

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA

ESCUELA ACADEMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA SANITARIA



**“MODELADO DEL CLORO RESIDUAL USANDO WATERCAD Y SU
CONTRASTACIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA
POTABLE DE LA CIUDAD DE CORTEGANA – PROVINCIA DE CELENDÍN 2024”**

TESIS PARA OPTAR:

EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO SANITARIO

TESISTA:

BACH. ANGEL SAMUEL DÍAZ MELCHOR

ASESOR:

DR. ING. AGUSTIN EMERSON MEDINA CHAVEZ

CELENDIN, 2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. **Investigador:** Angel Samuel Díaz Melchor
DNI: 71586022
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:**
"MODELADO DEL CLORO RESIDUAL USANDO WATERCAD Y SU CONTRASTACIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE CORTEGANA – PROVINCIA DE CELENDÍN 2024"
6. **Fecha de evaluación:** 02 de octubre 2025
7. **Software antiplagio:** ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 16%
9. **Código Documento:** oid: 3117:506943753
10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:**
☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 02 de octubre 2025



Firmado digitalmente por:
MEDINA CHAVEZ AGUSTIN
EMERSON FIR 27040584 hard
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 02/10/2025 15:27:50-0500

FIRMA DEL ASESOR



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258801 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 02/10/2025 16:33:33-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TÍTULO : *MODELADO DEL CLORO RESIDUAL USANDO WATERCAD Y SU CONTRASTACIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE CORTEGANA - PROVINCIA DE CELENDÍN 2024.*

ASESOR : *Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez.*

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0778-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 30 de diciembre de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **quince días del mes de enero de 2026**, siendo las quince horas con treinta minutos (03:30 p.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 *MODELADO DEL CLORO RESIDUAL USANDO WATERCAD Y SU CONTRASTACIÓN EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE DE LA CIUDAD DE CORTEGANA - PROVINCIA DE CELENDÍN 2024*, presentado por el Bachiller en Ingeniería Sanitaria *ANGEL SAMUEL DÍAZ MELCHOR*, de la Escuela Profesional de Ingeniería Sanitaria - Filial Celendín; asesorado por el Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez, para la obtención del Título Profesional

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

EVALUACIÓN PRIVADA : *07* PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA : *10* PTS.
EVALUACIÓN FINAL : *17* PTS. *DIECISIETE* (En letras)

En consecuencia, se lo declara *APROBADO* con el calificativo de *DIECISIETE (17)* acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las *17:30* 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

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a: A Dios Jehová, mi Creador y Sustentador: Por su amor, sabiduría y provisión en cada paso de mi vida y carrera académica. Su guía y bendición han sido fundamentales para alcanzar este logro.

Y luego continuar con los agradecimientos a las personas e instituciones:

- A la Universidad Nacional de Cajamarca: Por brindarme la oportunidad de cursar mis estudios de pregrado y por el apoyo institucional que me permitió desarrollar este proyecto.
- A mi asesor, Dr. Ing. Agustín Emerson Medina Chávez: Por su invaluable orientación, dedicación y paciencia a lo largo de este proceso. Sus conocimientos y experiencia fueron fundamentales para el éxito de este trabajo.
- A mi jurado, Dr. Ing. Francisco Huamán Vidaurre, Dr. Ing. Gaspar Méndez Cruz, Dr. Ing. Luis Vásquez Ramírez: Por su tiempo, esfuerzo y valiosas observaciones que contribuyeron a mejorar la calidad de esta tesis.
- Agradezco profundamente al comité directivo, en especial al Dr. Ing. Gilberto Cruzado Vásquez y a la Msc. Ing. María Salome De La Torre Ramírez, cuya guía y consejos fueron cruciales para mi desarrollo como investigador y para la culminación de esta tesis.

Dedicatoria

A mi familia, mi fuente de amor y apoyo incondicional. A mi padre, Fredi Yvan Díaz Pérez, por su fortaleza y sabiduría. A mi madre, Merly Diana Melchor Justo, por su amor incondicional y su constante aliento. A mis hermanos, Fredi Jhunion Díaz Melchor y Jhefer Esmir Díaz Melchor, por su compañía y alegría. Este trabajo es un reflejo de su amor y sacrificio.

Índice de contenidos

AGRADECIMIENTO.....	II
DEDICATORIA.....	III
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
RESUMEN.....	IX
ABSTRACT	X
CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.4. ALCANCES O DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.5. LIMITACIONES	5
1.6. OBJETIVOS	5
1.6.1. OBJETIVO GENERAL.....	5
1.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	6
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	6
2.2. BASES TEÓRICAS	9
2.2.1. DECAIMIENTO DEL CLORO	9
A. Modelamiento del comportamiento del cloro residual	9
B. Modelado de Redes Hidráulicas	10
2.2.2. TEORÍA DE LA CALIDAD DEL AGUA.....	13
A. Factores de calidad de agua	13
B. Importancia de la desinfección del agua.....	14
C. El cloro residual	15

D. Reacciones principales del cloro en agua.....	15
E. Ionización del Ácido Hipocloroso	16
F. Equilibrio Químico	17
G. Propiedades Desinfectantes.....	17
H. Ácido Hipocloroso (HOCl) como Desinfectante	18
I. Reacción del Cloro con Aminas.....	19
J. Cloraminas	20
K. Formación de Subproductos	20
2.2.3. HIPOCLORADOR DE GOTEJO CON CARGA CONSTANTE.....	21
a. Tubería de abastecimiento de agua	21
b. Tanque de polietileno para la solución madre	22
c. Recipiente regulador de carga constante	22
d. Conexiones de salida y dosificación de cloro al reservorio	23
e. Medición del caudal a clorar.....	24
f. Cálculo de la cantidad de cloro	26
g. Cálculo de la cantidad de cloro	26
h. Preparación de la solución clorada o solución madre	27
i. Caudal de goteo (Q) en mL/min	28
2.2.4. TEORÍA SOBRE MEDICIONES Y MUESTREOS DEL CLORO RESIDUAL EN VIVIENDAS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN	28
a. Técnicas y métodos	29
2.2.5. REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA.....	30
a. Obras de captación de agua.....	30
b. Línea de conducción	30
c. Planta de tratamiento	30
d. Reservorio	31
e. Línea de aducción	31
f. Red de distribución.....	31
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	32
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
3.1. UBICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	35
3.2. TIPO, NIVEL, DISEÑO Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	36
A. Tipo de investigación	36

B. Nivel de investigación	36
C. Diseño de investigación	36
D. Método de investigación	37
E. Población	37
F. Muestra	37
G. Unidad de análisis	37
3.3. PROCEDIMIENTO	37
3.3.1. Fase de campo	37
3.4. TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS Y PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	50
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	53
4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	62
5.1. CONCLUSIONES	62
5.2. RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS	65
ANEXOS	70

Índice de tablas

Tabla 1: Puntos de monitoreo de cloro	42
Tabla 2: Puntos para calibración de presiones	43
Tabla 3: Mediciones de cloro en la salida reservorio durante el mes de febrero	51
Tabla 4: Mediciones de cloro en la salida del reservorio durante el mes de marzo	51
Tabla 5: Mediciones de cloro en la salida del reservorio durante el mes de abril ...	52
Tabla 6 Mes de febrero concentraciones de cloro (WaterCAD vs Campo).....	54
Tabla 7 Mes de marzo concentraciones de cloro (WaterCAD vs Campo)	55
Tabla 8 Mes de abril concentraciones de cloro (WaterCAD vs Campo)	56
Tabla 9 Correlación de cloro simulado y medido	57
Tabla 10 Decaimiento horario y caudal promedio	58
Tabla 11 Correlación entre decaimiento y caudal	59
Tabla 12 Coeficientes de regresión	60
Tabla 13 Métricas del modelo	60

Índice de figuras

Figura 1: Instalación de tubería de abastecimiento de agua al tanque de solución madre	21
Figura 2: Conexión del tanque de solución madre al recipiente dosificador.....	22
Figura 3: Instalación del recipiente dosificador	23
Figura 4: Conexión entre el recipiente dosificador y reservorio.....	23
Figura 5: Sistema de cloración con doble recipiente	24
Figura 6: Cálculo del tiempo promedio.....	25
Figura 7: Caudal de goteo.....	28
Figura 8: Tabla de Flex Table de WaterCAD	46
Figura 9: Table Junction de WaterCAD	46
Figura 10: Variación de consumo horario.....	47
Figura 11: Tabla de concentración de cloro inicial	48
Figura 12: Simulación en WaterCAD a las 7:00 am	49
Figura 13: Simulación en WaterCAD a las 12:00 pm	49
Figura 14: Simulación WaterCAD a las 5:00 p.m.	50

Resumen

La investigación tuvo como objetivo determinar la relación del decaimiento del cloro residual mediante modelación en WaterCAD y su contrastación con mediciones de campo. Asimismo, se evaluó su relación con el caudal de consumo y se elaboró un modelo predictivo del decaimiento en función del caudal. La metodología consistió en mediciones interdiarias realizadas entre febrero y abril, con muestreos tres veces al día (7:00, 12:00 y 17:00). Se calibró y ejecutó el modelo en WaterCAD, y se calcularon los caudales horarios en los intervalos 07:00–12:00 y 12:00–17:00. Además, se estimaron caudales promedio por intervalo y se aplicaron la correlación de Pearson y la regresión lineal ordinaria. Los resultados de la comparación WaterCAD–campo evidencian que el modelo reproduce la tendencia, aunque tiende a sobreestimar el cloro en varios horarios, con errores relativos aproximados entre 0,05 % y 30,30 %, y una correlación global de $r = 0,377$ ($p = 0,318$; $n = 9$), no significativa. El decaimiento observado en campo osciló entre $-0,028$ y $+0,004$ $\text{mg/L}\cdot\text{h}^{-1}$; la relación decaimiento–caudal fue débil y no significativa. El modelo predictivo $\Delta\text{Cl}/h = -0,1035 + 0,0250\cdot Q$ presentó $R^2 = 0,013$ y un $\text{RMSE} \approx 0,00947$ $\text{mg/L}\cdot\text{h}^{-1}$, por lo que su uso debe considerarse únicamente descriptivo. Se concluye que el modelo requiere una mayor resolución temporal y espacial en el muestreo. Operativamente, se recomienda reforzar la dosificación y el monitoreo para asegurar niveles adecuados de cloro residual en toda la red.

Palabras clave: cloro residual, decaimiento, caudal, WaterCAD, modelación hidráulica.

Abstract

The research aimed to determine the relationship of residual chlorine decay through modeling in WaterCAD and its comparison with field measurements. Likewise, its relationship with consumption flow was evaluated, and a predictive model of decay as a function of flow was developed. The methodology consisted of inter-daily measurements carried out between February and April, with sampling three times a day (7:00, 12:00, and 17:00). The model was calibrated and executed in WaterCAD, and hourly flows were calculated for the intervals 07:00–12:00 and 12:00–17:00. In addition, average flows per interval were estimated, and Pearson's correlation and ordinary linear regression were applied. The results of the WaterCAD–field comparison show that the model reproduces the trend, although it tends to overestimate chlorine at several time points, with relative errors ranging from approximately 0.05 % to 30.30 %, and a global correlation of $r = 0.377$ ($p = 0.318$; $n = 9$), which was not significant. The decay observed in the field ranged from -0.028 to $+0.004$ $\text{mg/L}\cdot\text{h}^{-1}$; the decay–flow relationship was weak and not significant. The predictive model $\Delta\text{Cl}/\text{h} = -0.1035 + 0.0250\cdot Q$ yielded $R^2 = 0.013$ and an $\text{RMSE} \approx 0.00947$ $\text{mg/L}\cdot\text{h}^{-1}$, so its use should be considered only descriptive. It is concluded that the model requires greater temporal and spatial resolution in sampling. Operationally, it is recommended to strengthen dosing and monitoring to ensure adequate levels of residual chlorine throughout the network.

Keywords: residual chlorine, decay, flow, WaterCAD, hydraulic modeling.

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

Un sistema de abastecimiento de agua potable que está bien diseñado garantiza confiabilidad, cobertura y disponibilidad continua de agua a la población que beneficia. Sin embargo, para lograr proteger los sistemas y proporcionar un agua segura existen estrategias para lograr obtener la mejor eficiencia y tener que solucionar diferentes amenazas para obtener el bienestar y un entorno adecuado mediante sus procedimientos, operaciones y sus actividades.

A nivel global, en Etiopía para Angass et al., (2025) evalúa y compara las capacidades de modelado de la calidad del agua para el cloro residual de la red de distribución de la ciudad de Bishoftu durante el período de enero a junio de 2020. Este estudio presenta un enfoque novedoso para analizar y predecir las concentraciones de cloro residual, utilizando el software WaterCAD, además, las mediciones de campo para monitorear la dinámica del cloro suelen ser laboriosas, lentas y costosas. Para superar estos desafíos, el uso de software informático para analizar la dinámica hidráulica y de la calidad del agua se ha convertido en un enfoque esencial.

Para la (OMS, 2021) el uso de agua requiere algún tipo de tratamiento que permita eliminar los organismos y de esta manera promover diferentes prácticas eficaces para evaluar riesgos en saneamiento y fomentar la mejora continua de la gestión de riesgos sanitarios en las comunidades.

Para Sudheer et al., (2020) la demanda de agua potable aumenta constantemente, con el pasar del tiempo, aumenta la población y las diferentes actividades para la subsistencia. Esta creciente demanda satisfacer mediante el diseño de las redes de tuberías de distribución de agua que sea eficiente basadas en

sistemas informáticos avanzados, todo esto destaca un estudio comparativo entre el análisis hidráulico de la red de tuberías y el WaterGEMS.

El acceso de agua potable y saneamiento básico es considerado en la actualidad muy importante para que todas las personas puedan acceder a dicho beneficio, entonces al ser de gran importancia las Naciones Unidas lograron establecer acceso universal al agua segura ODS 6, dicho objetivo busca lograr que para el 2030 cerrar esta brecha. Además de su crucial análisis de los derechos humanos, también es fundamental en la administración sanitaria y la calidad de vida de las comunidades.

En el Perú, la calidad del agua, especialmente en las zonas rurales, presenta una situación preocupante debido a la falta de control y seguimiento constante. Según Miranda et al. (2010), el saneamiento básico en las viviendas peruanas reduce significativamente la incidencia de enfermedades. Sin embargo, la problemática principal radica en la red pública de agua potable dentro de las viviendas, la cual no alcanza a cubrir la totalidad de los hogares y, además, afecta cada vez más la calidad del agua y la protección de las fuentes hídricas (p.507).

Si bien la DIGESA (2024) en Cajamarca realiza acciones de control y monitoreo de la calidad del agua, estas actividades se ven disminuidas o incluso no se supervisan en las localidades distritales y rurales. Es fundamental verificar si las concentraciones de cloro desde el reservorio hasta la última vivienda cumplen con los indicadores establecidos para garantizar la eliminación bacteriológica y la potabilidad del agua. Por ello, se considera de gran interés conocer las concentraciones y el comportamiento del cloro residual mediante un modelado de la red de distribución del distrito de Cortegana, provincia de Celendín, región Cajamarca.

1.1. Planteamiento del problema

En la provincia de Celendín, específicamente en el distrito de Cortegana, se ha observado que actualmente no cuenta con un control adecuado de cloro. Esto es importante ya que el cloro residual es fundamental para lograr la calidad y seguridad del agua potable, de esta manera podemos prevenir la proliferación de microorganismos patógenos y proteger la salud pública. Un control inadecuado puede llevar a niveles insuficientes o excesivos de cloro, comprometiendo la calidad del agua y aumentando el riesgo de enfermedades de origen hídrico.

Según estudios previos y regulaciones sanitarias, el nivel óptimo de cloro residual en redes de distribución debe mantenerse entre 0.5 y 1.5 mg/L. Sin embargo, en la red de distribución actual, se han reportado niveles inconsistentes y fuera de este rango, lo que sugiere una falta de control y monitoreo efectivo. Esto puede deberse a la ausencia de una matriz que precise de cloro residual que permita predecir y ajustar los niveles de cloro en tiempo real.

