

Vigilancia microbiológica y determinantes fisicoquímicos del agua para consumo humano en Agustín Codazzi (Cesar, Colombia), 2020–2024

Microbiological surveillance and physicochemical determinants of drinking water in Agustín Codazzi (Cesar, Colombia), 2020–2024

Mavis Caballero Vega¹, Andrea Pacheco Doria², Pedro José Fragozo Castilla³

Resumen

Introducción. La contaminación microbiológica del agua para consumo humano continúa siendo un determinante clave de la Enfermedad Diarreica Aguda (EDA), especialmente en regiones donde los sistemas de distribución presentan vulnerabilidades operativas e infraestructurales. **Objetivo.** Evaluar la asociación entre indicadores microbiológicos y variables fisicoquímicas relacionadas con el proceso de desinfección durante la vigilancia del agua para consumo humano en el municipio de Agustín Codazzi (Cesar, Colombia), entre 2020 y 2024. **Materiales y métodos.** Se realizó un estudio descriptivo longitudinal utilizando registros oficiales de calidad del agua suministrados por la Empresa de Servicios Públicos EMCODAZZI. El análisis descriptivo incluyó 148 registros correspondientes al periodo 2020–2024. Los análisis inferenciales se efectuaron sobre un subconjunto de 48 muestras con información microbiológica y fisicoquímica completa y simultánea. Se analizaron *Escherichia coli* y coliformes totales (UFC/100 mL), así como cloro residual, turbidez, pH y color. Se aplicó la correlación de Spearman a los indicadores microbiológicos transformados a escala \log_{10} , utilizando el software R versión 4.3. **Resultados.** Se observó un incremento progresivo de *E. coli* y coliformes totales a lo largo del periodo de estudio, especialmente a partir de 2022, en paralelo con el aumento de la turbidez y la disminución del cloro residual en la red de distribución. La turbidez presentó una correlación positiva moderada con los coliformes totales ($\rho = 0.337$; $p = 0.0191$), mientras que las asociaciones

1 Semillero de Investigación Parasitología Agroecología Milenio, Programa de Microbiología, Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9482-9242>

2 Semillero de Investigación Parasitología Agroecología Milenio, Programa de Microbiología, Facultad de Ciencias Básicas. Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2742-070X>

3 Grupo de investigación Parasitología y Agroecología Milenio, Programa de Microbiología, Facultad de ciencias básicas. Universidad Popular del Cesar, Valledupar - Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3437-8664>

Correspondencia: pedrofragozo@unicesar.edu.co

entre *E. coli* y las variables fisicoquímicas evaluadas no fueron estadísticamente significativas. **Conclusiones.** El cloro residual y la turbidez se identificaron como determinantes operacionales relevantes de la calidad microbiológica del agua durante el periodo analizado. Los resultados resaltan la necesidad de fortalecer el control operacional, optimizar los procesos de desinfección y reforzar la vigilancia en la red de distribución para reducir el riesgo sanitario asociado al consumo de agua potable.

Palabras clave: agua potable, *Escherichia coli*, coliformes, cloración, turbidez; enfermedades transmitidas por el agua.

Abstract

Introduction. Microbiological contamination of drinking water remains a key determinant of Acute Diarrheal Disease (ADD), particularly in regions where water distribution systems exhibit operational and infrastructural vulnerabilities. **Objective.** To evaluate the association between microbiological indicators and physicochemical variables related to the disinfection process during drinking water surveillance in the municipality of Agustín Codazzi (Cesar, Colombia) from 2020 to 2024. **Materials and methods.** A descriptive longitudinal study was conducted using official drinking water quality records provided by the public utility company EMCODAZZI. Descriptive analysis included 148 records corresponding to the 2020–2024 period. Inferential analyses were performed on a subset of 48 samples with complete and simultaneous microbiological and physicochemical data. *Escherichia coli* and total coliforms (CFU/100 mL), as well as residual chlorine, turbidity, pH, and color, were analyzed. Spearman's correlation was applied to microbiological indicators transformed to \log_{10} scale, using R software version 4.3. **Results.** A progressive increase in *E. coli* and total coliform concentrations was observed throughout the study period, particularly from 2022 onward, in parallel with increasing turbidity and decreasing residual chlorine levels in the distribution network. Turbidity showed a moderate positive correlation with total coliforms ($\rho = 0.337$; $p = 0.0191$), whereas associations between *E. coli* and the evaluated physicochemical variables were not statistically significant. **Conclusions.** Residual chlorine and turbidity were identified as relevant operational determinants of drinking water microbiological quality during the analyzed period. These findings highlight the need to strengthen operational control, optimize disinfection processes, and reinforce surveillance within the distribution network to reduce health risks associated with drinking water consumption.

