

Variación de cloro residual libre en la red de agua potable de Santa Ana, Huancavelica

Variation of Free Residual Chlorine in the Drinking Water Distribution Network of Santa Ana, Huancavelica

Elvis Estrada Palacios 
Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

Ederzon Taipe Crispin 
Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

César Castañeda Campos 
Universidad Nacional de Huancavelica, Perú

<https://doi.org/10.54556/gnosiswisdom.v6i1.107>
Fecha de publicación: 2026-04-27
Fecha de envío: 2026-02-11

Resumen

El cloro residual libre es un indicador fundamental de la calidad sanitaria del agua potable, debido a que garantiza la persistencia del proceso de desinfección durante su distribución y contribuye a la protección de la salud pública. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar la variación del cloro residual libre en la red de agua potable del barrio de Santa Ana, Huancavelica. La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo y nivel explicativo. La población estuvo conformada por la red de distribución de agua potable, considerando una muestra de 180 viviendas abastecidas por las captaciones Millpo e Ichu. La concentración de cloro residual libre fue determinada mediante mediciones directas realizadas con un colorímetro digital en diferentes puntos de monitoreo distribuidos desde los reservorios hasta los sectores más alejados de la red. Los resultados evidenciaron una disminución progresiva de la concentración de cloro residual libre conforme aumentaba la distancia respecto a los reservorios. En la captación Millpo, la concentración promedio disminuyó de 1.78 mg/L a 1.09 mg/L, mientras que en la captación Ichu descendió de 1.96 mg/L a 1.51 mg/L. El análisis estadístico mostró diferencias significativas entre los puntos evaluados ($p < 0.05$). Se concluye que existe una variación significativa del cloro residual libre a lo largo de la red de distribución y que las concentraciones registradas superan los valores recomendados para el consumo humano, lo que evidencia la necesidad de optimizar la dosificación y el control operativo del sistema de abastecimiento de agua potable.

Palabras clave: cloro residual libre; abastecimiento de agua; calidad del agua; desinfección del agua; salud pública.

Abstract

Free residual chlorine is a fundamental indicator of the sanitary quality of drinking water because it ensures the persistence of the disinfection process throughout distribution and contributes to the protection of public health. In this context, the aim of this study was to evaluate the variation of free residual chlorine in the drinking water network of the Santa Ana neighborhood, Huancavelica. The research was applied in nature, with a quantitative approach and an explanatory level. The study population consisted of the drinking water distribution network, considering a sample of 180 households supplied by the Millpo and Ichu water sources. Free residual chlorine concentration was determined through direct measurements using a digital colorimeter at different monitoring points distributed from the reservoirs to the farthest sectors of the network. The results showed a progressive decrease in free residual chlorine concentration as the distance from the reservoirs increased. In the Millpo supply system, the average concentration decreased from 1.78 mg/L to 1.09 mg/L, whereas in the Ichu supply system it decreased from 1.96 mg/L to 1.51 mg/L. Statistical analysis revealed significant differences among the evaluated monitoring points ($p < 0.05$). It was concluded that there is a significant variation in free residual chlorine throughout the distribution network and that the recorded concentrations exceed the recommended values for human consumption, highlighting the need to optimize chlorine dosing and operational control within the drinking water supply system.

Keywords: free residual chlorine; water supply; water quality; water disinfection; public health.

Introducción

El acceso a agua potable segura constituye uno de los principales desafíos para la salud pública a nivel mundial. La Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que la desinfección mediante cloración es una de las estrategias más efectivas para prevenir enfermedades de origen hídrico, debido a que permite eliminar microorganismos patógenos y mantener una protección residual durante la distribución del agua hasta el punto de consumo (World Health Organization [WHO], 2022). En este contexto, el cloro residual libre es un indicador fundamental para evaluar la calidad sanitaria del agua distribuida por los sistemas de abastecimiento.

La concentración de cloro residual libre en las redes de distribución puede variar debido a factores físicos, químicos e hidráulicos, tales como la longitud de las tuberías, el tiempo de permanencia del agua, la temperatura, la presencia de materia orgánica y las características propias de la infraestructura del sistema (Rossman, 2000). Estas variaciones pueden generar concentraciones inferiores a las recomendadas, incrementando el riesgo de contaminación microbiológica, o concentraciones excesivas que ocasionan alteraciones organolépticas y rechazo por parte de

los consumidores (WHO, 2022). Diversas investigaciones han reportado la existencia de cambios significativos en la concentración de cloro residual durante el transporte del agua potable. En Ecuador, García (2019) determinó que el cloro residual presenta procesos de decaimiento a lo largo de la red de distribución, influenciados por las reacciones del desinfectante con el agua y las paredes de las tuberías. De manera similar, Rivera (2019) identificó pérdidas de cloro residual en los puntos más alejados de la red de abastecimiento de una institución de educación superior en Colombia, atribuidas al mayor tiempo de permanencia del agua en el sistema. En el ámbito nacional, Rodríguez (2018) reportó concentraciones de cloro residual variables en la red de distribución de agua potable de la ciudad de Rioja, evidenciando la necesidad de un monitoreo permanente para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad del agua.