1.2. Formulación del problema

¿Analizar el decaimiento de cloro residual en la red de distribución de agua potable en la ciudad de Cortegana, en diferentes escenarios de caudal de consumo mediante modelado en Watercad y su contrastación con mediciones en campo?

1.3. Justificación de la investigación

Garantizar la calidad del agua potable: El decaimiento de cloro residual en la red de distribución puede involucrar la calidad de agua, el aumento de enfermedades transmitidas por el agua.

Optimizar el control de cloro residual: Al modelar y contrastar el decaimiento del cloro residual permitió desarrollar estrategias para mantener niveles adecuados

de cloro en la red, reduciendo costos y mejorando la eficiencia, Contribuir a la salud pública: La investigación beneficiará a la población de Cortegana, asegurando el acceso a agua potable segura y de calidad, Avanzar en el conocimiento científico: La investigación aportará nuevos conocimientos sobre el comportamiento del cloro residual en redes de distribución, contribuyendo al desarrollo de modelos más precisos y efectivos.

1.4. Alcances o delimitación de la investigación

Esta investigación tiene un alcance inferencial-correlacional, donde busca determinar la relación significativa entre el caudal de consumo y el decaimiento del cloro residual en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Cortegana, mediante análisis inferencial y modelización en el software WaterCAD. Se observará el nivel de relación entre estas variables y se evaluará la significancia estadística de dicha relación.

La investigación se llevó a cabo durante un período de 5 meses, desde febrero hasta junio del año 2024. Los datos de campo se recopilaron durante un período de 3 meses, desde febrero hasta abril, luego se hizo el procesamiento de dichos datos. La investigación se centró en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Cortegana, se seleccionaron puntos de muestreo representativos en diferentes sectores de la ciudad para recopilar datos de campo.

La investigación se enfocó en el modelado y análisis del decaimiento del cloro residual en la red de distribución, utilizando el software WaterCAD. Se consideraron diferentes escenarios de caudal de consumo para evaluar su impacto en el decaimiento del cloro residual.

No se abordarán aspectos relacionados con la calidad del agua cruda, tratamiento de agua o infraestructura de la red de distribución, sino que se centrará en la modelización y análisis del cloro residual en la red. La población objetivo es la red de distribución de agua potable de la ciudad de Cortegana. La muestra consistirá en los puntos de muestreo seleccionados en la red de distribución para recopilar datos de campo.

1.5. Limitaciones

La recopilación de datos de campo durante solo 3 meses puede no capturar variaciones estacionales o tendencias a largo plazo en el decaimiento del cloro residual, Las tomas de muestra se realizan en el punto más cercano a cada nodo, no en los nodos mismo, mantenimiento de la red, condiciones climáticas o intermitentes pueden generar variaciones no capturadas en el modelo.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

- Determinar la relación del decaimiento de cloro residual usando WaterCAD y su contratación en la red de distribución de agua potable en la ciudad de Cortegana.

1.6.2. Objetivos específicos

- Analizar el decaimiento de cloro residual en la red de distribución de agua potable en la ciudad de Cortegana.
- Determinar la relación significativa entre el decaimiento de cloro residual y el caudal de consumo.
- Desarrollar un modelo predictivo del decaimiento de cloro en función del caudal de consumo.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes Teóricos

Guerrero (2020), se enfocó en analizar la calidad del agua y el comportamiento del sistema de distribución en el sector 5. La investigación, de tipo aplicada, no experimental y explicativa, utilizó como muestra de estudio el sector 5, definido según los planos catastrales. Los resultados del estudio revelaron que los límites mínimos de cloro libre residual en los puntos de ensayo se ubicaron entre 0.03 y 1.5 mg/L. El modelamiento del sistema en WaterCAD demostró que no se cumplían los parámetros hidráulicos de velocidad y presión en los nodos evaluados. Además, se detectaron fugas y pérdidas significativas en la cantidad de líquido distribuido en los diferentes tramos. Los ensayos de seguimiento del cloro mostraron una disminución considerable en los valores de cloro residual en la última vivienda del sector.

Sánchez (2020), se centró en la evaluación del comportamiento del cloro libre en las redes de distribución de la empresa ACUALCOS S.A., utilizando un modelo computacional. El estudio, de tipo aplicado y diseño no experimental, analizó 8 puntos de muestreo simulados en ArcGIS y WaterCad. Los resultados de la investigación demostraron la eficiencia de las dosificaciones de cloro. Además, se comprobó que los coeficientes de pared (K_w) y los de masa (K_b) funcionaron correctamente en la red, asegurando una distribución eficiente del cloro en toda su extensión. La calibración del modelo arrojó valores de 0.99 para la eficiencia de la simulación y 0.932 para la precisión de las presiones, lo que indica una alta confiabilidad en los datos y la simulación.

Domínguez (2021), en su investigación se centró en el modelado del comportamiento del cloro en la red de distribución de agua potable utilizando el

software WaterCad. El estudio, de tipo aplicado y correlacional, con un diseño no experimental, recopiló datos en 6 puntos estratégicamente ubicados a lo largo de la red de distribución. Los resultados de la investigación concluyeron que la concentración de cloro en la red de distribución se encuentra dentro del rango adecuado (0.3 a 1.2 mg/L) para la eliminación de sustancias patógenas y la prevención de enfermedades, cumpliendo con la norma técnica para agua de consumo humano.

Santamaría (2020), se enfocó en el modelado del cloro libre en la red de distribución de la UPZ 85, utilizando un enfoque cuantitativo, aplicado y no experimental. Se recopilaron datos en varios puntos de control mediante fichas de campo, y posteriormente se utilizó el software EPANET para simular el comportamiento del fluido con el cloro. Los resultados del estudio revelaron que la distribución de la presión en la red no estaba controlada, alcanzando solo el 60% de la red debido a las características topográficas del terreno. Además, las velocidades en QMH indicaron que el 70% de la red se encontraba por debajo de 0.5 m/s. La investigación concluyó que el modelamiento permitió calibrar y evaluar el comportamiento del fluido, comprobando la eficiencia de las dosificaciones de cloro. Se destacó la importancia de los coeficientes de pared (K_w) y de masa (K_b) para optimizar la eficiencia de la red.

Tuero (2022), en su investigación se centró en determinar los coeficientes de cloro K_b y K_w , que dependen del tipo de material de conducción y del fluido, y su influencia en los valores del cloro residual en la red de distribución de agua potable. El estudio, de tipo aplicado, explicativo y correlacional, analizó una muestra de 54 viviendas. Los resultados de la investigación concluyeron que los coeficientes encontrados en la reacción de decaimiento del cloro tienen una influencia significativa

en su comportamiento en la red de distribución. Tanto K_b , como K_w influyeron en los valores del cloro residual, registrándose valores inferiores a 0.5 mg/L.

La investigación de Gutiérrez y Domínguez (2023) se centraron en el modelado y simulación de las concentraciones de cloro distribuidas en la red de agua potable en dos épocas distintas: época de lluvias y estiaje. El estudio, de tipo correlacional, aplicado y no experimental, analizó una muestra de 89 nodos. Los resultados de la investigación concluyeron que los coeficientes de reacción de masas K_b y de pared K_w deben estar dentro de los rangos de -0.1/día a 1.5/día para K_b y -0.06 m/día a -1.52 m/día para K_w . El análisis matemático de las concentraciones de cloro a lo largo de la red determinó que las dosis óptimas son de 2 mg/L en estiaje y 2.5 mg/L en época lluviosa. Se identificaron los puntos más críticos en el final de las redes, donde se registran las concentraciones más bajas de cloro.

Apumayta y Paitan (2021) se centró en la simulación y el modelado de las concentraciones de cloro residual en la red de distribución de agua potable utilizando el software WaterCad. El estudio, de tipo aplicado, descriptivo y no experimental, analizó una muestra de 157 viviendas. Los resultados de la investigación mostraron que las concentraciones de cloro residual en la red se ubicaron entre 0.3 mg/L y 0.5 mg/L, con velocidades de flujo de 0.6 m/s y presiones entre 10 m y 40 m. La simulación permitió evaluar los principales parámetros del sistema de distribución, evidenciando la importancia de la modelación para optimizar la eficiencia de la red.

2.2. Bases Teóricas

2.2.1. Decaimiento del cloro

A. Modelamiento del comportamiento del cloro residual

El modelamiento del comportamiento hidráulico ayuda a observar el funcionamiento de la red con el fluido y su distribución a fin de lograr detectar algún inconveniente al momento de su puesta en operación; en el mismo sentido de ideas para Rossman (2001) expresa que el modelamiento hidráulico es el diseño del sistema de abastecimiento de agua de manera digital a fin de lograr predecir su desempeño del fluido en la tubería, la cual está conformada por un conjunto de tuberías, tramos, nudos, válvulas, captaciones y reservorios, donde se realiza el cálculo de caudales, velocidades, presiones, niveles de concentración de los desinfectantes simulándolos a su mundo real.

a. Simulación hidráulica

Rossman et al. (1994). Es la representación del modelo matemático del propio sistema real, donde se puede conocer la comprensión y realizar predicciones para controlar el funcionamiento del sistema, usando como base los cálculos hidráulicos para la simulación de los estados de carga que se van produciendo en toda la red de distribución.

b. Simulación del cloro residual

Existen modelos matemáticos para observar el comportamiento de los niveles de cloro u otro parámetro fisicoquímico en diferentes escenarios y a lo largo de la línea de distribución, observándose el nivel de desinfección del agua hasta los nodos (Alves et al., 2014). Los modelos matemáticos permiten realizar el modelamiento del caudal en la red, observando la calidad del agua a fin de

que los resultados reales puedan ser lo más aproximados y que de esta permita identificar la calidad del agua a lo largo de toda la red de aducción y distribución.

c. Simulación de redes de distribución y cloro residual

Este enfoque utiliza WaterCAD para simular la distribución del cloro residual en la red, teniendo en cuenta factores como la geometría de la red, el flujo y la mezcla. Las simulaciones se validan mediante la comparación con mediciones de campo. El modelo muestra cómo las condiciones de operación (caudales, tiempos de retención) afectan el nivel de cloro residual (García-Ávila et al., 2021).

d. Cálculo de reacciones y coeficientes

Las condiciones que presenta el contorno influyen directamente en las reacciones tanto del flujo como del soluto, por la reacción de estas sustancias tanto en las paredes de las tuberías como del tanque y en la masa propia del agua, determinándose en estos modelos la calidad del agua expresada en la suma de estos parámetros (Bovis,2024.).

B. Modelado de Redes Hidráulicas

WaterCAD utiliza modelos matemáticos para representar sistemas de distribución de agua, permitiendo analizar variables como caudales, presiones y velocidades en las tuberías. Esto es esencial para garantizar un suministro eficiente y seguro en las redes de agua potable (Gutiérrez, J., 2018).

a. Modelo de primer orden con WaterCAD

La ecuación general para la descomposición del cloro residual (C) en función del tiempo (t), una tasa de descomposición k se expresa como:

$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C \quad \dots (1)$$

Donde:

C = Concentración de cloro residual (mg/L)

k = Tasa de descomposición del cloro (1/h)

t = Tiempo (h)

La solución de esta ecuación diferencial se puede escribir como:

$$C(t) = C_0 * e^{-kt} \quad \dots (2)$$

Donde:

C₀ = Concentración inicial de cloro residual (mg/L) en el momento t=0

e = Base del logaritmo natural (aproximadamente 2.718)

b. Modelo de segundo orden

Este modelo considera el efecto de diversos factores, como la materia orgánica, en el decaimiento del cloro. Permite una representación más precisa del comportamiento del cloro en sistemas de agua donde se presenta una carga orgánica significativa.

La ecuación para un modelo de segundo orden se expresa como:

$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C^2 \quad \dots (3)$$

Donde:

C = Concentración de cloro residual (mg/L)

k = Tasa de reacción de segundo orden (L/(mg*h))

t = Tiempo (h)

La solución de esta ecuación diferencial, aplicando las condiciones iniciales, se puede resolver para dar la concentración de cloro residual en el tiempo:

$$\frac{1}{C(t)} = \frac{1}{C_0} + kt \quad \dots (4)$$

Donde:

C_0 = Concentración inicial de cloro residual (mg/L)

c. Reacciones en las paredes de la tubería

Mostafa et al. (2013), existen reacciones relacionadas con la velocidad de reacción en las paredes de la tubería producto de la velocidad del fluido, velocidad de pared, el volumen y la geometría de la superficie, el diámetro de la tubería, la cual se expresa del siguiente modo:

$$K_{wall} = \frac{4 * (K_f * K_w)}{D * ((K_f + K_w))} \quad \dots (5)$$

Donde:

D = Diámetro de la tubería (m)

K_w = Constante de la pared (m/día)

K_f = Constante de la velocidad de transferencia de la masa.

$$K_f = S_h \quad \dots (6)$$

S_h = difusividad/diámetro

Rossman(2001). Reporta que la velocidad de reacción de las sustancias que lograr reaccionar cerca, o en la pared de la tubería se consideran que

dependen de las concentraciones en la masa del agua del flujo principal dada por la siguiente ecuación (p. 43)

$$R = (A/V) * K_w * C^n \quad \dots (7)$$

Donde:

A/V = Superficie de contacto por unidad de volumen en el interior de la tubería

K_w = Constante de la pared (m/día)

C = Concentración de cloro residual (mg/L)

2.2.2. Teoría de la calidad del agua

La teoría de la calidad del agua se enfoca en la evaluación y control de los diferentes factores ambientales, físicos, químicos, infraestructura y microbiológicos que afectan la calidad del agua, como son los siguientes (Marketing, 2020).

A. Factores de calidad de agua

Factores Ambientales

- **Temperatura:** Las altas temperaturas pueden acelerar la tasa de descomposición del cloro.
- **pH:** Un pH alto puede reducir la eficiencia del cloro, mientras que un pH bajo puede favorecer la formación de subproductos.

Factores Químicos

- **Materia Orgánica:** La presencia de materia orgánica consume cloro, reduciendo su concentración.

- **Concentraciones de otros Compounds:** Sustancias como amoníaco y nitratos pueden reaccionar con el cloro, disminuyendo su efectividad.

Factores Físicos

- **Turbidez:** Un agua turbia puede proteger a los microorganismos del efecto desinfectante del cloro.
- **Áreas de Estancamiento:** Las zonas donde el agua no circula bien pueden tener un mayor decaimiento del cloro.

Factores de Infraestructura

- **Material de las tuberías:** Diferentes materiales pueden afectar la estabilidad del cloro; por ejemplo, tuberías de hierro pueden causar reacciones que reducen el cloro.
- **Diseño del Sistema:** Un diseño de red poco eficiente puede llevar a zonas de baja renovación del agua, facilitando el decaimiento.

Factores Microbiológicos

- **Crecimiento microbiano:** Los microorganismos presentes en el agua pueden consumir cloro, disminuyendo su concentración.

B. Importancia de la desinfección del agua

La desinfección del agua con cloro es un componente esencial en la protección de la salud pública y en la gestión sostenible de los recursos hídricos. Al garantizar el acceso a agua potable segura, ayuda a reducir la carga de enfermedades transmitidas por el agua y contribuye al bienestar general de la población.

Para el RNE (2022), el tratamiento del agua se realiza mediante la desinfección utilizando cloro como agente desinfectante; donde el cloro residual debe estar en contacto entre 5 a 10 minutos hasta 30 minutos, y debe tener como mínimo 1 ppm de cloro residual en la vivienda más alejada de la red y no debe ser menor a 0.2 ppm (p. 52).

C. El cloro residual

Tamargo (2007) reporta que cuando se realiza la cloración del agua, luego de administrada la demanda de cloro en una desinfección completa, el cloro residual es nula, por lo tanto, se demuestra que su finalidad es mejorar la calidad del agua (p. 25).