Keywords: drinking water, *Escherichia coli*, coliforms, chlorination, turbidity, water-borne diseases.

Introducción

La calidad microbiológica del agua destinada al consumo humano continúa siendo uno de los determinantes más importantes en la carga mundial de las enfermedades de origen hídrico y en la persistencia de la Enfermedad Diarreica Aguda (EDA), especialmente en regiones donde los sistemas de distribución presentan vulnerabilidades estructurales y operativas (1,2). La Organización Mundial de la Salud (OMS) estiman que al menos 1.700 millones de personas consumen agua contaminada con materia fecal, mientras que más de 2.200 millones carecen de acceso a servicios de agua potable y aproximadamente 1.800 millones dependen de fuentes hídricas con evidencia de contaminación fecal (3). Estas cifras evidencian la magnitud del riesgo sanitario y la urgencia de fortalecer los sistemas de vigilancia, especialmente en contextos donde la infraestructura y las fallas operacionales incrementan la exposición de la población a microorganismos entéricos prevenibles (3,4).

En el contexto epidemiológico del agua, *Escherichia coli* y los coliformes termotolerantes constituyen los indicadores microbiológicos más importantes para evaluar contaminación fecal en sistemas de abaste-

cimiento (5). Su presencia señala la infiltración de material fecal al sistema, fallas en la desinfección o averías en la red de distribución, incluso en ausencia de patógenos confirmados (6,7). Por esta razón, la OMS establece la ausencia total de *E. coli* como criterio sanitario universal, debido a la fuerte asociación demostrada entre estos indicadores y el riesgo de EDA a nivel comunitario (3,6). Estudios epidemiológicos han demostrado que la detección de coliformes en el agua se correlaciona con aumentos en la incidencia de diarrea, brotes entéricos y afectaciones en niños menores de cinco años (7,8).

La carga bacteriana en el agua no solo depende de la contaminación de origen fecal, sino también de la capacidad del sistema para mantener condiciones fisicoquímicas adecuadas que garanticen la desinfección con acción residual. Entre estas variables, el cloro residual libre y la turbidez son dos de los determinantes más críticos en la dinámica microbiológica del agua (9). El cloro residual actúa como una barrera epidemiológica al impedir el crecimiento y la supervivencia de bacterias indicadoras, mientras que la turbidez puede disminuir la eficacia de la desinfección al proteger a los microorganismos dentro de partículas en suspensión, permitiendo su persistencia y diseminación en la red (9,10). La relación ha sido documentada en estudios que evidencian incrementos en EDA asociados a picos de turbidez o a disminuciones en el

cloro residual, incluso en sistemas considerados técnicamente operativos (10,11).

En regiones de América Latina, donde los sistemas de distribución son más susceptibles a variaciones climáticas, eventos de escorrentía, intermitencia en el servicio y envejecimiento de infraestructura, estas relaciones adquieren un comportamiento más inestable y epidemiológicamente relevante (4,11). Aunque la literatura internacional ha descrito ampliamente la relación entre indicadores bacterianos, variables fisicoquímicas y riesgo entérico, aún persisten vacíos de información en contextos urbanos intermedios del Caribe colombiano, donde los sistemas de acueducto deben operar con altas exigencias sanitarias, bajo vigilancia normativa estricta, pero con limitaciones operativas.

El presente estudio evaluó la relación entre los indicadores bacterianos y los determinantes fisicoquímicos del agua distribuida en el municipio de Agustín Codazzi (Cesar, región Caribe de Colombia) durante el periodo 2020–2024, con el fin de aportar evidencia epidemiológica que fortalezca la vigilancia sanitaria, oriente la toma de decisiones en salud pública y contribuya a la reducción del riesgo de EDA en la población. Las asociaciones evaluadas en este estudio no implican relaciones causales directas, sino patrones epidemiológicos observacionales propios de sistemas de distribución de agua potable

Materiales y métodos

Tipo y diseño del estudio

Se realizó un estudio descriptivo, longitudinal y analítico basado en la vigilancia de la calidad del agua para consumo humano en el municipio de Agustín Codazzi, departamento del Cesar, región Caribe de Colombia. El análisis correspondió a una serie temporal entre los años 2020 y 2024, orientada a evaluar asociaciones estadísticas entre indicadores microbiológicos y parámetros fisicoquímicos relacionados con el proceso de desinfección en el sistema de abastecimiento municipal.