En el departamento de Huancavelica, las condiciones topográficas, la antigüedad de algunos componentes de los sistemas de abastecimiento y las características operativas de las redes de distribución pueden influir en el comportamiento del cloro residual libre. En el barrio de Santa Ana, abastecido por la Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento (EPS) EMAPA Huancavelica S.A.,

resulta necesario conocer la variación espacial del desinfectante desde los reservorios hasta los puntos más alejados de la red, debido a que esta información permite evaluar la eficiencia del proceso de cloración y verificar el cumplimiento de la normativa sanitaria vigente.

Por lo expuesto, el objetivo de la presente investigación fue evaluar la variación del cloro residual libre en la red de distribución de agua potable del barrio de Santa Ana, Huancavelica. La importancia del estudio radica en que sus resultados contribuyen al conocimiento del comportamiento del cloro residual en sistemas de abastecimiento urbano, proporcionando información técnica para optimizar los procesos de desinfección, fortalecer la gestión de la calidad del agua potable y proteger la salud de la población usuaria.

Materiales y métodos

Localización del estudio

La investigación se desarrolló en el barrio de Santa Ana, ubicado en el distrito, provincia y departamento de Huancavelica, Perú. El área de estudio forma parte del sistema de abastecimiento de agua potable administrado por la Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento (EPS) EMAPA Huancavelica S.A. La red de distribución evaluada recibe agua proveniente de las captaciones Millpo e Ichu, las cuales abastecen a las viviendas del sector mediante reservorios y redes de distribución domiciliaria.

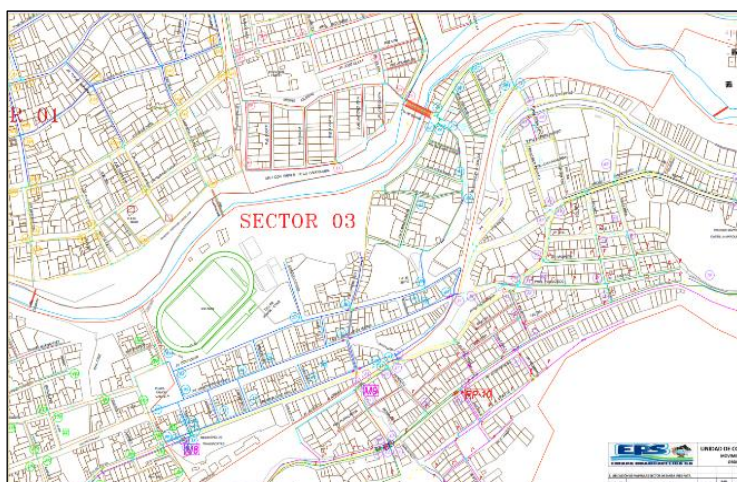


Figura 1. Plano catastral del barrio de Santa Ana

Metodología

La investigación fue de tipo básica, con enfoque cuantitativo y nivel descriptivo, debido a que estuvo orientada a generar conocimiento sobre la variación del cloro residual libre en la red de distribución de agua potable del barrio de Santa Ana, Huancavelica. Los estudios descriptivos buscan especificar las características y propiedades de un fenómeno mediante su observación y medición sistemática, permitiendo conocer su comportamiento en un contexto determinado (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

El estudio se desarrolló bajo un diseño no experimental y de corte transversal, observándose el

comportamiento del cloro residual libre sin manipulación de las variables de estudio. Las mediciones se realizaron mediante monitoreo directo en reservorios y conexiones domiciliarias abastecidas por las captaciones Millpo e Ichu, siguiendo los procedimientos establecidos en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano del Perú (Ministerio de Salud, 2011), garantizando la confiabilidad de los datos obtenidos.

Universo y muestra

El universo de estudio estuvo conformado por la red de distribución de agua potable del barrio de Santa Ana, Huancavelica. La muestra estuvo constituida por 14 puntos de monitoreo distribuidos

estratégicamente a lo largo de la red de abastecimiento, considerando reservorios y conexiones domiciliarias representativas de las captaciones Millpo e Ichu.

Para la evaluación del cloro residual libre se realizaron 17 campañas de monitoreo en cada punto de muestreo. La recolección de datos se efectuó a intervalos regulares de 10 días, permitiendo analizar la variación temporal y espacial del cloro residual libre en la red de distribución de agua potable durante el periodo de estudio.

El método de muestreo fue no probabilístico por conveniencia, considerando criterios técnicos relacionados con la ubicación de las viviendas, accesibilidad y representatividad hidráulica dentro de la red de distribución.