El hipoclorito de calcio es el agente oxidante y se dosifica en soluciones utilizando el agua como flujo constante o continuo a lo largo de la tubería. Tzatchkov et al. (2004). Sostienen que existe una curva de la demanda de cloro y el tiempo de contacto, por lo que la demanda de cloro que es necesaria para mantener el residual libre es baja. Por otro lado, el cloro residual tomado en la muestra se va consumiendo, oxidando toda la materia orgánica, y otros componentes como el Fe, Mn y la materia nitrogenada, éstas reacciones son más intensas al inicio ya que posteriormente estos compuestos se oxidan y cada vez el poder oxidante es menor del cloro. (p. 49)

D. Reacciones principales del cloro en agua

Cuando el cloro se disuelve en agua, forma dos compuestos: una parte se convierte en ácido hipocloroso, utilizado para desinfectar el agua, y la otra parte se convierte en ácido clorhídrico, que puede causar problemas de corrosión. Este equilibrio entre estos dos productos es fundamental para el

funcionamiento efectivo y seguro de los sistemas de agua potable (Hancock, 2016).

➤ **Reacción con el cloro**

Disolución del Cloro

El cloro gaseoso, está formado por dos átomos de cloro (Cl_2), se disuelven en el agua cuando se mezcla. Este es el primer paso en la reacción y puede ocurrir en diversos procesos, como en el tratamiento de agua potable. (Hancock, 2016).

Reacción Química:

Al disolverse en el agua, parte del cloro reacciona para formar:



Ácido Hipocloroso (HOCl): Este es el principal agente desinfectante que se forma y es bastante efectivo en la eliminación de bacterias, virus y otros patógenos que se pueden encontrar en el agua (Hancock, 2016).

Ácido Clorhídrico (HCl): Es un ácido fuerte que se forma en esta reactividad también, pero tiene un papel menos deseado en términos de desinfección, ya que puede contribuir a la corrosión de las tuberías y otros materiales (Hancock, 2016).

E. Ionización del Ácido Hipocloroso

Cuando decimos que el ácido hipocloroso (HOCl) puede ionizarse en agua, formando el ion hipoclorito (OCl^-), estamos describiendo un proceso químico en el que el ácido hipocloroso se disocia o se separa en iones (Hancock, 2016).

En soluciones acuosas, el ácido hipocloroso (HOCl) puede perder un ion hidrógeno (H^+) para formar el ion hipoclorito (OCl^-):



Esto significa que el HOCl se divide en dos partes: una parte es un ion de hidrógeno (H^+), y la otra parte es el ion hipoclorito (OCl^-).

F. Equilibrio Químico

La reacción de ionización es reversible, lo que significa que tanto el ácido hipocloroso puede formarse a partir de OCl^- y H^+ (proceso hacia la izquierda) como el OCl^- puede formarse a partir de HOCl (proceso hacia la derecha). La relación entre estas especies está determinada en parte por el pH del agua. En condiciones de pH bajo (ácido), la mayoría de HOCl está presente en forma no ionizada, mientras que en pH más alto (básico), el ion hipoclorito (OCl^-) predomina (Hancock, 2016).

G. Propiedades Desinfectantes

El ácido hipocloroso (HOCl) es un desinfectante más potente y efectivo en la eliminación de bacterias y virus en comparación con el ion hipoclorito (OCl^-). Por lo tanto, mantener un equilibrio en el pH del agua es crucial para maximizar la eficacia de la desinfección del cloro (Hancock, 2016).

El ion hipoclorito (OCl^-) es menos reactivo y menos efectivo como desinfectante que el ácido hipocloroso. Por esta razón, se busca aplicar el cloro en condiciones que favorezcan la presencia de HOCl para asegurar el tratamiento efectivo del agua (Hancock, 2016).

H. Ácido Hipocloroso (HOCl) como Desinfectante

El ácido hipocloroso (HOCl) es el agente desinfectante activo en el agua se refiere a su capacidad para eliminar o inactivar organismos patógenos, como bacterias, virus y otros microorganismos, y su efectividad varía según el pH del agua (Boecker et al., 2023).

Propiedades Desinfectantes: El HOCl es un potente desinfectante porque es capaz de penetrar en la membrana celular de los patógenos y reaccionar con componentes esenciales, como proteínas y ácidos nucleicos. Esto conduce a la destrucción o inactivación de los microorganismos (Llorens, 2023).

Eficiencia: Las investigaciones han demostrado que HOCl es más efectivo que su forma ionizada, el ion hipoclorito (OCl^-), para desinfectar el agua (Lafaurie et al., 2015).

Relación pH-HOCl/ OCl^- : La eficacia desinfectante del cloro depende de la relación entre el ácido hipocloroso (HOCl) y el ion hipoclorito (OCl^-), que a su vez está influenciada por el pH del agua. La reacción se puede expresar de la siguiente manera (Upadhyay, 2024).



En pH bajo (ácido): En aguas con pH bajo (por debajo de 7), predominan las moléculas de HOCl, que son más efectivas para la desinfección (Rojas, 2025).

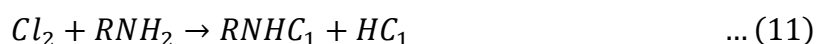
En pH alto (básico): En aguas con pH alto (por encima de 7), la proporción de OCl^- aumenta. Aunque el ion hipoclorito todavía tiene cierta actividad desinfectante, es menos eficiente que el HOCl (Rojas, 2025).

Efecto del pH sobre la Reacción: Un pH demasiado alto no solo reduce la efectividad del cloro como desinfectante, sino que también puede contribuir a la formación de subproductos indeseables, como los trihalometanos (THM), que son compuestos potencialmente nocivos producidos durante la desinfección (Upadhyay, 2024).

I. Reacción del Cloro con Aminas

Cuando se menciona que el cloro en agua puede reaccionar con aminas y otros compuestos orgánicos, formando cloraminas, se está describiendo un proceso químico que ocurre durante la desinfección del agua y tiene implicaciones importantes para la eficacia del tratamiento de agua potable (Méndez, 2002).

- **Aminas:** Las aminas son compuestos orgánicos que contienen átomos de nitrógeno (N) y que se encuentran comúnmente en materia orgánica natural, como desechos animales o vegetales, y en el agua en general (Méndez, 2002).
- **Reacción con el Cloro:** Cuando el cloro (en su forma de Cl_2 o como HOCl) se añade al agua, puede reaccionar con las aminas. El proceso general se puede representar de la siguiente manera (Méndez, 2002).



Donde RNH_2 representa una amina.

J. Cloraminas

La reacción entre el cloro y las aminas produce cloraminas, que son compuestos que contienen cloro y nitrógeno. Existen tres tipos principales de cloraminas (Méndez, 2002):

- **Monocloramina (NH_2Cl)**: Se forma cuando una amina reacciona con una molécula de cloro.
- **Dicloramina (NHCl_2)**: Se forma cuando una amina reacciona con dos moléculas de cloro.
- **Tricloramina (NCl_3)**: Se forma cuando una amina reacciona con tres moléculas de cloro y está relacionada con el tratamiento en piscinas.

K. Formación de Subproductos

Se refiere a la creación de compuestos no deseados que se generan durante los procesos de tratamiento de agua, especialmente durante la desinfección y otras reacciones químicas. Estos subproductos pueden afectar la calidad del agua y representar riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

Trihalometanos (THM): Son compuestos que se forman cuando el cloro reacciona con materia orgánica en el agua. Algunos ejemplos son el cloroformo, el bromoformo y el dibromoclorometano. Estos compuestos son preocupantes porque están asociados con efectos adversos para la salud, incluido un posible aumento en el riesgo de cáncer (Nunja et al., 2013).

Ácidos Haloacéticos (HAA): Son otro grupo de subproductos que se forman en reacciones similares. Incluyen el ácido trihaloacético y el ácido

dicloroacético, que también son considerados contaminantes regulados (Nunja et al., 2013).

2.2.3. Hipoclorador de goteo con carga constante

a. Tubería de abastecimiento de agua

Partiendo de la caseta de válvulas del tramo de la línea de conducción, esta tubería está diseñada para abastecer de agua el tanque de solución madre (600 L). El sistema cuenta con una válvula de paso y con un grifo que permite llenar recipientes más pequeños, como baldes de 20 litros, facilitando así la preparación de la solución. Además, incluye un filtro esencial para evitar que el agua turbia llegue al reservorio, garantizando la calidad del suministro (Díaz et al., 2018).

Figura 1:

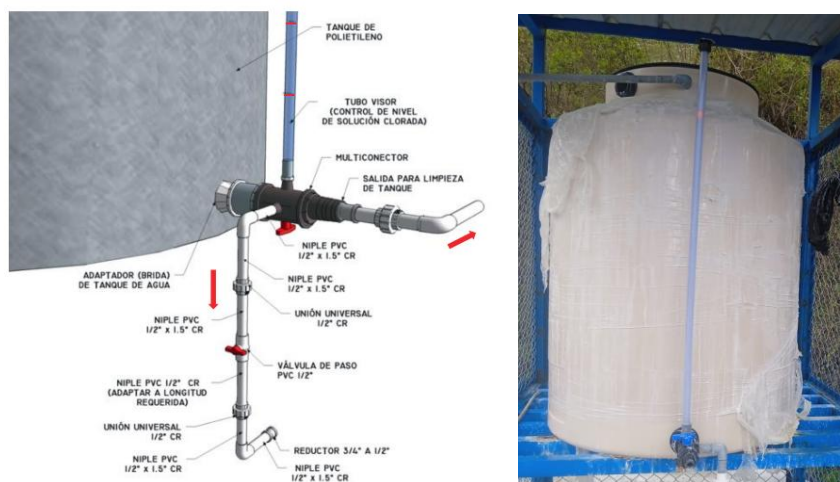
Instalación de tubería de abastecimiento de agua al tanque de solución madre



b. Tanque de polietileno para la solución madre

Ubicado en la parte superior de la estructura metálica (u otra) construida para esta tecnología. Este tanque de solución madre tiene un multiconector (que contiene 3 salidas): la salida de la parte superior es para el tubo transparente (visor) que muestra el nivel de solución madre, la salida directa es para limpieza del tanque y la salida lateral para ensamblar un niple y demás conexiones hacia el recipiente regulador de carga constante (Díaz et al., 2018).

Figura 2:
Conexión del tanque de solución madre al recipiente dosificador



c. Recipiente regulador de carga constante

Colocado en el nivel inferior del tanque de solución madre; lleva en su interior una válvula flotadora, acondicionada para mantener constantes la altura de líquido y el caudal de goteo (Díaz et al., 2018).

Figura 3:
Instalación del recipiente dosificador



d. Conexiones de salida y dosificación de cloro al reservorio

Conformada por tubos y accesorios PVC que permiten realizar la medición y regulación del goteo, Y la posterior conducción de la solución clorada hacia el reservorio (Díaz et al., 2018).

Figura 4:
Conexión entre el recipiente dosificador y reservorio

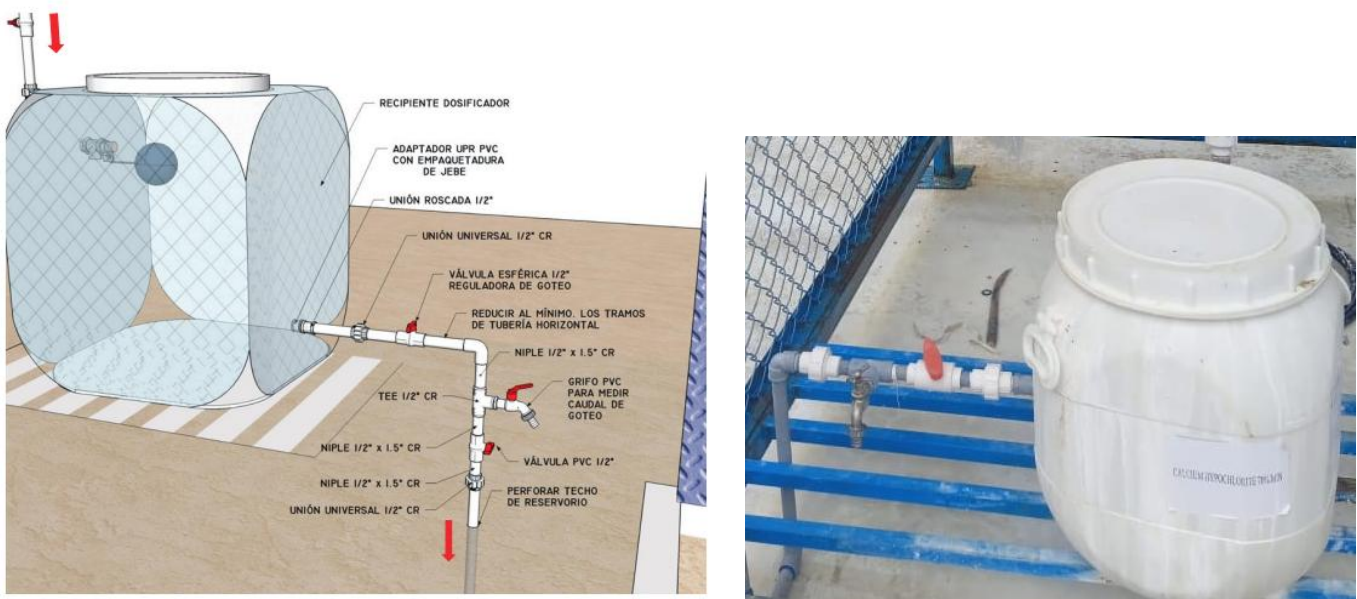
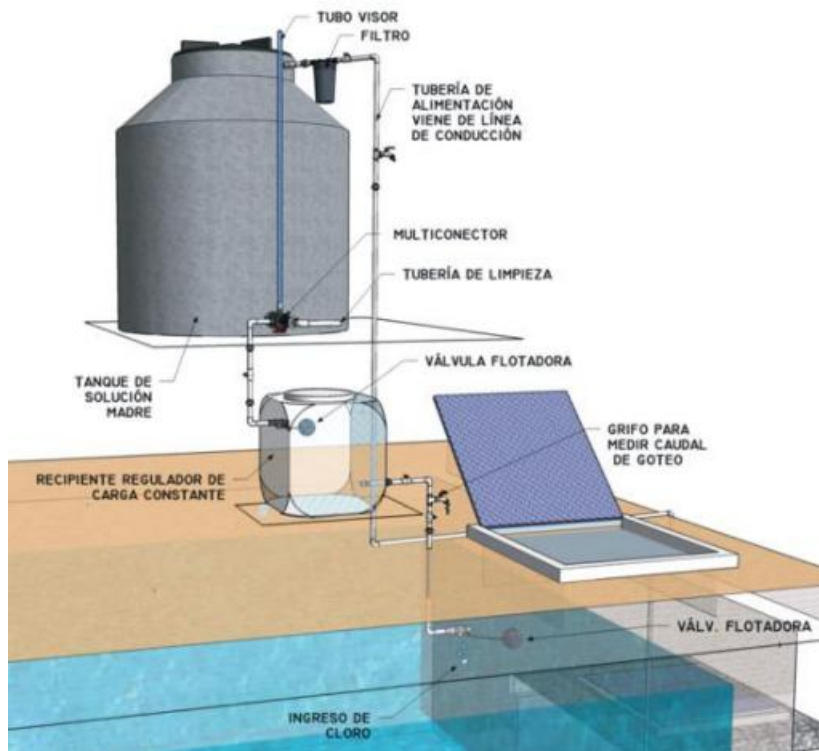


Figura 5:
Sistema de cloración con doble recipiente



e. Medición del caudal a clorar

- Calcular o determinar el caudal (en L/s) de ingreso al reservorio (cercano al caudal máximo diario que requiere la población actual, de no ser así, será regulado). (Díaz et al., 2018).
- Medir el caudal de ingreso al reservorio utilizando un balde graduado de 5, 18 o 20 L (el que mejor se adapte), Realizar las mediciones (mínimo tres) y calcular el tiempo promedio en segundos. (Díaz et al., 2018).

Figura 6:
Cálculo del tiempo promedio



El caudal será:

$$Q = \frac{V}{t} \quad \dots (12)$$

Q= Caudal en (L/s)

V= Volumen de balde en litros (L).

t= Tiempo de promedio de las mediciones realizadas en segundos.

El volumen de agua para un día:

$$V = 86400 * Q \quad \dots (13)$$

V= Volumen de agua en litros para un día.

Q= Caudal en litros/seg (L/s)

86400= N° de segundos en un día.

f. Cálculo de la cantidad de cloro

$$P = \frac{V * C_2}{10 * \%Cl} \quad \dots (14)$$

P= Peso de hipoclorito de calcio (gramos) por día

V= Volumen (L) de agua para un día

C₂= Concentración aplicada: 1.5 mg/L (promedio)

%Cl= 65 a 70

$$P = \frac{Q * T * C_2}{10 * \%Cl} \quad \dots (15)$$

P= Peso de hipoclorito de calcio (gramos).

