓN COMUNAL PRESTADORA DE SERVICIOS DE SANEAMIENTO "JUNTA ADMINISTRADORA DE SERVICIOS DE SANEAMIENTO (JASS) DEL CP. PARIAPUQUIO"

REGIÓN :	CAJAMARCA
PROVINCIA :	CELENDIN
DISTRITO :	CELENDIN
CENTRO POBLADO :	PARIAPUQUIO

FECHA: / / 2019

N° Vivienda	Nombres y Apellidos (Titular de familia y conyugue)	DNI	N° Miembros			Firma
			H	M	Total	
01	MARIA LORENZA ARAUJO SILVA	80135405	3	2	5	<i>[Firma]</i>
02	MERCEDES CHÁVEZ CHÁVEZ	27042993				<i>[Firma]</i>
03	RUFINO CHÁVEZ CHÁVEZ	27044661				<i>[Firma]</i>
04	MARIA JULIANA CHÁVEZ AGUIRRE	27048910				<i>[Firma]</i>
05	EDUARDO CHÁVEZ ROJAS	27043672				<i>[Firma]</i>
06	HIPOLITO CHÁVEZ MUÑOZ	27043782				
07	ORLANDO GUILLERMO CHÁVEZ SILVA	27081422	2	2	4	<i>[Firma]</i>
08	NÉLIDA CHÁVEZ SILVA	42725627	0	2	2	<i>[Firma]</i>
09	VILMA CHAVEZ SILVA	41457560	1	1	2	<i>[Firma]</i>
10	MATIAS ABRAHAM CHÁVEZ RODRIGUEZ	41289047				
11	LOIDA ANPAZO CHÁVEZ CHÁVEZ	45803927	0	2	2	<i>[Firma]</i>
12	FRANCILES MARIN CHÁVEZ	27042427	1	2	3	<i>[Firma]</i>
13	OSCAR ADIBUNDO MARIN ORTIZ	27042101				
14	LUIS ORLANDO MARIN ORTIZ	40896959	1	2	3	<i>[Firma]</i>
15	JUAN FRANCISCO MARIN MONTOYA	27044499				<i>[Firma]</i>
16	LUIS PRESBITERO MARIN ORTIZ	27058718				<i>[Firma]</i>
17	OSCAR ADISHIRO MARIN MARIN	43267056	0	3	3	<i>[Firma]</i>
18	MERGEN ALEX MARIN ACOSTA	41554683	1	3	4	<i>[Firma]</i>
19	CESAR HUMBERTO MARIN RIOS	45695245				
20	JAIME ADAM MARIN RIOS	47365020				



N° Vivienda	Nombres y Apellidos (Titular de familia y conyugue)	DNI	N° Miembros			Firma
			H	M	Total	
21	FRANCISCO MONTOYA MARIN	27042657	1	2	3	<i>Francisco Montoya</i>
22	MARCELINO MONTOYA CHAVEZ	27049357	2	5	7	<i>M. Montoya</i>
23	PEDRO MUÑOZ CHAVEZ	27042400	1	0	1	<i>Pedro Muñoz</i>
24	PAULA MUÑOZ CHAVEZ	27045402	1	1	2	
25	JOSÉ JOVINO MUÑOZ CHAVEZ	27045698	1	2	3	<i>José Jovino Muñoz</i>
26	YUNCOR HUMBERTO MUÑOZ MARIN	74412203				
27	PAULA MUÑOZ CERQUIN	27049505	1	3	4	<i>Paula Muñoz</i>
28	CARLOS MUÑOZ MUÑOZ	27049255	1	1	2	
29	JOSÉ ONÉCIMO MUÑOZ MUÑOZ	27080401				
30	ELIAS MUÑOZ MUÑOZ	40941609	2	2	4	<i>Eliás</i>
31	MARIA LUISA ORTIZ CHAVEZ	43920478				
32	JULIO VIDAL ORTIZ CHAVEZ	27043292	4	1	5	<i>Julio Vidal</i>
33	JUAN PRESBITERO ORTIZ CHAVEZ	27049887				<i>Juan Presbitero</i>
34	BENICIO HIPOLITO ORTIZ LLAHOGA	27042732	2	1	3	<i>Benicio</i>
35	MANUEL ISABEL ORTIZ LLAHOGA	27042069	1	1	2	<i>Manuel Isabel</i>
36	SEBASTIAN LAURIANO ORTIZ LLAHOGA	27042619	2	2	4	<i>Sebastián</i>
37	JULIA ROSARIO ORTIZ LLAHOGA	80059610	1	2	3	<i>Julia Rosario</i>
38	MARGARITA FILONILA ORTIZ LLAHOGA	27042463	1	1	2	<i>Margarita</i>
39	JOSÉ ADISHIRO ORTIZ ORTIZ	27074441	2	4	6	<i>José</i>
40	JORGE RUBIO COTRINA	27050964				
41	MARTÍN SILVA MARIN	80061574	2	2	4	<i>Martín</i>
42	EZEQUIEL SÁNCHEZ DÍAZ	27054875	1	1	2	<i>Ezequiel</i>
43	ABRAHAM GUADANA CHAVEZ	27048290	2	2	4	<i>Abraham Guadana</i>
44	ALBERTO MAGNO ZEGARRA MARIN	27046766	1	1	2	<i>Alberto Magno</i>



Anexo 12: Permiso para uso de información..

AUTORIZACIÓN PARA USO DE INFORMACIÓN

Yo; Carlos Muñoz Muñoz con DNI N° 27049255 y domicilio en el Caserío Parapuquio distrito Celendín, provincia Celendín, región Cajamarca, desempeñando el cargo de presidente de la JASS PARAPUQUIO en el Caserío del mismo nombre.

Hago de conocimiento que:

- En mi condición de autoridad, estoy facilitando y a la vez autorizando el uso de la información sobre ubicación, coordenadas, croquis, padrón de asociados, padrón de cantidad de usuarios por vivienda, diámetros de tuberías, caudales y volumen de reservorio; pertenecientes al sistema de agua potable de la JASS que represento.
- Dicha información será utilizada por la Señora keyko sulamita Gonzales Salazar con DNI 75068066 domicilio en el Jr. Ayacucho 951 de la provincia de Celendín; ex alumna de la universidad nacional de Cajamarca filial Celendín, de la escuela académico profesional ingeniería sanitaria, con fines de uso exclusivo para la elaboración de su tesis titulada "SIMULACIÓN DEL DECAIMIENTO DE CLORO RESIDUAL UTILIZANDO WATERGEMS Y COMPARACIÓN CON LA MEDICIÓN DIRECTA EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DEL CASERIO PARAPUQUIO, PROVINCIA DE CELENDÍN, CAJAMARCA, 2023".
- Doy fe que la información con la que está trabajando para la elaboración de esta investigación es auténtica y ah sido verificada por mi persona a fin de que se conozca la realidad de mi caserío.
- Asimismo, se pide que toda la información de importancia y utilidad recopilada durante la ejecución de la investigación en mención, se entregue una copia al secretario de la JASS parapuquio.



Celendín, 20 de junio del 2023


CARLOS MUÑOZ MUÑOZ
DNI 27049255