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión

- Viviendas conectadas formalmente a la red de distribución de agua potable de la EPS EMAPA Huancavelica S.A.
- Viviendas ubicadas dentro del área de influencia del barrio de Santa Ana.
- Puntos de monitoreo localizados desde la salida de los reservorios hasta los extremos de la red de distribución.
- Viviendas con acceso disponible para la toma de muestras durante el periodo de monitoreo.

Criterios de exclusión

- Viviendas que no contaban con conexión activa al sistema de abastecimiento.
- Conexiones clandestinas o no registradas por la EPS.
- Viviendas que impidieron el acceso para la toma de muestras.
- Puntos de monitoreo que presentaron interferencias operativas o limitaciones para la medición.

Variables de estudio

Variable principal

Cloro residual libre (mg/L)

Indicador utilizado para determinar la concentración de cloro disponible en la red de distribución de agua potable.

Procedimiento de recolección de datos

La medición del cloro residual libre se realizó directamente en campo mediante un colorímetro digital, siguiendo los procedimientos establecidos por el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (D.S. N.º 031-2010-SA) y los protocolos de monitoreo de calidad de agua vigentes.

Las muestras fueron tomadas en los reservorios y en diferentes puntos de la red de distribución, considerando sectores iniciales, intermedios y finales del sistema de abastecimiento. Posteriormente, los valores registrados fueron organizados en matrices de datos para su procesamiento estadístico.

Procedimientos estadísticos

La información recopilada fue procesada mediante estadística descriptiva e inferencial.

Para el análisis descriptivo se determinaron medidas de tendencia central y dispersión, incluyendo promedio, valor mínimo, valor máximo y desviación estándar de las concentraciones de cloro residual libre.

La normalidad de los datos fue evaluada mediante la prueba de Shapiro-Wilk con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Posteriormente, para determinar la existencia de diferencias significativas en la concentración de cloro residual libre entre los diferentes puntos de monitoreo de la red de distribución, se aplicó la prueba t de Student, considerando un nivel de confianza del 95 % y un valor de significancia de $p < 0,05$.

Los análisis estadísticos fueron realizados utilizando el software IBM SPSS Statistics.

Equipos y materiales empleados

Equipos especializados

Colorímetro digital HACH para la determinación de cloro residual libre.

Computadora portátil para procesamiento y análisis de datos.

Sistema de posicionamiento global (GPS) para ubicación de puntos de monitoreo.

Materiales de campo

Frascos para toma de muestras.

Reactivos para determinación de cloro residual libre.

Fichas de registro de datos.

Etiquetas de identificación de muestras.

Herramientas de gabinete

- Microsoft Excel para organización de bases de datos.
- IBM SPSS Statistics para análisis estadístico.
- Microsoft Word para elaboración del informe técnico y artículo científico.

Resultados

La evaluación del cloro residual libre en la red de distribución de agua potable del barrio de Santa Ana se realizó mediante el monitoreo de 14 puntos estratégicamente distribuidos en las redes abastecidas por las captaciones Millpo e Ichu. Se efectuaron 17 campañas de monitoreo con una frecuencia de 10 días, comprendiendo mediciones en reservorios, sectores iniciales y sectores finales de distribución. En total, se registraron 238 observaciones para cada punto de monitoreo, lo que permitió caracterizar el comportamiento espacial y temporal del cloro residual libre a lo largo del sistema de abastecimiento. Los resultados descriptivos presentan las concentraciones de cloro residual libre obtenidas durante los monitoreos y su comparación con los límites establecidos por el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano del Perú (0,5–1,0 mg/L). Asimismo, se exponen los resultados de las pruebas de normalidad y de las pruebas t de Student para muestras emparejadas, aplicadas con un nivel de confianza del 95 % y una significancia de 0,05, con la finalidad de determinar si existieron diferencias significativas entre las concentraciones registradas al inicio y al final de las redes de distribución abastecidas por las captaciones Millpo e Ichu.

Tabla 1

Concentración de cloro residual libre en la red abastecida por Millpo

Monitoreo (cada 10 días)	Reservorio (mg/L)	Inicio de red (mg/L)	Final de red (mg/L)	Límite mínimo (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
M1	1.84	1.810	1.120	0.50	1.00
M2	1.59	1.525	1.110	0.50	1.00
M3	1.65	1.600	1.045	0.50	1.00
M4	1.96	1.730	1.243	0.50	1.00
M5	1.69	1.660	1.060	0.50	1.00
M6	1.89	1.780	1.110	0.50	1.00
M7	1.72	1.770	1.258	0.50	1.00
M8	2.05	1.745	1.025	0.50	1.00
M9	1.51	1.490	0.995	0.50	1.00
M10	1.60	1.545	1.005	0.50	1.00
M11	1.80	1.725	1.208	0.50	1.00
M12	1.79	1.715	0.870	0.50	1.00
M13	2.15	1.575	1.063	0.50	1.00

M14	1.90	1.640	1.120	0.50	1.00
M15	1.64	1.585	0.968	0.50	1.00
M16	1.77	1.620	1.198	0.50	1.00
M17	1.75	1.740	1.175	0.50	1.00

Nota. Concentraciones expresadas en mg/L. M1–M17 corresponden a monitoreos realizados cada 10 días. Rango normativo: 0,5–1,0 mg/L.