Q= Caudal de ingreso al reservorio (L/s)

T= Tiempo de goteo en segundos.

C₂= Concentración aplicada: 1.5 mg/L (promedio)

%Cl= 65 a 70

g. Cálculo de la cantidad de cloro

$$V_{min} = \frac{\%Cl * 10 * P}{C_{max}} \quad \dots (16)$$

V_{min}= Volumen de agua para disolución (mínimo).

P= Peso de hipoclorito de calcio (gramos).

%Cl= 65 a 70

P= Peso de hipoclorito de calcio (gramos).

C_{max} = Concentración máxima = 5 gr/L = 5000 ppm.

h. Preparación de la solución clorada o solución madre

- Calcular el peso de hipoclorito de calcio, colocar esta cantidad en un recipiente y pesar en una balanza.
- Añadir los primeros 100 L de agua al tanque de solución madre (vacío).
- Diluir el hipoclorito de calcio en dos baldes de 20 L cada uno, removiendo con un batidor o tubo del tamaño del balde.
- Dejar reposar aproximadamente media hora o más para sedimentar la parte sólida (cal), recomendando tapar los baldes y evitar la pérdida del gas cloro (no se volatilice).
- Vaciar la disolución al tanque de solución madre, cuidando que la parte sólida quede en la base de los baldes de preparación.
- Añadir agua hasta completar el volumen (V) de solución clorada requerida, verificando que este volumen sea mayor al valor encontrado.
- Tapar el tanque de solución madre y evitar la pérdida de cloro (no se volatilice).
- Verificar o regular el caudal de goteo (Q,) o dosificación de solución madre para el sistema de agua potable.

i. Caudal de goteo (Q) en mL/min

$$Q_g = \frac{V_d}{1.44 * T} \quad \dots (17)$$

Q_g = Caudal del goteo en mL/min.

V_d = Volumen de disolución o solución madre (L).

T = Tiempos (días).

Figura 7:
Caudal de goteo



2.2.4. Teoría sobre mediciones y muestreos del cloro residual en viviendas en la red de distribución

La medición y muestreo del cloro residual en las viviendas dentro de la red de distribución de agua potable es una práctica fundamental en la gestión de la calidad del agua. Diversos estudios y normativas internacionales destacan la importancia de este proceso para asegurar la protección de la salud pública y la efectividad de la desinfección (WHO, 2017; EPA, 2020). La presencia de cloro residual en el agua asegura la desinfección en el tiempo y espacio, previniendo contaminaciones durante el transporte y distribución.

La calidad del agua en el punto de consumo debe ser validada mediante muestreos en viviendas, donde las condiciones del sistema pueden variar respecto a las condiciones en las plantas de tratamiento.

a. Técnicas y métodos

Selección de puntos de muestreo: Según Lent et al. (2015), una estrategia estadística efectiva implica seleccionar puntos representativos en diferentes zonas de la red, considerando factores como longitud, caudal y edad de las tuberías.

Frecuencia y protocolos: La Organización Mundial de la Salud (WHO, 2017) recomienda realizar muestreos periódicos en diferentes horarios para detectar variaciones diurnas y estacionales, siguiendo protocolos estandarizados para evitar contaminación cruzada, los muestreos deben hacerse con recipientes desinfectados y siguiendo procedimientos de muestreo "limpio" para evitar contaminaciones externas. La muestra se toma en la tubería o grifo con un flujo constante y en condiciones de uso normal.

Equipos de medición: Estudios de Ruiz et al. (2018) muestran que los medidores electroquímicos portátiles y colorímetros, ofrecen resultados confiables y rápidos en campo, siempre que estén calibrados adecuadamente.

Reglamento de Calidad del Agua para Consumo Humano especifica que el nivel mínimo de cloro residual libre en el agua en el punto de consumo debe ser de 0.5 mg/L, y el máximo de 5 mg/L, las muestras tomadas en cualquier punto de la red de distribución, no deberán contener menos de 0.5 mg/L de cloro residual libre en el noventa por ciento (90%) del total de muestras tomadas durante un mes. Del diez por ciento (10%) restante, ninguna debe contener

menos de 0.3 mg/L y la turbiedad deberá ser menor de 5 unidad nefelométrica de turbiedad (UNT).

2.2.5. Redes de distribución de agua

a. Obras de captación de agua

Según Agüero (1997) sostiene que, las obras de captación dependen de las características que presenta la fuente de abastecimiento, topografía, cantidad y calidad de agua, el cual debe realizarse para garantizar la cantidad y calidad del agua a distribuir (p. 53).

b. Línea de conducción

Corresponde al tramo compuesto por tubería desde la captación del agua hasta la planta de tratamiento, su objetivo es trasladar el agua a lo largo del tramo manteniendo el caudal. En el RNE (2022), expresa que, “es una estructura útil para el transporte del agua desde la captación hasta el reservorio, por lo tanto, debe transportar como mínimo el caudal máximo diario”.

c. Planta de tratamiento

Son instalaciones diseñadas para someter el agua a procesos de purificación con el objetivo de hacerla apta para su consumo, eliminando todas las bacterias y sustancias peligrosas. Para el RNE y OS020 (2022) indica que “el objetivo del tratamiento debe cumplir con la eliminación de contaminantes microbiológicos y fisicoquímicos del agua hasta los límites indicados en norma para la calidad del agua” (p.40).

d. Reservorio

Es una estructura que almacena el agua para garantizar la continuidad del suministro, manteniendo la disponibilidad y la presión adecuada. Para Agüero (1997) sostiene que “es la estructura que permite almacenar y regular el agua para su disposición en cualquier hora del día a la población con la presión adecuada en todas las viviendas que conforman la red”.

e. Línea de aducción

Corresponde al conjunto de tuberías que se utiliza para trasladar o conducir el agua desde la planta de tratamiento o reservorio hasta la red de distribución, o desde estos hasta las cámaras rompe presión, para que posteriormente se disponga en la red de distribución y llegue a cada una de las viviendas (Agüero, 1997, p. 42). Es necesario para el diseño correcto calcular las velocidades, caudal, diámetro de tubería, considerando las pérdidas por fricción, presión en diferentes puntos a lo largo de la tubería.

f. Red de distribución

Una red de distribución de agua potable es el conjunto de instalaciones (tuberías trabajando a presión) que una empresa de abastecimiento tiene instaladas en las vías de comunicación urbanas, para transportar agua desde el punto o puntos de captación y tratamiento, hasta el punto de suministro final, los clientes, en condiciones óptimas que satisfagan sus necesidades. Para que esto sea así, hay que considerar una serie de componentes a evaluar como son la calidad, el caudal, la presión, la continuidad del suministro y el precio (Aragoneses, 2020).

El tratamiento a realizar varía en función del origen. En general, el sistema consta de 5 partes principales: captación, almacenamiento de agua bruta, tratamiento, almacenamiento de agua tratada y red de distribución de agua potable(Aragoneses, 2020).

- **Redes mixtas**

Son aquellas que están compuestas tanto por redes abiertas como cerradas, y su objetivo es adaptar la red al suministro de agua. (Carhuapoma & Chahuayo, 2019, p. 41).

- **Redes abiertas**

Es la red conformada por una línea principal y que se van derivando por otras líneas menores o ramificaciones, ideal para zonas rurales ya que se extienden a lo largo de la vía principal ubicación de la vivienda. (Carhuapoma y Chahuayo, 2019, p. 40).

- **Redes cerradas**

Tienen forma de malla donde se configuran nodos interconectados de manera continua y cerrada para una mayor eficiencia y continuidad del servicio. (Carhuapoma y Chahuayo, 2019, p. 40).

2.3. Definición de términos básicos

Advección. Es la acción de transporte de contaminantes, producto de la velocidad del agua.

Bacterias. Microorganismos de tipo unicelular que contaminan las masas de agua y son capaces de reproducirse en fusión binaria.

Caudal. El caudal es la cantidad de fluido que atraviesa una sección transversal de un conducto o cauce en un tiempo determinado. Se expresa como volumen por unidad de tiempo, generalmente en metros cúbicos por segundo (m^3/s) o litros por segundo (L/s), y permite cuantificar el flujo de agua u otro líquido en sistemas hidráulicos.

Cloro libre. Es la fracción de cloro presente en el agua que se encuentra en forma de hipoclorito (OCl^-) o ácido hipocloroso (HOCl) y que está disponible para actuar como desinfectante.

Cloro residual. Es la cantidad de cloro que permanece en el agua después de haberse llevado a cabo el proceso de desinfección y de haber reaccionado con la materia orgánica, compuestos químicos y microorganismos presentes.

Decaimiento: El decaimiento es el proceso mediante el cual una sustancia, fenómeno o variable disminuye progresivamente en el tiempo o en el espacio.

Modelo de decaimiento de cloro. Es el modelo donde se puede pronosticar las concentraciones de cloro a fin de optimizar sus dosificaciones”

Modelación hidráulica. Es una técnica que utiliza herramientas matemáticas y computacionales para representar, analizar y simular el comportamiento de sistemas hidráulicos, como redes de distribución de agua potable, alcantarillado, riego o drenaje.

Muestra. Porción tomada de los cuerpos de agua en condiciones normales en la naturaleza.

Precisión. Grado de similitud al realizar análisis repetidos en una determinada muestra, la cual se expresa en desviaciones estándar.

Método DPD: La determinación del cloro residual libre en el terreno se realiza comúnmente con un kit de DPD (dietil-para-fenil-diamina), un método rápido y simple. Al añadir el reactivo a la muestra de agua, esta se colorea de rosa; la intensidad de este color, comparada con una escala estándar, indica la concentración de cloro: a mayor intensidad, mayor concentración.

Desinfección: Es un proceso que consiste en destruir los microorganismos patógenos que pueden estar presentes en el agua, mediante el uso de sustancias químicas como es el cloro.

Hipoclorito de calcio: El hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$), un compuesto químico en polvo o gránulos blancos, es un potente desinfectante y blanqueador. Su acción oxidante elimina eficazmente microorganismos, creando entornos más limpios y seguros.

WaterCAD. Es un software de modelación hidráulica desarrollado por Bentley Systems, utilizado para el análisis, diseño, operación y gestión de redes de distribución de agua potable.

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación de la investigación

Ubicación geográfica y política

La investigación se realizó en la ciudad de Cortegana, provincia de Celendín, departamento de Cajamarca, se encuentra ubicada geográficamente a 106 Km. al norte de la ciudad de Celendín (ver anexo 01):

Sus límites geográficos son los siguientes:

- Por el Norte: Con el Distrito Choropampa - Chota, entre las coordenadas UTM:
Choropampa: WGS 84 zona 18S: 784 296 E - 9 300 929 N
Ocumal: WGS 84 zona 18S: 78.6500E – 6.5500N
- Por el Oeste: Con el caserío Choropampa - Chota, entre las coordenadas UTM:
Choropampa: WGS 84 zona 18S: 784 296 E - 9 300 929 N
Paccha: WGS 84 zona 18S: 783856 E – 6.56167N
- Por el Sur: Con el Distrito de Miguel Iglesia entre las coordenadas UTM:
Miguel Iglesias: WGS 84 zona 18S: 783856 E – 6.56167N
Chumuch: WGS 84 zona 18S: 780845E – 6.5157 N
- Por el Este: Con el distrito Chumuch - Celendín, entre las coordenadas UTM:
Chumuch: WGS 84 zona 18S: 780845E – 6.5157 N
Pisuquía: WGS 84 zona 18S: 78.6500E – 6.5500N

Ubicación política

Región y/o Dpto.	:	Cajamarca.
Provincia	:	Celendín.
Distrito	:	Cortegana.

3.2. Tipo, nivel, diseño y método de investigación

A. Tipo de investigación

La investigación aplicada busca la generación de conocimiento con aplicación directa a los problemas de la sociedad o el sector productivo, ya que busca resolver un problema práctico (modelar y analizar el decaimiento del cloro residual en la red de distribución de agua potable) y generar conocimiento aplicable (Lozada, 2014).

Es cuantitativo se utiliza para medir y analizar variables de manera objetiva y sistémica, proporcionando datos numéricos que permiten realizar análisis estadísticos, tal como lo señalan Martel & Hernández-Díaz (2023), ya que se enfoca en la recopilación y análisis de datos numéricos para describir y predecir el fenómeno estudiado.

B. Nivel de investigación

El nivel explicativo se enfoca en ampliar el conocimiento existente sobre algo de lo que sabemos poco o nada, ya que busca explicar la relación entre variables (caudal de consumo y decaimiento del cloro residual) y establecer causas y efectos (Arias, 2020).

Es correlacional: Ya que también busca determinar la fuerza y dirección de la relación entre variables (*Investigación correlacional*, 2024)

C. Diseño de investigación

No experimental y transversal: Ya que no se manipulan variables, sino que se observan y analizan en su contexto natural, se recopilan datos en un momento específico en el tiempo durante 3 meses (Cvetković Vega et al., 2021).

D. Método de investigación

Es deductivo y analítico : Se parte de una teoría general (calidad del agua, hidráulica, etc.) para llegar a conclusiones específicas sobre el decaimiento del cloro residual, se descompone el fenómeno estudiado en partes (variables, relaciones, etc.) para analizar y entender mejor (Suárez, 2024).

E. Población

Todos los nodos de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Cortegana donde se puede medir el decaimiento del cloro residual

F. Muestra

14 nodos de muestreo seleccionados por conveniencia en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Cortegana

G. Unidad de análisis

Cada medición de decaimiento del cloro residual en cada punto de muestreo

3.3. Procedimiento

3.3.1. Fase de campo

a. Identificación de las estructuras del sistema de agua potable.

captación

El sistema cuenta con una captación de agua superficial tipo barraje con todas sus estructuras que no se encuentran en buen funcionamiento; el tramo final desemboca en el Filtro Lento.

La captación de quebrada “Rio Grande” cuyas coordenadas referenciadas son:

Este: 745437.73

Norte: 927867.31

Altitud: 2441 m.s.n.m

Línea de conducción

La línea de conducción de dicho sistema mide 575 mL

Planta de tratamiento y Reservorio

El sistema de agua es por gravedad con planta de tratamiento (Filtro Lento), ello debido a que la fuente de captación es superficial (quebrada Rio Grande).

Identificación del sistema de cloración

El sistema de cloración de la red de distribución de agua potable de la ciudad de Cortegana es un sistema de cloración con doble recipiente, diseñado para garantizar una dosificación precisa y continua de cloro en el agua tratada. A continuación, se presentan los detalles del sistema:

- Características del sistema:
 - Tipo de sistema: Cloración con doble recipiente
 - Capacidad de cada recipiente: 600 litros
 - Concentración de cloro: 70% (hipoclorito de sodio)
 - Dosificación objetivo: 1,5 mg/L de cloro residual en el agua tratada

Procedimiento para cloración

La población actual es 549 habitantes.

Número de viviendas 205.

- **Calculamos caudal promedio**

$$Q_p = \frac{\text{Dot} * P_d}{86400} \quad (18)$$

Q_p = Caudal promedio diario anual en L/s

Dot: Dotación en l/hab*d

P_d = Población de diseño en habitantes (hab)

$$Q_p = \frac{80 * 549}{86400}$$

$$Q_p = 0.5083 \text{ L/s}$$

- **Caudal medio diario**

$$Q_{md} = k_1 * Q_p \quad (19)$$

Q_{md} = Caudal medio diario

$$k_1 = 1.3$$

$$Q_{md} = 1.3 * 0.5083$$

$$Q_{md} = 0.66$$

- **Caudal máximo horario**

$$Q_{mh} = k_2 * Q_p \quad (20)$$

$$Q_{mh} = 1.8 * 0.5083$$

$$Q_{mh} = 0.915$$

- **Cálculo del caudal de ingreso**

Para calcular el caudal ingreso, se realizó el siguiente procedimiento:

1. Medición de agua en un balde de 10 Litros: Se midió la cantidad de agua en un balde de 10 litros en varias ocasiones:
 - Primer llenado: 2.62 segundos.