De acuerdo con la Tabla 1, las concentraciones de cloro residual libre registradas en la red de distribución abastecida por la captación Millpo evidenciaron una disminución progresiva desde el reservorio hacia el sector final de la red. En el reservorio, las concentraciones oscilaron entre 1,51 y 2,15 mg/L, mientras que en el inicio de la red variaron entre 1,49 y 1,81 mg/L. Por su parte, en el sector final se registraron valores comprendidos entre 0,87 y 1,26 mg/L. Estos resultados demuestran el consumo gradual del desinfectante a medida que el agua recorre la red de distribución, fenómeno asociado al tiempo de permanencia del agua, la demanda de cloro y las reacciones químicas que ocurren en el sistema. Al contrastar los resultados con los límites establecidos por el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (0,5–1,0 mg/L), se observa que todas las concentraciones registradas en el reservorio y en el inicio de la red superaron el límite máximo permisible de 1,0 mg/L. Asimismo, en el sector final de la red la mayoría de los monitoreos presentaron valores superiores al límite máximo establecido, alcanzándose una concentración máxima de 1,26 mg/L durante el monitoreo M7. Estos resultados sugieren una

sobredosificación inicial del desinfectante en el sistema de abastecimiento, situación que, si bien contribuye a garantizar la protección microbiológica del agua, podría generar alteraciones en las características organolépticas, tales como olor y sabor perceptibles al cloro por parte de los consumidores. Por otro lado, la concentración mínima registrada en el sector final fue de 0,87 mg/L durante el monitoreo M12. Aunque este valor representa una reducción significativa respecto a las concentraciones observadas en el reservorio, se mantuvo por encima del límite mínimo exigido por la normativa (0,5 mg/L), lo que indica que durante todo el periodo de evaluación se conservó un nivel residual de desinfectante capaz de proporcionar protección sanitaria frente a una posible contaminación microbiológica dentro de la red de distribución. En consecuencia, los resultados evidencian una disminución del cloro residual libre a lo largo de la red abastecida por la captación Millpo; sin embargo, las concentraciones registradas permanecieron mayoritariamente por encima del rango óptimo establecido por la normativa nacional.

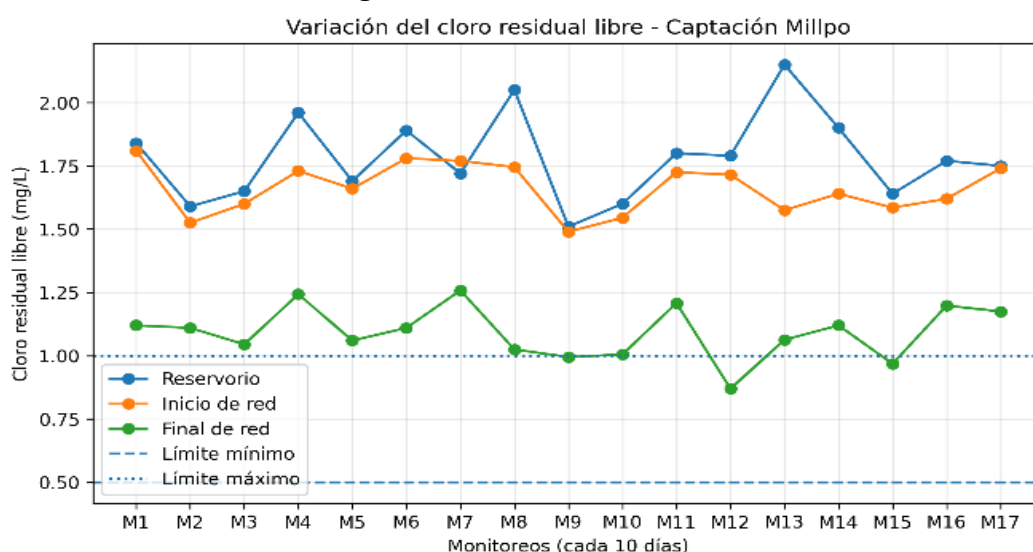


Figura 2. Cloro residual libre en la red abastecida por Millpo.

La tendencia descrita puede apreciarse con mayor claridad en la Figura 2, donde se observa que las concentraciones de cloro residual libre disminuyen desde el reservorio hacia el sector final de la red en los 17 monitoreos realizados. La representación gráfica muestra que, a pesar de la reducción progresiva del desinfectante durante su recorrido por la red, las concentraciones registradas se

mantuvieron generalmente por encima del límite máximo normativo de 1,0 mg/L, confirmando un comportamiento consistente de sobredosificación y una pérdida gradual de cloro residual libre conforme aumenta la distancia desde el punto de almacenamiento hasta los puntos finales de distribución.