- Segundo llenado: 3.19 segundos.
- Tercer llenado: 2.19 segundos.
- Cuarto llenado: 3.05 segundos.

2. Cálculo del promedio de tiempo:

- Primero, se suman los tiempos de llenado:
 $2.62+3.19+2.19+3.05=11.05$ segundos.
- Luego, se divide entre el número de mediciones (4):

$$Promedio = \frac{11.05}{4} = 2.76 \text{ segundos}$$

3. Cálculo del Caudal:

- Se utiliza el tiempo promedio para calcular el caudal:

$$Caudal = \frac{Volumen}{Tiempo} = \frac{10 \text{ litros}}{2.76 \text{ segundos}} = 3.62 \text{ L/s}$$

Del aforo en el reservorio se tiene 3.62 L/s, esto indica que se debe regular la caudal oferta a nuestro caudal de ingreso calculado realizado al ingreso del reservorio

$$Q_i = 3.62 \text{ L/s}$$

Se calcula con el peso del cloro para varios días

$$P = \frac{Q * T * C_2}{10 * \%Cl} \quad (21)$$

$$P_{10 \text{ días}} = \frac{3.62 \frac{\text{l}}{\text{s}} * (6 * 86400) * 1.5 \text{ mg/L}}{10 * (70)} = 4021.3 \text{ gr}$$

Para la solución madre se verifica la concentración en el tanque donde

$$C_1 \leq 5000 \text{ mg/L}$$

$$C_1 = Pg * 1000 * 1000 * \text{Concentración de cloro} / Vt \quad (22)$$

$$C_1 = 4.0213 * 1000 * 1000 * \left(\frac{70}{100}\right) / Vt$$

Pero

$$V_t = \frac{2814910.0 \text{ mg}}{5000 \text{ mg/L}} = 563.0 \text{ L}$$

Como sobre el reservorio tenemos un tanque de una solución madre de 600L cumplimos con la concentración.

- **Cálculo del caudal de goteo**

Como la dosificación es las 24 h/día en un tiempo de recarga de 6 días se tiene:

El tanque tiene 600000 ml en 6 por lo tanto el caudal de goteo será:

$$q = \frac{600000}{8640} = 69.44 \text{ ml/min}$$

b. Identificación de puntos de monitoreo

Los puntos de monitoreo fueron seleccionados estratégicamente en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Cortegana, considerando factores como accesibilidad y representatividad de diferentes zonas. A continuación, se presenta una descripción detallada de cada punto de monitoreo:

Tabla 1:
Puntos de monitoreo de cloro

PUNTOS DE MONITOREO					
ITEM	DESCRIPCIÓN	ESTE	NORTE	ALTITUD	OBSERVACIÓN
01	NODO: 1	795,195.11	9,279,091.59	2414	
02	NODO: 35	795,343.015	9,279,091.113	2355	
03	NODO: 63	795,373.423	9,279,150.275	2346	
04	NODO: 84	795,505.633	9,279,206.734	2333	
05	NODO: 21	795,253.738	9,279,193.865	2364	
06	NODO: 61	795,358.869	9,279,233.084	2347	
07	NODO: 70	795,447.693	9,279,257.632	2343	
08	NODO: 27	795,251.687	9,279,255.441	2358	
09	NODO: 62	795,387.945	9,279,294.372	2347	
10	NODO: 34	795,286.302	9,279,348.087	2,355	
11	NODO: 28	795,368.914	9,279,328.924	2357	
12	NODO: 73	795,424.175	9,279,334.332	2341	
13	NODO: 22	795,343.393	9,279,414.775	2361	
14	NODO: 37	795,378.641	9,279,407.513	2355	

Para asegurar una cobertura representativa, se implementó un procedimiento de monitoreo sectorizado. Este procedimiento consistió en la verificación interdiarias del cloro residual libre en viviendas seleccionadas en zonas altas y bajas de la zona de estudio. Las mediciones se realizaron a tres horarios específicos: 7:00 a.m., 12:00 p.m. y 5:00 p.m., permitiendo observar las fluctuaciones a lo largo del día y obtener un panorama más completo del comportamiento del cloro residual libre en el sistema de distribución de agua. Esta estrategia de monitoreo sectorizado y de horarios múltiples proporcionó datos más precisos y relevantes para la gestión y optimización del sistema.

La calibración de presiones implica ajustar los parámetros del modelo para que las presiones simuladas coincidan con las presiones medidas en la red de distribución de agua potable. Esto es esencial para garantizar que las simulaciones sean lo más precisas posible y que se puedan tomar decisiones informadas sobre la gestión de la red.

Tabla 2:
Puntos para calibración de presiones

PUNTOS PARA CALIBRACIÓN DE PRESIÓN					
ITEM	DESCRIPCIÓN	ESTE	NORTE	ALTITUD	PRESIÓN DE CAMPO
01	NODO: 1	795,195.11	9,279,091.59	2414	4 mca
02	NODO: 35	795,343.015	9,279,091.113	2355	55 mca
03	NODO: 63	795,373.423	9,279,150.275	2346	66 mca
04	NODO: 84	795,505.633	9,279,206.734	2333	79 mca
05	NODO: 21	795,253.738	9,279,193.865	2364	43 mca
06	NODO: 61	795,358.869	9,279,233.084	2347	74 mca
07	NODO: 70	795,447.693	9,279,257.632	2343	61 mca
08	NODO: 27	795,251.687	9,279,255.441	2358	46 mca
09	NODO: 62	795,387.945	9,279,294.372	2347	57 mca
10	NODO: 34	795,286.302	9,279,348.087	2,355	48 mca
11	NODO: 28	795,368.914	9,279,328.924	2357	46 mca
12	NODO: 73	795,424.175	9,279,334.332	2341	62 mca
13	NODO: 22	795,343.393	9,279,414.775	2361	42 mca
14	NODO: 37	795,378.641	9,279,407.513	2355	48 mca

La Ley de Darcy-Weisbach relaciona la pérdida de carga con el flujo, diámetro y rugosidad de las tuberías. Esta ley es fundamental para entender cómo se comporta el agua en las tuberías y cómo se pueden calcular las pérdidas de carga. Es más precisa que otras fórmulas (como Hazen-Williams) para calcular pérdidas de carga en tuberías pequeñas como en el caso de la línea de distribución de Cortegana que es menor de 2 pulgadas.

c. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se utilizó la observación directa como técnica principal para la recolección de datos Según Tamayo (1999), “es una técnica fundamental para la recolección de datos, puesto que se puede evidenciar los hechos in situ en un proceso investigativo” (p. 71).

Se empleó una ficha de campo como instrumento para registrar los valores de las mediciones del decaimiento de cloro, para su correspondiente contrastación al modelar con el software WaterCad.

- **Procedimiento para toma de muestras en campo en las viviendas**

El proceso de muestreo se realizó durante un período de 3 meses, tomando 3 lecturas interdiarias por cada punto:

Horarios de muestreo: 7:00 am, 12:00 pm y 5:00 pm

- ❖ **Preparación del área de trabajo**

- Se aseguro de trabajar en un área limpia y libre de contaminantes.
- Todos los materiales necesarios para no tener que interrumpir el proceso.

- ❖ **Calibración del comparador**

- Enciende el comparador digital y lee las instrucciones del fabricante para calibrarlo, si es necesario.
- Asegúrate de que el dispositivo esté limpio y funcionando correctamente.

- ❖ **Recolección de la muestra**

- Abre el grifo y deja correr el agua durante 2-3 minutos antes de tomar la muestra para asegurar que el agua sea representativa.
- Llena un tubo de muestreo con el agua (sigue la línea de llenado indicada en el tubo).

- ❖ **Agregar solución reactiva**

- Agrega la cantidad indicada de la solución reactiva para cloro al tubo de muestreo con el agua.
- Cierra el tubo y agítalo suavemente durante unos segundos para mezclar bien.

- ❖ **Esperar el tiempo de reacción**

- Consulta las instrucciones del reactivo para determinar el tiempo de espera (usualmente es de unos minutos) antes de medir.

❖ **Medición del Cloro Residual**

- Coloca la muestra en el comparador digital.
- Espera a que el dispositivo dé la lectura. Anota el resultado que obtengas.

❖ **Limpiar el Equipamiento**

- Enjuaga el tubo de muestreo con agua destilada o desionizada después de cada uso.
- Limpia el comparador según las indicaciones del fabricante para evitar contaminación cruzada.

❖ **Registro de Resultados**

- Anota los resultados en un registro para poder hacer un seguimiento de las mediciones realizadas.

• **Procedimiento para medir la concentración de cloro residual en WaterCAD**

❖ **Preparar el Modelo de Agua**

- Abre WaterCAD y carga el modelo de red de distribución de agua correspondiente al área que deseas evaluar.
- Asegúrate de que todos los datos sobre tuberías, nodos, tanques y fuentes de agua estén correctamente subidos.
- Diámetro de tubería, material de tubería.
- Variaciones de consumo durante el día.
- Consumo de agua por habitante.

Figura 8:
Tabla de Flex Table de WaterCAD

FlexTable: Pipe Table (Current Time: 12.000 hours) (SIMULACIÓN CORTEGANA.wtg)

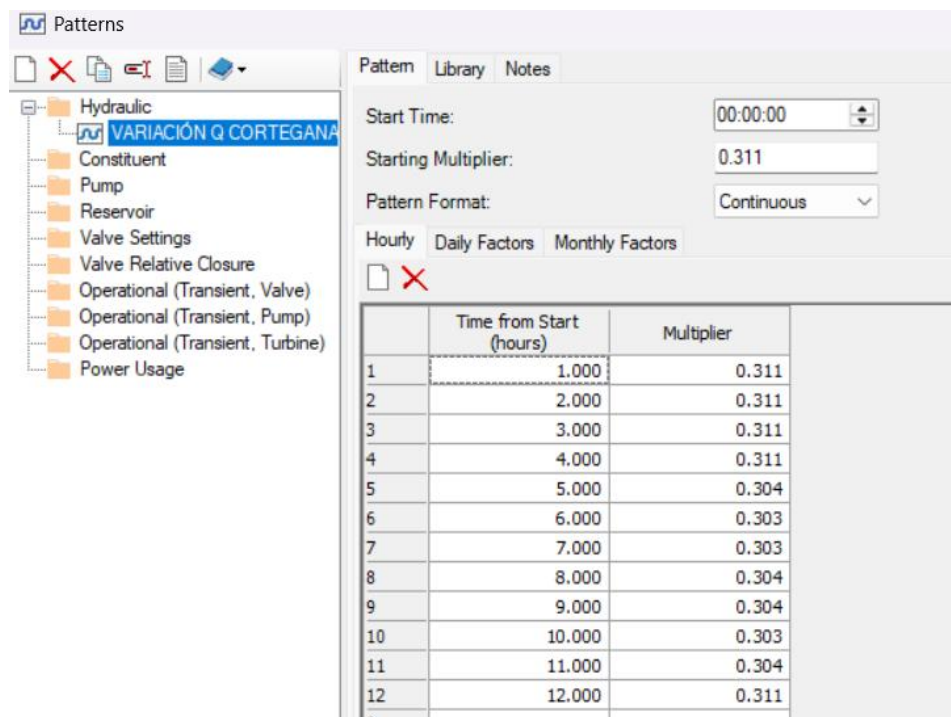
	Label	Start Node	Stop Node	Diameter (m)	PVC	Pressure (Stop) (m H2O)	Pressure (Start) (m H2O)	Pressure Loss Gradient (Pa/m)	Flow (L/s)	Velocity (m/s)	Hazen-Williams C
184: T:82	T:82	N:25	N:32	0.75	PVC	52.2	50.2	0.672	0.006	0.02	140
195: T:84	T:84	N:73	N:68	0.75	PVC	63.9	66.9	0.644	0.006	0.02	140
198: T:85	T:85	N:37	N:40	0.75	PVC	53.9	53.3	0.639	0.006	0.02	140
211: T:86	T:86	N:79	N:87	0.75	PVC	84.2	76.5	0.631	0.006	0.02	140
679: T:91	T:91	N:72	N:89	1.00	PVC	47.8	22.2	0.155	0.006	0.01	140
202: T:75	T:75	N:65	N:58	0.75	PVC	60.9	61.7	1.068	0.008	0.03	140
186: T:83	T:83	N:28	N:59	0.75	PVC	61.1	50.9	1.622	0.011	0.04	140
241: T:72	T:72	N:74	N:77	0.75	PVC	65.5	64.5	1.638	0.011	0.04	140
249: T:89	T:89	N:56	N:49	0.75	PVC	58.8	60.0	1.620	0.011	0.04	140
272: T:90	T:90	N:73	N:64	0.75	PVC	61.4	66.9	1.629	0.011	0.04	140
224: T:87	T:87	N:84	N:88	0.75	PVC	87.2	80.2	3.032	0.015	0.05	140
243: T:94	T:94	N:81	N:82	0.75	PVC	69.4	69.4	3.019	0.015	0.05	140
274: T:68	T:68	N:76	N:85	0.75	PVC	73.0	64.4	3.009	0.015	0.05	140
578: T:70	T:70	N:9	N:17	0.75	PVC	33.7	31.8	3.026	0.015	0.05	140
588: T:67	T:67	N:45	N:72	1.00	PVC	22.2	12.9	0.745	0.015	0.03	140
226: T:69	T:69	N:37	N:51	0.75	PVC	58.9	53.3	3.884	0.017	0.06	140
228: T:88	T:88	N:24	N:46	0.75	PVC	57.6	49.1	3.868	0.017	0.06	140
236: T:93	T:93	N:62	N:60	0.75	PVC	59.3	59.5	4.791	0.019	0.07	140
277: T:65	T:65	N:70	N:80	0.75	PVC	68.0	61.6	4.837	0.019	0.07	140
639: T:73	T:73	N:53	N:57	0.75	PVC	66.1	65.5	4.805	0.019	0.07	140
587: T:64	T:64	N:39	N:45	1.00	PVC	12.9	11.1	1.190	0.019	0.04	140
665: T:58	T:58	N:16	VRP7:1	1.00	PVC	42.6	34.8	1.497	0.021	0.04	140
666: T:59	T:59	VRP7:1	N:39	1.00	PVC	11.1	0.0	1.481	0.021	0.04	140
673: T:55	T:55	N:86	VRP7:2	1.00	PVC	75.4	74.4	1.441	0.021	0.04	140
674: T:56	T:56	VRP7:2	N:90	0.75	PVC	14.9	0.0	5.847	0.021	0.07	140
756: T:76	T:76	N:41	N:42	1.00	PVC	54.6	54.1	1.423	0.021	0.04	140

Figura 9:
 Table Junction de WaterCAD

FlexTable: Junction Table (Current Time: 12.000 hours) (SIMULACIÓN CORTEGANA.wtg)

	Label	Elevation (m)	Concentration (Calculated) (ppm)	Pressure (m H2O)	Hydraulic Grade (m)	Demand (L/s)
1577: N:17	N:17	2,373	0.18	33.7	2,407	0.015
1574: N:9	N:9	2,375	0.22	31.8	2,407	0.028
1590: N:10	N:10	2,375	0.23	31.9	2,407	0.031
1678: N:89	N:89	2,317	0.26	47.8	2,365	0.006
1571: N:11	N:11	2,375	0.26	32.0	2,407	0.013
1658: N:92	N:92	2,294	0.28	35.9	2,330	0.017
1580: N:12	N:12	2,375	0.30	32.2	2,407	0.002
1659: N:91	N:91	2,300	0.31	29.9	2,330	0.002
1269: N:78	N:78	2,340	0.32	65.9	2,406	0.004
1213: N:87	N:87	2,329	0.32	84.2	2,413	0.006
1225: N:88	N:88	2,326	0.33	87.2	2,413	0.015
1294: N:72	N:72	2,343	0.33	22.2	2,365	0.008
1660: N:90	N:90	2,315	0.33	14.9	2,330	0.002
1675: N:13	N:13	2,375	0.35	32.5	2,407	0.004
1244: N:82	N:82	2,336	0.35	69.4	2,406	0.015
1248: N:71	N:71	2,343	0.35	62.9	2,406	0.004
1223: N:84	N:84	2,333	0.36	80.2	2,413	0.025
1275: N:85	N:85	2,331	0.36	73.0	2,405	0.015
1206: N:86	N:86	2,331	0.37	74.4	2,406	0.008
1242: N:77	N:77	2,340	0.37	65.5	2,406	0.011
1711: N:64	N:64	2,346	0.38	61.4	2,408	0.011
1212: N:79	N:79	2,337	0.38	76.5	2,413	0.042
1221: N:83	N:83	2,335	0.38	69.0	2,405	0.028
1205: N:81	N:81	2,336	0.39	69.4	2,406	0.040
1197: N:68	N:68	2,344	0.39	63.9	2,408	0.006
1278: N:80	N:80	2,337	0.40	68.0	2,405	0.019
1586: N:45	N:45	2,352	0.40	12.9	2,365	0.004
1220: N:76	N:76	2,340	0.41	64.4	2,405	0.065
1649: N:75	N:75	2,341	0.41	72.6	2,413	0.034
1583: N:14	N:14	2,375	0.41	32.9	2,408	0.002

Figura 10:
Variación de consumo horario



❖ Importancia del Caudal de Agua de Ingreso

- Es crucial configurar correctamente el caudal de agua de ingreso al sistema para simular de manera precisa la distribución de cloro, los flujos entrantes desde fuente a la planta de tratamiento de agua en este caso el caudal de ingreso es de 3.62 L/s.

❖ Configurar Parámetros de Calidad del Agua

- Ve a la pestaña de "Quality" (Calidad del Agua).
- Selecciona el elemento tanque donde se medir el cloro residual inicial.
- Agrega un componente de calidad (como cloro) en el nodo:
- Haz clic en el nodo.
- Agrega "Water Quality" establece un valor inicial de cloro residual. Esto depende al día y al consumo de agua que pueda haber.

Figura 11:
Tabla de concentración de cloro inicial

Constituent : Cloro residual con reaccion la pared (SIMULACIÓN CORTEGANA.wtg)

❖ Considerar las Presiones del Sistema

- Revisa y ajusta las presiones en la red de distribución, ya que estas afectan el transporte del cloro:
- Asegúrate de que las presiones en los nodos y en los puntos de consumo sean adecuadas para evitar problemas de distribución.

❖ Configurar el Tratamiento de Cloro

- Si hay un punto de inyección de cloro es en el reservorio con el procedimiento de la solución madre:
- Ajusta las tasas de inyección de cloro según las necesidades del sistema y el caudal de ingreso.

❖ Crear un Esquema de Muestreo

- Define el esquema de muestreo para los tres horarios (7:00 am, 12:00 pm y 5:00 pm):
- Dirígete a la pestaña de "Analysis" (Análisis).
- Crea un hecho de calidad del agua para medir el cloro en los intervalos deseados.

❖ Simulación del Transporte de Cloro

- Realiza una simulación para evaluar la calidad del agua:
- Asegúrate de que los consumos de agua de la población estén correctamente modelados, ya que esto influye en la concentración de cloro residual en la red.
- Configura el simulador para que corra durante el período que incluya tus horarios de muestreo.

❖ Ejecutar la Simulación

- Ejecuta la simulación. WaterCAD calculará la distribución del cloro en los diversos puntos de la red de agua durante los intervalos de tiempo que has establecido.

Figura 12:
Simulación en WaterCAD a las 7:00 am

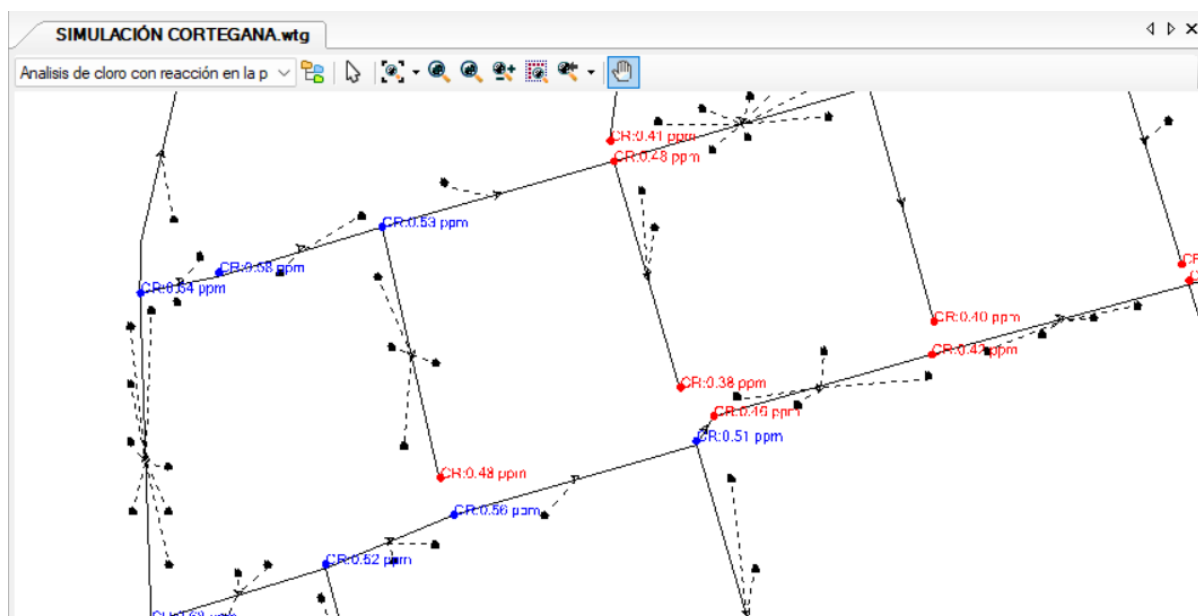


Figura 13:
Simulación en WaterCAD a las 12:00 pm

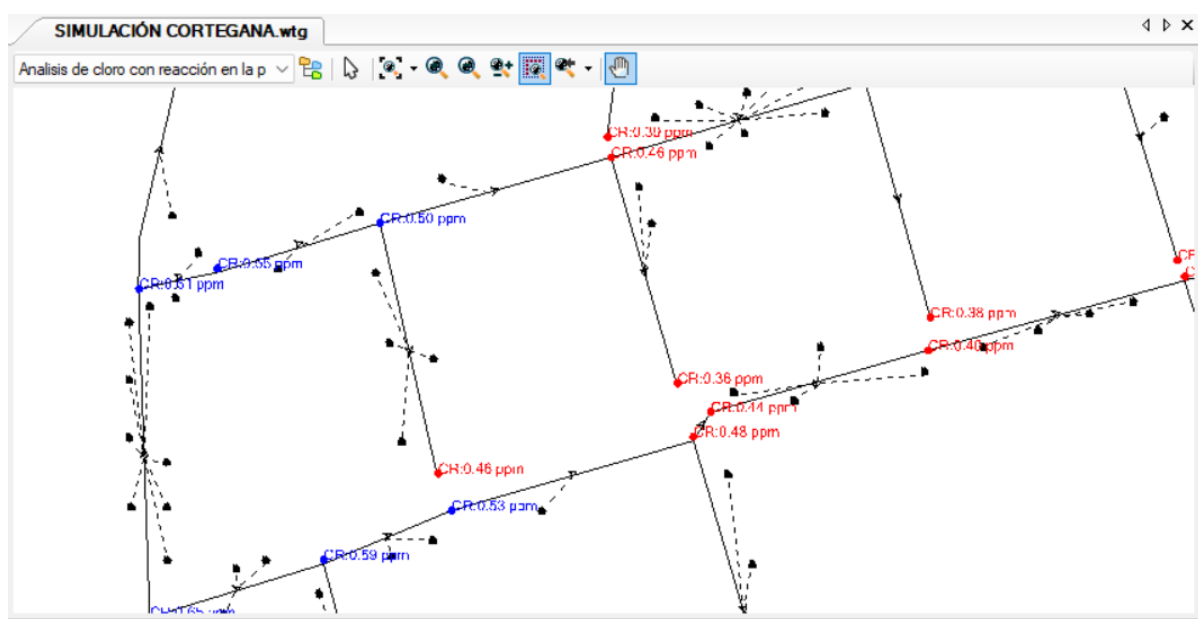
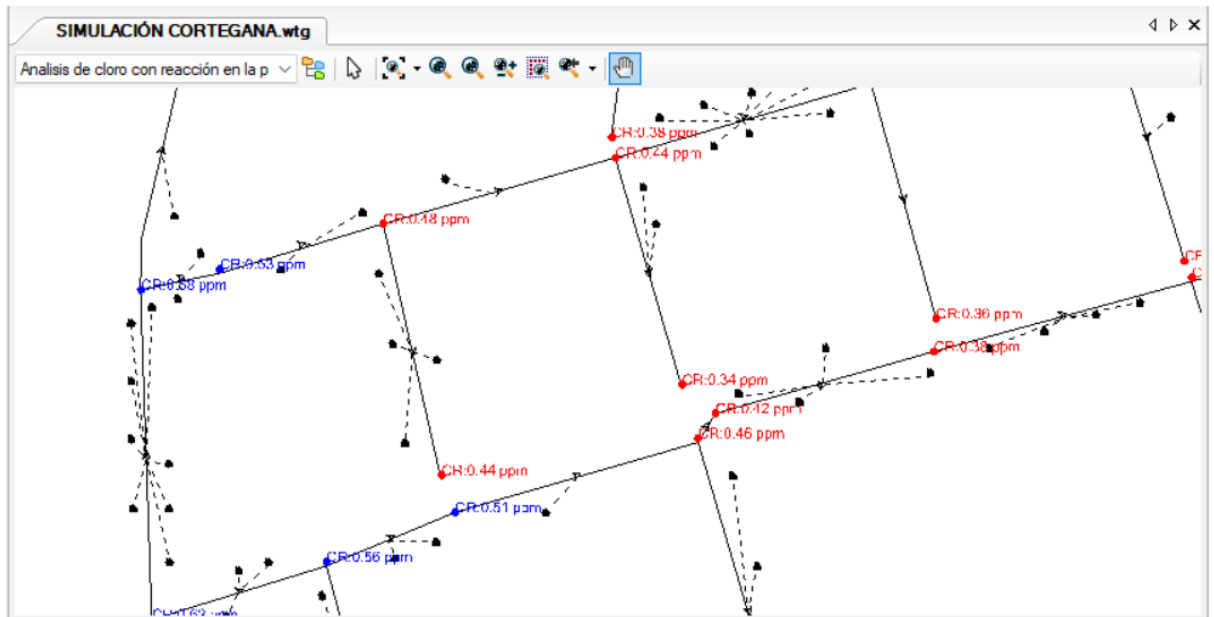


Figura 14:
Simulación WaterCAD a las 5:00 p.m.



❖ Analizar Resultados

- Revisa las lecturas de cloro residual en los puntos deseados a las 7:00 am, 12:00 pm y 5:00 pm en la pestaña de "Results" (Resultados).
- Exporta o guarda los resultados para tus registros.

3.4. Tratamiento y análisis de datos y presentación de resultados

Para establecer la relación entre el modelado y el comportamiento del cloro residual y su contrastación en la red del sistema de agua potable, los datos observados en los nodos se registraron en las fichas de campo. Luego, estos datos se sistematizaron, tabularon y representaron mediante estadística descriptiva analítica. Posteriormente, a través de la estadística inferencial, se determinó la relación entre las variables de estudio mediante análisis de pruebas estadísticas. Para ello, se utilizará el software IBM SPSS.

Tabla 3:*Mediciones de cloro en la salida reservorio durante el mes de febrero*

Mediciones de cloro	Reservorio
M1	0.93
M2	1.03
M3	0.98
M4	0.94
M5	0.96
M6	0.99
M7	1.02
M8	1.12
M9	1.07
M10	0.87
M11	1.16
M12	1.23
M13	1.17
M14	1.15

Tabla 4:*Mediciones de cloro en la salida del reservorio durante el mes de marzo*

Mediciones de cloro	Reservorio
M1	1.01
M2	0.93
M3	0.85
M4	0.98
M5	0.83
M6	0.99
M7	0.98
M8	0.89
M9	0.94
M10	0.97
M11	0.96
M12	0.97

Mediciones de cloro	Reservorio
M13	0.95
M14	0.98
M15	1.07

Tabla 5:

Mediciones de cloro en la salida del reservorio durante el mes de abril

Mediciones de cloro	Reservorio
M1	0.89
M2	0.77
M3	0.75
M4	0.9
M5	0.85
M6	0.84
M7	0.92
M8	0.76
M9	0.86
M10	0.88
M11	0.75
M12	0.85
M13	0.89
M14	0.92
M15	1.04

La correlación se utilizó para medir la hipótesis. La correlación es una medida estadística que evalúa la relación entre dos variables cuantitativas a través de un coeficiente que varía entre -1 y 1 (Pearson, K., 1896).

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Análisis de resultados

En la tabla de febrero donde se incluyó las 14 fechas se confirma el decaimiento diurno: el error promedio del modelo aumenta de 11,56% (07:00) a 15,15% (12:00) y 21,41% (17:00). WaterCAD sobreestima el residual y la brecha crece hacia la tarde, probablemente por mayores tiempos de residencia y variabilidad hidráulica vespertina. En la tabla del mes de marzo donde se incluyó las 15 fechas se mantiene el patrón con errores más moderados que en febrero, 11,60% (07:00), 14,42% (12:00) y 18,16% (17:00) ; el modelo sigue sesgado al alza, sobre todo al cierre del día; una calibración fina de k (bulk y pared) y de patrones de consumo ayudaría a reducir la diferencia. Mientras que la tabla del mes de abril que está incluido las 15 fechas por la mañana y tarde los errores son 9,39% (07:00), 12,25% (12:00) y 19.66%(17:00), recomienda incorporar dependencia térmica y revisar dosificación/operación para ese tramo horario. Desde el punto de vista teórico, el cloro se comporta como un reactivo de primer orden afectado por la cinética en masa (K_b) y por la demanda de pared (K_w), por lo que pequeñas variaciones en las condiciones hidráulicas y de calidad (pH, temperatura, materia orgánica) pueden traducirse en errores horarios al no estar completamente capturadas por el conjunto de parámetros, estos resultados coinciden con la formulación clásica de redes de distribución y transporte–reacción de desinfectantes (Rossman et al., 1994) y con aplicaciones recientes que recomiendan calibrar K_b/K_w con datos locales (García-Ávila et al., 2021; Gutiérrez, 2018) y en el contexto nacional, DIGESA (2024) enfatiza asegurar el mantenimiento de niveles operativos de cloro residual en red, lo que sustenta la necesidad de ajustes operacionales cuando se identifican valores inferiores a las metas sanitarias.

O.G. Determinar la relación del decaimiento de cloro residual usando WaterCAD y su contratación en la red de distribución de agua potable en la ciudad de Cortegana.