Tabla 2

Concentración de cloro residual libre en la red abastecida por Ichu

Monitoreo (cada 10 días)	Reservorio (mg/L)	Inicio de red (mg/L)	Final de red (mg/L)	Límite mínimo (mg/L)	Límite máximo (mg/L)
M1	1.95	1.890	1.407	0.50	1.00
M2	2.12	1.785	1.732	0.50	1.00
M3	1.92	1.805	1.603	0.50	1.00
M4	2.18	1.915	1.594	0.50	1.00
M5	2.15	1.985	1.420	0.50	1.00
M6	1.73	1.675	1.466	0.50	1.00
M7	1.85	1.755	1.526	0.50	1.00
M8	1.82	1.850	1.447	0.50	1.00
M9	2.02	1.810	1.486	0.50	1.00
M10	2.07	1.980	1.431	0.50	1.00
M11	2.05	1.855	1.452	0.50	1.00
M12	2.04	1.925	1.572	0.50	1.00
M13	2.19	1.880	1.649	0.50	1.00
M14	2.02	1.720	1.551	0.50	1.00
M15	1.81	1.740	1.476	0.50	1.00
M16	1.80	1.710	1.454	0.50	1.00
M17	1.65	1.645	1.429	0.50	1.00

Nota. Concentraciones expresadas en mg/L. M1–M17 corresponden a monitoreos realizados cada 10 días. Rango normativo: 0,5–1,0 mg/L.

Como se observa en la Tabla 2, el monitoreo del cloro residual libre realizado cada diez días en el sistema de abastecimiento de agua potable evidencia que las concentraciones registradas en el reservorio, el inicio de la red y el final de la red se mantuvieron por encima del límite máximo establecido por la normativa sanitaria vigente durante todo el período de evaluación.

En el reservorio, las concentraciones de cloro residual oscilaron entre 1.65 mg/L y 2.19 mg/L, registrándose el valor mínimo en el monitoreo M17 (1.65 mg/L) y el máximo en M13 (2.19 mg/L). Estos

resultados demuestran que la dosificación de cloro en la fuente de almacenamiento fue constante; sin embargo, todas las mediciones superaron el límite máximo de 1.00 mg/L, excediendo entre 65 % y 119 % el valor máximo permitido para agua destinada al consumo humano.

En el inicio de la red de distribución, las concentraciones variaron entre 1.645 mg/L y 1.985 mg/L. El menor valor se registró en el monitoreo M17 (1.645 mg/L), mientras que el mayor correspondió al monitoreo M5 (1.985 mg/L). Aunque se observa una ligera disminución respecto

al reservorio, todos los resultados permanecieron por encima del límite máximo permisible, evidenciando que el agua ingresó a la red con una concentración de cloro residual superior a la recomendada.

Respecto al final de la red de distribución, las concentraciones fluctuaron entre 1.407 mg/L y 1.732 mg/L, siendo el valor mínimo registrado en M1 (1.407 mg/L) y el máximo en M2 (1.732 mg/L). En comparación con el reservorio y el inicio de la red, se aprecia una disminución gradual del cloro residual, atribuible al consumo del desinfectante durante el recorrido del agua por la red de distribución debido a procesos de oxidación, demanda de materia orgánica y tiempo de permanencia. No obstante, incluso el menor valor obtenido (1.407 mg/L) supera el límite máximo establecido por la normativa.

De acuerdo con el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano del Perú (D.S. N.º 031-2010-SA y sus modificatorias), la concentración de cloro residual libre en la red de distribución debe mantenerse dentro del intervalo de 0.50 a 1.00 mg/L para garantizar la desinfección microbiológica sin afectar las características organolépticas del agua. Bajo este criterio, ninguno de los diecisiete monitoreos cumplió con el límite máximo de 1.00 mg/L, aunque todos superaron ampliamente el límite mínimo de 0.50 mg/L, lo que indica que existe una adecuada capacidad desinfectante, pero una sobredosificación del cloro durante todo el período de evaluación. Esta condición puede ocasionar alteraciones en el sabor y olor del agua, además de favorecer la formación de subproductos de la desinfección cuando existen precursores orgánicos.