Tabla 6

Mes de febrero concentraciones de cloro (WaterCAD vs Campo)

Fecha	07:00				12:00				17:00			
	Cloro medido (mg/L)	Cloro simulado (mg/L)	Error absoluto (mg/L)	Error %	Cloro medido (mg/L)	Cloro simulado (mg/L)	Error absoluto (mg/L)	Error %	Cloro medido (mg/L)	Cloro simulado (mg/L)	Error absoluto (mg/L)	Error %
02/02/2024	0.43	0.49	0.06	12.68	0.40	0.46	0.07	14.22	0.38	0.45	0.06	14.13
04/02/2024	0.46	0.54	0.08	15.37	0.38	0.51	0.13	25.00	0.29	0.49	0.20	40.97
06/02/2024	0.38	0.52	0.13	25.83	0.37	0.49	0.12	24.59	0.30	0.47	0.17	36.17
08/02/2024	0.39	0.49	0.11	21.86	0.43	0.47	0.04	8.15	0.37	0.45	0.08	17.29
10/02/2024	0.45	0.50	0.05	10.32	0.41	0.48	0.07	14.08	0.36	0.46	0.10	20.87
12/02/2024	0.48	0.52	0.04	8.06	0.40	0.49	0.09	19.14	0.37	0.47	0.11	22.78
14/02/2024	0.49	0.54	0.05	8.58	0.41	0.51	0.09	18.38	0.38	0.49	0.12	23.42
16/02/2024	0.52	0.59	0.06	11.04	0.46	0.56	0.10	17.99	0.44	0.54	0.10	18.59
18/02/2024	0.50	0.56	0.06	11.21	0.47	0.53	0.07	12.76	0.40	0.51	0.12	22.61
20/02/2024	0.43	0.46	0.03	6.35	0.39	0.43	0.05	10.88	0.33	0.42	0.09	20.67
22/02/2024	0.57	0.61	0.04	6.72	0.51	0.58	0.07	12.28	0.46	0.56	0.10	17.45
24/02/2024	0.62	0.65	0.03	4.18	0.57	0.61	0.04	6.06	0.52	0.59	0.07	12.03
26/02/2024	0.57	0.61	0.04	7.17	0.52	0.58	0.06	10.12	0.46	0.56	0.10	17.29
28/02/2024	0.53	0.60	0.08	12.42	0.47	0.57	0.11	18.50	0.47	0.55	0.09	15.43
Promedio	0.49	0.55	0.06	11.56	0.44	0.52	0.08	15.15	0.39	0.50	0.11	21.41
Mediana	0.48	0.54	0.06	10.68	0.42	0.51	0.07	14.15	0.38	0.49	0.10	19.63
Desv.	0.07	0.06	0.03	6.04	0.06	0.05	0.03	5.70	0.07	0.05	0.04	8.05

Tabla 7

Mes de marzo concentraciones de cloro (WaterCAD vs Campo)

Fecha	07:00				12:00				17:00			
	Cloro medido (mg/L)	Cloro simulado (mg/L)	Error absoluto (mg/L)	Error %	Cloro medido (mg/L)	Cloro simulado (mg/L)	Error absoluto (mg/L)	Error %	Cloro medido (mg/L)	Cloro simulado (mg/L)	Error absoluto (mg/L)	Error %
02/03/2024	0.50	0.53	0.03	5.47	0.47	0.50	0.03	5.39	0.44	0.48	0.04	8.26
04/03/2024	0.46	0.49	0.03	5.32	0.41	0.46	0.06	12.28	0.38	0.45	0.07	15.02
06/03/2024	0.40	0.45	0.05	10.49	0.37	0.42	0.05	12.50	0.31	0.41	0.10	25.06
08/03/2024	0.43	0.52	0.09	16.70	0.40	0.49	0.09	18.44	0.38	0.47	0.09	20.00
10/03/2024	0.38	0.44	0.06	12.61	0.36	0.41	0.05	12.62	0.32	0.40	0.08	19.00
12/03/2024	0.48	0.52	0.04	7.10	0.42	0.49	0.07	15.07	0.39	0.47	0.09	18.57
14/03/2024	0.43	0.51	0.08	15.56	0.39	0.49	0.10	20.29	0.40	0.47	0.07	15.32
16/03/2024	0.40	0.47	0.07	13.92	0.36	0.44	0.08	17.83	0.32	0.43	0.11	25.82
18/03/2024	0.46	0.49	0.03	6.28	0.41	0.47	0.06	12.66	0.37	0.45	0.09	19.07
20/03/2024	0.43	0.51	0.08	15.07	0.39	0.48	0.09	19.46	0.41	0.47	0.07	14.16
22/03/2024	0.42	0.50	0.08	16.07	0.38	0.48	0.10	20.80	0.38	0.46	0.08	18.26
24/03/2024	0.47	0.51	0.04	8.41	0.44	0.48	0.04	8.07	0.41	0.47	0.06	11.80
26/03/2024	0.39	0.50	0.11	22.80	0.43	0.47	0.05	9.51	0.37	0.46	0.08	18.20
28/03/2024	0.48	0.52	0.04	6.99	0.40	0.49	0.09	18.65	0.37	0.47	0.10	21.28
30/03/2024	0.50	0.56	0.06	11.21	0.47	0.53	0.07	12.76	0.40	0.51	0.12	22.61
Promedio	0.44	0.50	0.06	11.60	0.41	0.47	0.07	14.42	0.38	0.46	0.08	18.16
Mediana	0.43	0.51	0.06	11.21	0.40	0.48	0.07	12.76	0.38	0.47	0.08	18.57
Desv.	0.04	0.03	0.03	5.10	0.03	0.03	0.02	4.70	0.04	0.03	0.02	4.73

Tabla 8

Mes de abril concentraciones de cloro (WaterCAD vs Campo)

Fecha	07:00				12:00				17:00			
	Cloro medido (mg/L)	Cloro simulado (mg/L)	Error absoluto (mg/L)	Error %	Cloro medido (mg/L)	Cloro simulado (mg/L)	Error absoluto (mg/L)	Error %	Cloro medido (mg/L)	Cloro simulado (mg/L)	Error absoluto (mg/L)	Error %
01/04/2024	0.38	0.47	0.09	18.42	0.36	0.44	0.08	18.74	0.32	0.43	0.10	23.94
03/04/2024	0.43	0.41	0.03	7.16	0.39	0.38	0.01	1.57	0.41	0.37	0.04	10.03
05/04/2024	0.41	0.39	0.02	5.08	0.36	0.37	0.01	3.49	0.35	0.36	0.01	3.62
07/04/2024	0.40	0.47	0.07	15.01	0.36	0.45	0.08	18.57	0.32	0.43	0.12	26.85
09/04/2024	0.40	0.45	0.05	10.27	0.36	0.42	0.06	13.95	0.32	0.41	0.09	22.17
11/04/2024	0.43	0.44	0.01	2.95	0.39	0.39	0.01	1.28	0.33	0.40	0.07	18.11
13/04/2024	0.43	0.48	0.06	11.36	0.40	0.46	0.06	12.72	0.38	0.44	0.07	14.74
15/04/2024	0.40	0.40	0.00	0.50	0.36	0.38	0.01	3.70	0.32	0.37	0.05	13.66
17/04/2024	0.42	0.45	0.03	5.99	0.38	0.43	0.05	11.45	0.40	0.41	0.02	4.12
19/04/2024	0.36	0.45	0.09	19.51	0.31	0.43	0.12	28.10	0.27	0.41	0.15	35.68
21/04/2024	0.40	0.39	0.01	2.03	0.36	0.37	0.01	2.15	0.32	0.36	0.04	11.98
23/04/2024	0.39	0.45	0.06	13.39	0.35	0.42	0.08	18.44	0.29	0.41	0.12	28.57
25/04/2024	0.43	0.47	0.04	8.35	0.39	0.44	0.06	13.09	0.33	0.43	0.10	22.54
27/04/2024	0.46	0.48	0.02	4.34	0.41	0.46	0.05	10.75	0.37	0.44	0.08	17.23
29/04/2024	0.46	0.55	0.09	16.45	0.38	0.52	0.13	25.73	0.29	0.50	0.21	41.68
Promedio	0.41	0.45	0.04	9.39	0.37	0.42	0.05	12.25	0.33	0.41	0.08	19.66
Mediana	0.41	0.45	0.04	8.35	0.36	0.43	0.06	12.72	0.32	0.41	0.08	18.11
Desv. típica	0.03	0.04	0.03	6.11	0.02	0.04	0.04	8.64	0.04	0.04	0.05	10.77

Tabla 9
Correlación de cloro simulado y medido

Relación	r de Pearson	Sig. (bilateral)	N
Cloro simulado/ medido	0,377	0,318	9,000

En la tabla 8 la correlación de Pearson entre lo simulado y lo medido salió que la asociación es positiva pero débil y no significativa al 5 %. Este resultado es esperable cuando se validan promedios mensuales por hora lo cual reduce la variabilidad útil y cuando los parámetros de decaimiento no han sido ajustados finamente para cada tramo en la literatura sobre modelación hidráulica y de calidad reporta correlaciones sustancialmente superiores cuando se calibra por sectores y se monitorea con mayor densidad temporal (p. ej., redes en las que WaterCAD/WaterGEMS se ajusta con series día–hora y pruebas de sensibilidad; Sudheer et al., 2020) por lo tanto, los valores observados sugieren profundizar la calibración y densificar el muestreo para capturar los cambios operativos reales.

Se encontró una correlación moderadamente débil entre el cloro residual simulado y medido en la red de distribución de agua potable, con un coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0.377 y un valor de significación (p-valor) de 0.318.

El modelo de simulación predice correctamente solo el 37.7% de la variabilidad en el cloro residual medido, lo que sugiere que el modelo tiene una precisión limitada.

La exactitud del modelo es moderadamente baja, lo que indica que el modelo podría ser mejorado para predecir el cloro residual en la red de distribución de agua potable.

El modelo actual podría no ser suficientemente preciso para tomar decisiones informadas sobre la calidad del agua en la red de distribución.

O.E.1. Analizar el decaimiento de cloro residual en la red de distribución de agua potable en la ciudad de Cortegana.

Tabla 10
Decaimiento horario y caudal promedio

Mes	Intervalo	Q promedio (L/s)	Horas	Decaimiento Campo (mg/L·h ⁻¹)	Decaimiento WaterCAD (mg/L·h ⁻¹)
Febrero	07-12	3,759	5	-0,009	-0,006
Febrero	12-17	3,704	5	-0,007	-0,001
Marzo	07-12	3,796	5	-0,009	-0,005
Marzo	12-17	3,731	5	-0,006	-0,003
Abril	07-12	3,839	5	0,004	-0,008
Abril	12-17	3,787	5	-0,028	0,004

En la Tabla 8, el decaimiento horario de campo ($\Delta Cl/h$) se ubicó entre -0,028 y 0,004 mg/L·h⁻¹ y los caudales promedio por intervalo variaron en un rango estrecho de 3,704 a 3,839 L/s, lo cual ayuda a explicar la ausencia de grandes cambios hidráulicos entre ventanas pero también se observaron incrementos puntuales ($\Delta Cl/h > 0$) compatibles con dosificación reciente o renovación del agua en ciertos horarios, seguidos de descensos más marcados en la tarde; este patrón es coherente con la sensibilidad de la demanda de pared y con los tiempos de contacto efectivos en redes con operación intermitente (Mostafa et al., 2013; García-Ávila et al., 2021).

O.E.2.Determinar la relación significativa entre el decaimiento de cloro residual y el caudal de consumo.

Tabla 11
Correlación entre decaimiento y caudal

Relación	r de Pearson	Sig. (bilateral)	N
Decaimiento (Campo)/ Q promedio	0,116	0,827	6,000

La Tabla 9 muestra que la relación lineal entre el decaimiento horario y el caudal promedio por intervalo no resultó significativa dado el rango acotado de caudales, el efecto puramente hidráulico queda enmascarado por la química de descomposición y por la interacción con la pared, tal como se deriva del modelo de primer orden y de la evidencia empírica en redes reales (Rossman et al., 1994; Mostafa et al., 2013) en otras palabras, cuando Q no cambia mucho, la variación de $\Delta Cl/h$ depende más de K_b y K_w y de la calidad del agua que del caudal en sí mismo.

Se encontró una relación muy débil y positiva entre el decaimiento de cloro residual y el caudal de consumo en la red de distribución de agua potable, con un coeficiente de correlación de Pearson de 0.116 y un valor de significancia de 0.827; es probable que otros factores como el material de tubería, la temperatura, el pH, y la presencia de compuestos reductores sean más influyentes en el decaimiento de cloro residual.

O.E.3. Desarrollar un modelo predictivo del decaimiento de cloro en función del caudal de consumo.

Tabla 12
Coeficientes de regresión

Parámetro	Coef β	EE	t	p
Const	-0,103	0,404	-0,256	0,810
Q_prom_Lps_intervalo	0,025	0,107	0,234	0,827

Tabla 13
Métricas del modelo

R ²	R ² ajustado	RMSE	N
0,013	-0,233	0,009	6

Ecuación: $\Delta Cl/h = -0,1035 + 0,0250 \cdot Q$

En la tabla 11 se presenta el modelo predictivo lineal $\Delta Cl/h = -0,1035 + 0,0250 \cdot Q$. El desempeño global ($R^2 = 0,013$; $RMSE \approx 0,0095 \text{ mg/L} \cdot \text{h}^{-1}$) indica baja capacidad explicativa con un único predictor hidráulico. La literatura especializada coincide en que el decaimiento del cloro responde a un conjunto de factores (pH, temperatura, tiempo de residencia, K_b/K_w , demanda orgánica y condiciones de pared), por lo que los mejores ajustes se obtienen con modelos multivariados y con una calibración explícita de K_b y K_w por sector horario (García-Ávila et al., 2021; Sudheer et al., 2020; Gutiérrez, 2018). Bajo ese enfoque, la ecuación obtenida aquí debe interpretarse como una aproximación descriptiva inicial que orienta el planeamiento de muestreos y pruebas de ajuste.

En relación con los criterios sanitarios, DIGESA (2024) establece mantener niveles operativos de cloro residual en red para asegurar la desinfección; al detectar mediciones por debajo de los umbrales operativos, corresponde implementar ajustes de dosificación y acciones de renovación/mezcla. En consecuencia, los resultados de esta campaña respaldan el fortalecimiento de la operación y la calibración del modelo sobre la base de evidencia local.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Se concluye que la relación entre las mediciones de campo y la modelación en WaterCAD reproduce la tendencia general del cloro residual en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Cortegana. En los tres meses evaluados se confirmó un decaimiento diurno del cloro residual, así como un sesgo sistemático al alza del modelo respecto a las mediciones de campo. El error promedio aumentó conforme avanzó el día: en febrero pasó de 11,56 % (07:00) a 15,15 % (12:00) y 21,41 % (17:00); en marzo, de 11,60 % (07:00) a 14,42 % (12:00) y 18,16 % (17:00); y en abril, de 9,39 % (07:00) a 12,25 % (12:00) y 19,66 % (17:00). Estos resultados indican que el modelo subestima el decaimiento real bajo condiciones de mayores tiempos de residencia y que, en abril, la temperatura y/o la operación al mediodía intensifican la pérdida de cloro, no capturada por la parametrización actual.
- Luego del análisis, se determinó que el decaimiento horario observado en campo se ubicó entre $-0,028$ y $0,004 \text{ mg/L}\cdot\text{h}^{-1}$, mientras que los caudales promedio por intervalo mostraron un rango estrecho ($3,704\text{--}3,839 \text{ L/s}$). Se identificaron incrementos puntuales ($\Delta\text{Cl}/\text{h} > 0$) compatibles con procesos de dosificación o renovación reciente, así como descensos más pronunciados en horas de la tarde. En conjunto, el patrón observado es coherente con un proceso de primer orden influenciado de manera combinada por la cinética en masa (K_b) y la demanda de pared (K_w).
- No se encontró una relación lineal significativa entre el decaimiento horario del cloro residual y el caudal promedio por intervalo ($r = 0,116$; $p = 0,827$; $N = 6$). En el rango acotado de caudales analizado, los resultados sugieren que la

variación de $\Delta Cl/h$ está más influenciada por las reacciones en masa y en pared, así como por la calidad del agua, antes que por el caudal de consumo propiamente dicho.

- El modelo predictivo lineal $\Delta Cl/h = -0,1035 + 0,0250 \cdot Q$ presentó una baja capacidad explicativa ($R^2 = 0,013$; $RMSE \approx 0,0095 \text{ mg/L} \cdot \text{h}^{-1}$). Con un único predictor hidráulico (Q) no fue posible representar adecuadamente el comportamiento del decaimiento de cloro residual, por lo que la ecuación debe considerarse únicamente como una aproximación descriptiva inicial y no como un modelo predictivo robusto.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda realizar campañas de muestreo estacionales que permitan evaluar la variabilidad del decaimiento del cloro residual en diferentes condiciones climáticas y operativas. Asimismo, es importante registrar de manera sistemática parámetros de calidad del agua como pH, temperatura y carbono orgánico total (TOC/AOC), dado que influyen directamente en la cinética de desinfección. Se sugiere ajustar el coeficiente de reacción en masa (K_b) utilizando la ecuación de Arrhenius para considerar el efecto de la temperatura, así como calibrar la demanda de pared (K_w) en función del material y la edad de las tuberías de la red de distribución. Estas acciones permitirán mejorar la representatividad del modelo, optimizar la dosificación de cloro y garantizar una desinfección más eficiente en toda la red.
- realizar mediciones específicas de caudales durante los períodos de estiaje y de lluvia, con el fin de identificar variaciones en la demanda y evaluar su impacto en la estabilidad del cloro residual dentro de la red.
- Se recomienda continuar con el ajuste y la validación del modelo WaterCAD utilizando datos de campo estacionales, a fin de mejorar su precisión en la predicción del comportamiento del cloro residual bajo diferentes escenarios operativos.

REFERENCIAS

- Agüero, R. (1997). Sistemas de abastecimiento por gravedad sin tratamiento. <https://www.ircwash.org/sites/default/files/221-16989.pdf>
- Alves, Z., Muranho, J., Albuquerque, T. y Ferreira, A. (2014). Water distribution network's modeling and calibration. A case study based on scarce inventory data. *Procedia Engineering* 70 (7) 31-40. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814000071>
- Angassa, K., Feyisa, M., Tessema, I., & Abewaa, M. (2025). Residual chlorine modelling in drinking water distribution system of Bishoftu Town, Ethiopia. *Results in Engineering*, 25(104075), 104075. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104075>
- Apumayta, M. (2021). Modelamiento y simulación de la concentración de cloro residual mediante el software Watercad en la red de distribución de EMAPA de Huancavelica. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica]. <https://apirepositorio.unh.edu.pe/server/api/core/bitstreams/0883d0a0-dd89-4053-9896-4bcf43722f13/content>
- Aragoneses López, S., Zarzosa González, H. J.(2020). Fundamentos de Ingeniería ambiental y del agua. Dextra Editorial. <https://ebooks7-24.com/?il=10063>
- Arias, E. R. (2020, December 9). ¿Qué es la investigación explicativa? Definición, características y ejemplos. *Economipedia*. <https://economipedia.com/definiciones/investigacion-explicativa.html>
- Boecker, D., Zhang, Z., Breves, R., Herth, F., Kramer, A., & Bulitta, C. (2023). Antimicrobial efficacy, mode of action and in vivo use of hypochlorous acid (HOCl) for prevention or therapeutic support of infections. *GMS Hygiene and Infection Control*, 18, Doc07. <https://doi.org/10.3205/dgkh00043>
- Bovis, J. E. A. (2024). Evaluación del sistema de agua potable mediante indicadores de orden social y estadístico en el centro poblado de Huaricolca-Junín. *Edu.Pe*. Retrieved August 12, 2025, from https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/16298/8/IV_FIN_105_TE_Alcantara_Bovis_2024.pdf

- Carhuapoma, J. y Chahuayo, A. (2019). Diseño del sistema de abastecimiento de agua potable en la rinconada de Pamplona Alta, Aplicando Epanet y Algoritmos genéticos para la localización de válvulas reductoras de presión. [Tesis de pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas] https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/626349/Carhuapoma_MJ.pdf?sequence=3
- Cvetković Vega, A., Maguiña, J. L., Soto, A., Lama-Valdivia, J., & Correa López, L. E. (2021). Cross-sectional studies. *Revista de La Facultad de Medicina Humana*, 21(1), 164–170. <https://doi.org/10.25176/rfmh.v21i1.3069>
- Díaz et al., (2018), Cooperacionsuiza.Pe. Retrieved August 14, 2025, from https://www.cooperacionsuiza.pe/wp-content/uploads/2019/06/mem_descrp1_ins_hipoclorador_goteo_carga_constante_doble_recipiente.pdf
- Digesa, (2024). Gob.pe. Retrieved August 10, 2025, from <https://www.gob.pe/institucion/minsa/noticias/1021327-cajamarca-digesa-realizo-asistencia-tecnica-sobre-control-de-calidad-en-los-sistemas-de-abastecimiento-de-agua-para-consumo-humano>
- Domínguez, L. (2021). Modelamiento de la calidad de agua potable en la red de distribución de la parroquia Chanduy mediante uso del programa WaterCad [Tesis de pregrado, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/6937/1/UPSE-TIC-2022-0003.pdf>
- García-Ávila, F., Avilés-Añazco, A., Ordoñez-Jara, J., Guanuchi-Quezada, C., Flores del Pino, L., & Ramos-Fernández, L. (2021). Modeling of residual chlorine in a drinking water network in times of pandemic of the SARS-CoV-2 (COVID-19). *Sustainable Environment Research*, 31(1). <https://doi.org/10.1186/s42834-021-00084-w>
- Guerrero, E. (2020). Estudio de calidad de agua y modelación hidráulica del sistema de distribución del circuito-5 del Cantón Jipijapa. [Tesis de pregrado, Universidad Estatal del Sur de Manbij]. <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2272/1/GUERRERO%20PAZ%20ERLYN%20PAZ.pdf>

- Gutiérrez, E. y Domínguez, A. (2023). Modelamiento de la concentración del cloro residual con Watercad en las redes de distribución de agua potable en la ciudad de Santa María de Nieva – Provincia Condorcanqui [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/6526/Elias_Tesis_Licenciatura_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Hancock, N. (2016, November 27). What is chlorination? —. Safe Drinking Water Foundation. <https://www.safewater.org/fact-sheets-1/2017/1/23/what-is-chlorination>
- Investigación correlacional. (2024, February 29). Tesis doctorales online. <https://tesisdoctoralesonline.com/investigacion-correlacional-que-es-y-como-se-realiza/>
- Lafaurie, G. I., Calderón, J. L., Zaror, C., Millán, L. V., & Castillo, D. M. (2015). Ácido Hipocloroso: una Nueva Alternativa como Agente Antimicrobiano y para la Proliferación Celular para Uso en Odontología. *International Journal of Odontostomatology*, 9(3), 475–481. <https://doi.org/10.4067/s0718-381x2015000300019>
- Llorens, D. (2023, November 30). Understanding Hypochlorous Acid: A comprehensive guide. Ecoloxtech. <https://ecoloxtech.com/blogs/news/understanding-hypochlorous-acid-a-comprehensive-guide>
- Lozada, J. (2014). Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industria. *CienciAmérica: Revista de divulgación científica de la Universidad Tecnológica Indoamérica*, 3(1), 47–50. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6163749>
- Marketing. (2020, September 2). La calidad del agua y su importancia. AGQ Labs España. <https://agqlabs.es/tienda/2020/09/02/la-calidad-del-agua-y-su-importancia/>
- Martel, E. M. F., & Hernández-Díaz, A. G. (2006). *Revista de Métodos Cuantitativos para la Economía y la Empresa*. 4, 7–34. <https://www.upo.es/revistas/index.php/RevMetCuant/issue/view/524>.

- Miranda, M., Arambulú, A., Junco, J. y Campos, M. (2010). Situación de la calidad de agua para consumo en los hogares de niños menores de 5 años en Perú 2007-2010. *Revista Perú Med. Exp. Salud Pública*. 27 (4). 506-511. <http://www.scielo.org.pe/pdf/rins/v27n4/a03v27n4.pdf>
- Mostafa, N, Matta, M y Halim, H. (2013) Simulation of chlorine decay in water distribution networks using EPANET–Case study. Simulation. Ed. Cairo University.
- Nunja, J. V., Narvasta, I., & Luna, G. M. (2013). Subproductos de la desinfección en el agua potable y sus riesgos en la salud humana. <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14067/1624/SUBPRODUCTOS%20DE%20LA%20DESINFECCION%20EN%20EL%20AGUA%20POTABLE.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=SUBPRODUCTOS%20DERIVADOS%20DE%20LA%20CLORACI%C3%93N,adem%C3%A1s%20de%20los%20precursores%20org%C3%A1nicos>.
- ONU-Hábitat y OMS, 2021. Progress on wastewater treatment – Global status and acceleration needs for SDG indicator 6.3.1. Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos (ONU-Hábitat) y Organización Mundial de la Salud (OMS), Ginebra.
- Reglamento Nacional de Edificaciones. (2022). Tratamiento de agua para consumo humano. OS.050. <https://www.gob.pe/institucion/vivienda/informes-publicaciones/2309793-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- Rojas, L. (2025, April 17). pH del cloro: cuál es, cómo funciona y por qué importa. Pomok Química | Limpieza y Mantenimiento Industrial; Pomok Química. <https://pomok.com.mx/ph-del-cloro/>
- Rossman, L, Clark, R, Grayman, W. (1994) Modelo de cloro residual en el agua de consumo humano y la red de distribución *J environment Enginner* 120 (4) 803-820. https://www.researchgate.net/publication/281347709_Modeling_Chlorine_Residuals_in_Drinking-Water_Distribution_Systems
- Rossman, L. (2001). Water Supply and Water Resources Division. Ed. EPA

- Sánchez. (2020). Modelación de cloro libre en la red de distribución de ACUALCOS S.A. que abastece los barrios de UPZ89 Localidad de Chapinero. [Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia]. <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/7931/Trabajo%20de%20Grado.pdf?sequence=4>
- Santamaría, F. (2020). Modelación del cloro libre en la red de distribución de ACULCOS S.A. que abastece los barrios de la UPZ 85: San Isidro Patios – Localidad Chapinero. [Tesis de pregrado, Universidad Piloto de Colombia]. <http://repository.unipiloto.edu.co/bitstream/handle/20.500.12277/7931/Trabajo%20de%20Grado.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Sistema de objetivos de desarrollo sostenible. (2018). Gob.Pe. Retrieved August 9, 2025, from <https://ods.inei.gob.pe/ods/objetivos-de-desarrollo-sostenible/agua-limpia-y-saneamiento>
- Suárez, E. (2024, February 9). Método inductivo y deductivo. Experto Universitario. <https://expertouniversitario.es/blog/metodo-inductivo-y-deductivo/>
- Sudheer, C. V. S. S., Ramesh, M., & Ramana, G. V. (2020). Feasible study for allocation of nodal demands through WaterGEMS. In Lecture Notes in Civil Engineering (pp. 339–352). Springer Singapore.
- Tamayo, M. (1999) El proyecto de investigación. Como aprender a investigar. Edit. ICFES. https://www.academia.edu/7012157/MARIO_TAMAYO_Y_TAMAYO
- Tuero, D. (2022). Simulación de cloro residual mediante el software Watercad en la red de distribución de la comunidad campesina de Sacsamarca, distrito de Huancavelica, 2021. [Tesis de pregrado, Universidad Continental]. <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/12129>
- Upadhyay, A. (2024, July 16). Understanding the impact of physical and chemical factors on disinfectant efficacy. Swiss Anti-Bacterial & Anti-Viral Testing Laboratory, ISO Certified | MIS. <https://microbe-investigations.com/understanding-the-impact-of-physical-and-chemical-factors-on-disinfectant-efficacy/>

Anexos

Índice de Anexos:

Anexo 1: Mapa político de Cortegana.

Anexo 2: Plano de ámbito de influencia.

Anexo 3: Plano de Curvas de nivel.

Anexo 4: Plano de captación tipo barraje – planta.

Anexo 5: Plano de línea de conducción.

Anexo 6: Plano de perfil longitudinal.

Anexo 7: Plano de válvula de aire línea de conducción.

Anexo 8: Plano arquitectónico PTAP – Filtro Lento.

Anexo 9: Plano de arquitectura de reservorio de 30 m³.

Anexo 10: Plano de estructuras reservorio 30 m³.

Anexo 11: Plano de modelamiento hidráulico.

Anexo 12: Plano de puntos de monitoreo.

Anexo 13: Plano de cámara rompe presión tipo 7.

Anexo 14: Plano de válvula de control.

Anexo 15: Plano de válvula de purga


Anexo 16: Panel fotográfico

Anexo 17: Matriz de Operacionalización de variables

Anexo 16: Panel fotográfico

Figura 15

Registro Sanitario Desinfectantes y Otros Insumos de Tratamiento de Agua para Consumo Humano


MINISTERIO DE SALUD
PERU
DIGESA
DIRECCIÓN GENERAL DE
SALUD AMBIENTAL
E INOCUIDAD ALIMENTARIA

N° RSDAI14320
EXP. N° 41172-2020-RDA
Informe N° 5770-2020/DCEA/DIGESA

REGISTRO SANITARIO
DESINFECTANTES Y OTROS INSUMOS DE TRATAMIENTO DE AGUA
PARA CONSUMO HUMANO

A. PRODUCTO
Nombre Comercial : HIPOCLORITO DE CALCIO PLUSCHLOR

B. EMPRESA COMERCIALIZADORA
Razón Social : QUIMICOS GOICOCHEA S.A.C.
R.U.C. : 20211040362

C. DIRECCIÓN
Legal : AV. CORONEL NESTOR GAMBETTA N° 150 URB. INDUSTRIAL
LA CHALACA, PROVINCIA CONSTITUCIONAL DEL CALLAO,
CALLAO

D. EMPRESA PRODUCTORA
Razón Social : SINOPEC JIANGNAN SALT CHEMICAL HUBEI CO., LTD.
País de origen : China


E. CARACTERÍSTICAS DEL PRODUCTO


		CODIGO
Origen	: Importado	I
Presentación	: Granulado	G
Principio activo	: Hipoclorito de calcio 69,0%	1
Código de producto	: DAIG114320	


F. REGISTRO
La Dirección de Certificaciones y Autorizaciones de la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria – DIGESA, autoriza la inscripción en el REGISTRO DE DESINFECTANTES Y OTROS INSUMOS DE TRATAMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO HUMANO, al producto descrito en el ítem E, bajo las siguientes condiciones:

- La empresa es responsable de que el producto cumpla con las condiciones bajo las cuales se otorga el Registro Sanitario.
- El Registro Sanitario del producto podrá ser anulado al verificarse el incumplimiento de las condiciones bajo las cuales se otorga el Registro Sanitario.
- El presente Registro Sanitario está sujeto a vigilancia por parte de la DIGESA, la cual podrá revocarla conforme a Ley.
- El Registro Sanitario tiene vigencia de cuatro (04) años a partir de la fecha de su expedición.

Lima, 21 de setiembre de 2020


L. BACA


C. BALON


MINISTERIO DE SALUD
Dirección General de Salud Ambiental
e Inocuidad Alimentaria
DIGESA

Abog. ROBERTO ALEXIS CASADO LOPEZ
DIRECTOR EJECUTIVO
Dirección de Certificaciones y Autorizaciones

PACU/LM69

Figura 16

Toma de Muestra a la salida de la planta de tratamiento



Nota: Toma en el mes de febrero.

Figura 17

Toma de muestra de cloración en una vivienda.



NOTA: Toma de muestra con el colorímetro HANNA, en el mes de febrero.

Figura 18

Toma de muestra de cloración con personal del centro de Salud Cortegana



Nota: Toma de muestra en el colegio en el mes de marzo.

Figura 19

Toma de muestra de cloración



Nota: Toma de muestra en una vivienda en el mes de marzo.

Figura 20

Toma de muestra de cloración



Nota: Toma de muestra en una vivienda en el mes de marzo.

Figura 21

Toma de muestra de cloración



Nota: Toma de muestra en una vivienda en el mes de marzo.

Figura 22

Toma de muestra de cloración



Nota: Toma de muestra en una vivienda en el mes de abril

Figura 23

Toma de muestra de cloración



Nota: Toma de muestra en una vivienda en el mes de abril

Figura 24

Con el medidor de Caudal



Figura 25

Presión con manómetro en una vivienda



Anexo 17

Matriz de operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicador	Instrumento
Modelamiento del cloro residual usando WaterCad	Es el residuo de cloro presente en el agua, después que el cloro reaccione en contacto con el agua durante la desinfección (Rossman, 2001, p. 32)	Es el componente químico más utilizado para la desinfección del agua para consumo humano.	Coeficiente de reacción en las paredes de las tuberías (Kw)	kw	WaterCAD
			Cloro	mg/L	
			Presión	Mca	
Red de distribución sistema de agua potable de la Ciudad de Cortegana, Celendín.	Es el conjunto de instalaciones que permiten el transporte de agua desde la captación hasta el suministro final cumpliendo con las condiciones de cantidad, calidad, continuidad (Moliá, 1987, p. 3)	Es la red conformada por el conjunto de tuberías que abastecen el agua en condiciones de calidad y cantidad a las viviendas.	Periodo dinámico	Relación concentración – Tiempo $K1/C^n$	(Colorímetro, manómetro, y velocidades de reacción en el modelado)
			Caudal de consumo	l/h	