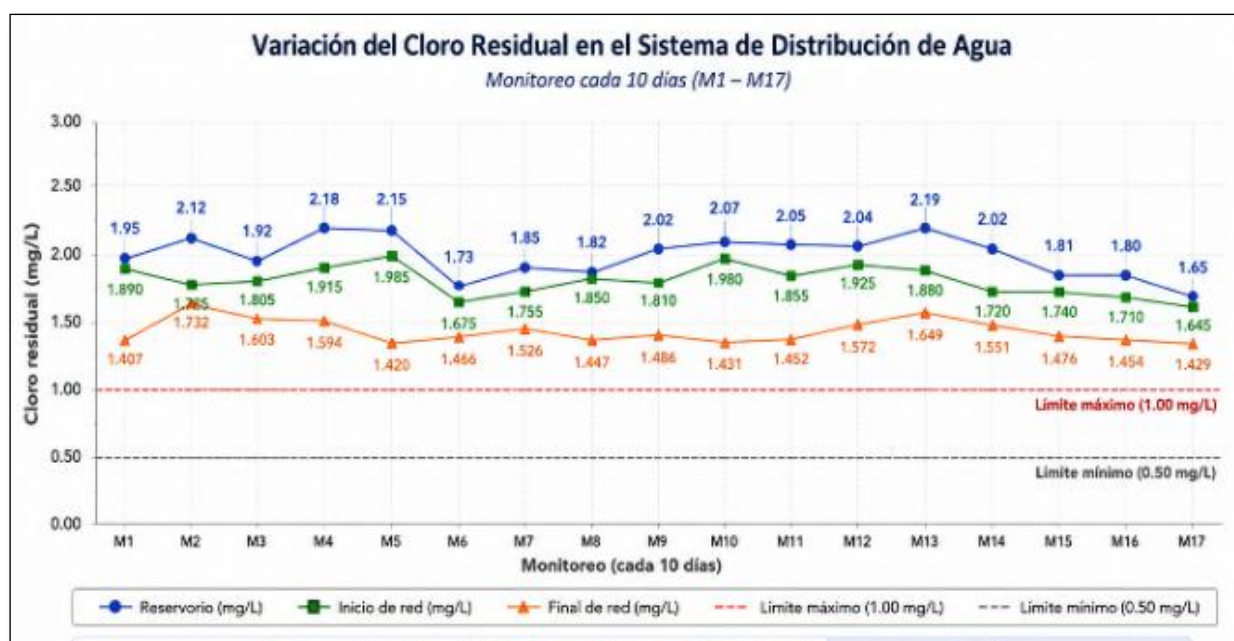


Figura 3. Cloro residual libre en la red abastecida por Millpo.

La Figura 1 muestra la variación temporal de las concentraciones de cloro residual libre en el reservorio, el inicio y el final de la red de distribución durante los diecisiete monitoreos realizados. Se observa una tendencia consistente en la que el reservorio presenta las mayores concentraciones, seguido del inicio de la red y finalmente el extremo de la red, evidenciando la disminución progresiva del cloro residual a medida que el agua se desplaza por el sistema de

distribución. Asimismo, las tres curvas permanecen permanentemente por encima de la línea correspondiente al límite máximo de 1.00 mg/L, mientras que ninguna medición se aproxima al límite mínimo de 0.50 mg/L. Aunque la reducción observada entre los diferentes puntos de monitoreo refleja el comportamiento normal del cloro residual debido a su consumo durante el transporte del agua, los resultados indican que la dosificación inicial es superior a la requerida por la normativa sanitaria. En

consecuencia, la figura confirma visualmente los resultados presentados en la Tabla 2, evidenciando un sistema de desinfección eficiente desde el punto de vista microbiológico, pero con una concentración de cloro residual libre que excede los valores recomendados para agua destinada al consumo humano, por lo que sería necesario optimizar el proceso de cloración para ajustarlo a los límites establecidos por la legislación peruana.

Prueba de hipótesis

Con el fin de evaluar si el cloro residual libre presenta una disminución significativa durante su

Tabla 3

Resultados de la prueba de normalidad (Shapiro-Wilk) del cloro residual libre

Captación	Variable evaluada	Estadístico W	gl	p-valor	Interpretación
Millpo	Inicio de la red	0.949	17	0.444	Distribución normal
Millpo	Final de la red	0.976	17	0.908	Distribución normal
Ichu	Inicio de la red	0.971	17	0.831	Distribución normal
Ichu	Final de la red	0.897	17	0.062	Distribución normal

Nota. Resultados obtenidos mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Se consideró una distribución normal cuando $p > 0.05$.

Confirmado el supuesto de normalidad, se aplicó la prueba t de Student para muestras emparejadas para comparar las concentraciones de cloro residual libre entre el inicio y el final de la red de distribución en ambas captaciones.

La evaluación de la normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk indicó que los datos correspondientes a las concentraciones de cloro residual libre siguieron una distribución normal en las captaciones Millpo e Ichu, debido a que los

recorrido por la red de distribución de agua potable de las captaciones Millpo e Ichu, inicialmente se comprobó el cumplimiento del supuesto de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Los resultados mostraron valores de significancia superiores a 0.05 en todos los casos, indicando que los datos seguían una distribución normal. En consecuencia, se utilizó la prueba t de Student para muestras emparejadas como método de análisis inferencial, considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ y un nivel de confianza del 95 %.

valores de significancia fueron superiores al nivel crítico de 0.05. En la captación Millpo se obtuvieron valores de $p = 0.444$ para el inicio de la red y $p = 0.908$ para el final de la red; mientras que en la captación Ichu los valores fueron $p = 0.831$ y $p = 0.062$, respectivamente. En consecuencia, se verificó el cumplimiento del supuesto de normalidad, lo que permitió emplear una prueba paramétrica, específicamente la t de Student para muestras emparejadas, considerando un nivel de confianza del 95 % ($\alpha = 0.05$).

Tabla 4

Prueba t de Student para muestras apareadas

Captación	Comparación	Diferencia media (mg/L)	t	gl	p-valor	Decisión
Millpo	Inicio vs. final de la red	0.570	21.147	16	<0.001	Se rechaza H_0
Ichu	Inicio vs. final de la red	0.308	9.174	16	<0.001	Se rechaza H_0

Nota. Nivel de significancia $\alpha = 0.05$. La hipótesis nula (H_0) establece que el cloro residual libre no disminuye entre el inicio y el final de la red de distribución.

El análisis mediante la prueba t de Student para muestras emparejadas confirmó la existencia de diferencias significativas entre las concentraciones de cloro residual libre registradas al inicio y al final de la red de distribución en las captaciones evaluadas. En la captación Millpo se estimó una diferencia promedio de 0.570 mg/L ($t = 21.147$; $gl = 16$; $p < 0.001$), mientras que en la captación Ichu la diferencia promedio fue de 0.308 mg/L ($t = 9.174$; $gl = 16$; $p < 0.001$). Dado que en ambos casos el valor de p fue inferior al nivel de significancia establecido ($\alpha = 0.05$), se descartó la hipótesis nula y se respaldó la hipótesis alternativa, demostrando con un 95 % de confianza que el cloro residual libre experimenta una disminución significativa a medida que el agua avanza por la red de distribución administrada por la EPS EMAPA S.A. en las captaciones Millpo e Ichu.

Discusión

Los resultados obtenidos evidenciaron que la concentración de cloro residual libre disminuyó progresivamente desde el reservorio hasta el final de la red de distribución; sin embargo, durante los diecisiete monitoreos las concentraciones permanecieron por encima del límite máximo de 1.00 mg/L establecido por la normativa peruana para agua destinada al consumo humano. En el reservorio se registraron concentraciones entre 1.65 y 2.19 mg/L, en el inicio de la red entre 1.645 y 1.985 mg/L y en el extremo final entre 1.407 y 1.732 mg/L. Asimismo, la prueba t de Student confirmó que la reducción del cloro residual fue estadísticamente significativa (Millpo: $t = 21.147$; $p < 0.001$; Ichu: $t = 9.174$; $p < 0.001$), demostrando que el consumo del desinfectante ocurre durante el recorrido del agua por la red de distribución.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Kwio-Tamale y Onyutha (2024), quienes demostraron que la disminución del cloro residual en las redes de distribución está influenciada principalmente por la concentración inicial de cloro, la conductividad eléctrica y la distancia recorrida por el agua, variables que explicaron el 62 % de la variación del decaimiento del desinfectante. De manera similar, Wang et al. (2023) concluyeron que

la pérdida del cloro residual responde a procesos de reacción química y al tiempo de permanencia del agua dentro de la red de distribución, por lo que es esperado observar una reducción progresiva entre el punto de salida de la planta y los puntos de consumo. Estos antecedentes respaldan el comportamiento observado en la presente investigación, donde las concentraciones disminuyeron conforme aumentó la distancia desde el reservorio, aunque sin descender por debajo del límite normativo.

En el contexto peruano, Paredes-Fuentes y Villanueva-Salas (2017) reportaron que las concentraciones de cloro residual libre en la ciudad de Arequipa permanecieron dentro de los rangos establecidos por la Dirección General de Salud Ambiental y la Organización Mundial de la Salud, concluyendo que el sistema de desinfección mantenía un equilibrio adecuado entre protección microbiológica y aceptación organoléptica del agua. En contraste, el presente estudio encontró concentraciones superiores al valor máximo permitido durante todo el periodo de monitoreo, lo que evidencia una sobredosificación del desinfectante en el sistema evaluado. Asimismo, Bendezu-Quispe et al. (2018) señalaron que diversos sectores de Lima Metropolitana presentaban concentraciones insuficientes de cloro residual, incrementando el riesgo de contaminación microbiológica. Estas diferencias ponen de manifiesto que la gestión del cloro residual constituye un desafío operativo, ya que tanto las concentraciones deficientes como las excesivas pueden afectar la calidad del agua destinada al consumo humano.

Desde el punto de vista operativo, los resultados sugieren que la dosificación inicial aplicada por el sistema de abastecimiento garantiza la persistencia del desinfectante hasta el extremo de la red, reduciendo el riesgo de contaminación microbiológica secundaria; sin embargo, las concentraciones registradas superan el límite máximo recomendado por la normativa nacional, situación que puede favorecer la formación de subproductos de la desinfección, además de generar alteraciones en el sabor y olor del agua cuando

existen precursores orgánicos. En este sentido, Islam et al. (2013) sostienen que la optimización de la cloración debe buscar un equilibrio entre la seguridad microbiológica y la minimización de riesgos químicos asociados a una sobredosificación del cloro residual.

El principal aporte de esta investigación radica en proporcionar evidencia experimental sobre el comportamiento espacial del cloro residual libre en una red de distribución de agua potable de la ciudad de Huancavelica, información inexistente para esta zona altoandina del Perú. Los resultados constituyen una base técnica para optimizar la dosificación de cloro, implementar programas de monitoreo continuo y mejorar la gestión operacional de los sistemas de abastecimiento administrados por la EPS EMAPA S.A. Como limitación del estudio, únicamente se evaluó la variación temporal del cloro residual libre, sin considerar variables hidráulicas y fisicoquímicas como el tiempo de residencia, caudal, temperatura, demanda de cloro o carbono orgánico, factores reconocidos como determinantes en el decaimiento del desinfectante. Se recomienda que futuras investigaciones integren estos parámetros mediante modelos predictivos para optimizar la desinfección y garantizar el cumplimiento permanente de los estándares de calidad del agua.

Conclusiones

La presente investigación demostró que el cloro residual libre experimenta una disminución significativa durante su recorrido por la red de distribución de agua potable del barrio de Santa Ana, Huancavelica, comportamiento corroborado mediante la prueba t de Student ($p < 0.001$) para las captaciones Millpo e Ichu. Aunque las concentraciones disminuyeron progresivamente desde el reservorio hasta el extremo de la red, todas las mediciones permanecieron por encima del límite máximo establecido por la normativa peruana para agua destinada al consumo humano, evidenciando una persistencia adecuada del desinfectante, pero también una sobredosificación que pone de manifiesto la necesidad de optimizar el proceso de

cloración para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad del agua.

Este estudio aporta evidencia científica sobre la dinámica espacial del cloro residual libre en una red de distribución de agua potable ubicada en una ciudad altoandina, contribuyendo al conocimiento del comportamiento del desinfectante bajo condiciones reales de operación. Los resultados constituyen un referente para la evaluación y optimización de los sistemas de desinfección en redes de distribución con características similares y proporcionan una base para futuras investigaciones orientadas a integrar variables hidráulicas, fisicoquímicas y microbiológicas que permitan comprender de manera integral los procesos que condicionan la permanencia y el decaimiento del cloro residual en sistemas de abastecimiento de agua potable.

Conflicto de intereses

Los autores manifiestan que no mantienen conflictos de intereses de carácter personal, académico, financiero o institucional que puedan influir en el contenido, los resultados o la publicación del presente artículo científico.

Referencias

- Bendezu-Quispe, G., Whuking-Zea, C., Medina-Molina, P., Maruy-Yumi, A., & Namuche-Marín, B. (2018). Inadequate free residual chlorine concentrations in water of homes in Lima Metropolitana, 2016. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2), 347–348. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3648>
- García, J. (2019). *Modelo de decaimiento de cloro libre en la red de distribución de agua potable en la ciudad de Azogues, Ecuador* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca].
- Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill Education.

- Islam, N., Sadiq, R., & Rodriguez, M. J. (2013). Optimizing booster chlorination in water distribution networks: A water quality index approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185, 8035–8045. <https://doi.org/10.1007/s10661-013-3153-z>
- Kwio-Tamale, J. C., & Onyutha, C. (2024). Influence of physical and water quality parameters on residual chlorine decay in water distribution network. *Heliyon*, 10(10), e30892. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30892>
- Ministerio de Salud. (2011). *Reglamento de la calidad del agua para consumo humano: Decreto Supremo N.º 031-2010-SA*. Dirección General de Salud Ambiental.
- Paredes-Fuentes, J., & Villanueva-Salas, J. A. (2017). Preliminary assessment of residual chlorine (Cl₂) levels and contamination by chloramines in drinking water, Arequipa city. *Veritas*, 16(1). <https://doi.org/10.35286/veritas.v16i1.95>
- Rivera, D. (2019). *Niveles de cloro residual libre en la red de distribución de agua potable en una institución de educación superior en la ciudad de Cali en el año 2019* [Tesis de pregrado, Universidad del Valle].
- Rodríguez, J. (2018). *Modelamiento de cloro residual con WaterCAD en las redes de distribución de agua potable de la ciudad de Rioja para determinar la calidad microbiológica* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Martín].
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2: User's manual*. United States Environmental Protection Agency.
- Wang, H., Wang, B., Peng, Y., Crittenden, J. C., Pan, H., & Wang, L. (2023). Improved VRC-3R– model for bulk water residual chlorine decay in the UV/Cl₂ process for a water distribution network. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 9, 308–330. <https://doi.org/10.1039/D2EW00647B>
- World Health Organization. (2022). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the second addendum*. World Health Organization.