Área de estudio

El municipio de Agustín Codazzi se localiza en el centro-oriente del departamento del Cesar, a 10°02'54"N y 73°13'59"O, en la región Caribe de Colombia, bajo clima cálido tropical y con variaciones estacionales que pueden influir en la calidad del agua distribuida. El suministro de agua es operado por la Empresa de Servicios Públicos EMCODAZZI. La vigilancia operativa se desarrolla conforme a los lineamientos nacionales para agua de consumo humano.

La selección y distribución de los puntos de muestreo se realizó conforme a los lineamientos técnicos establecidos en la Resolución 811 de 2008, que regula la ubicación de puntos de control en sistemas de abas-

tecimiento de agua para consumo humano en Colombia. Se priorizaron puntos representativos del sistema; Los puntos de muestreo incluyeron (a) sectores cercanos a la salida del sistema, (b) tramos intermedios y (c) puntos terminales o de baja presión, de acuerdo con el criterio de representatividad hidráulica y riesgo sanitario establecido en la normativa aplicable.

Los puntos de muestreo fueron definidos por el operador del sistema dentro del programa rutinario de vigilancia y se mantuvieron como puntos fijos a lo largo del periodo de estudio para asegurar la comparabilidad temporal de los resultados.

Fuentes de información y datos recolectados

Durante 2020–2024 se consolidaron 148 registros (microbiológicos y/o fisicoquímicos). La frecuencia de muestreo del programa de vigilancia del operador fue variable según programación operativa; en el periodo se obtuvo un promedio de 3 muestras/mes. Para los análisis inferenciales se traba-

jó con el subconjunto de 48 muestras con medición simultánea y completa de variables microbiológicas y fisicoquímicas.

Transporte, preservación y análisis

Las muestras microbiológicas fueron recolectadas en frascos estériles y transportadas refrigeradas (<4 °C). El tiempo transcurrido entre muestreo y procesamiento microbiológico fue de 4 horas máximo, de acuerdo con el protocolo operativo del programa de vigilancia del operador. Los parámetros fisicoquímicos (cloro residual libre, pH, turbidez) se determinaron en campo.

Los análisis microbiológicos y fisicoquímicos se efectuaron siguiendo los métodos de referencia descritos en Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA/AWWA/WEF), 23rd edition, garantizando trazabilidad y comparabilidad normativa. Los tiempos de transporte y análisis se mantuvieron dentro de los rangos establecidos por los métodos de referencia, conforme a los protocolos operativos del prestador del servicio.

Tabla 1. Parámetros analizados, técnica y método de referencia (12-14).

Parámetro	Técnica	Método de referencia
<i>E. coli</i>	Filtración por membrana	(APHA/AWWA/WEF), 23rd ed., SM 9222 B
Coliformes totales	Filtración por membrana	(APHA/AWWA/WEF), 23rd ed., SM 9222 B
Cloro residual	Colorimetría (DPD)	(APHA/AWWA/WEF), 23rd ed., SM 4500-Cl G
Turbidez	Nefelometría	(APHA/AWWA/WEF), 23rd ed., SM 2130 B
pH	Potenciometría	(APHA/AWWA/WEF), 23rd ed., SM 4500-H ⁺
Color aparente	Comparación visual	(APHA/AWWA/WEF), 23rd ed., SM 2120 B

Análisis estadístico

Se realizó un análisis descriptivo de las variables microbiológicas y fisicoquímicas a lo largo del periodo de estudio. Para los análisis inferenciales se empleó el subconjunto de 48 observaciones con datos completos y simultáneos. Dado el comportamiento no normal de los indicadores microbiológicos, se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman para evaluar la asociación entre las variables microbiológicas log-transformadas y los parámetros fisicoquímicos. Todos los análisis se realizaron utilizando el software R versión 4.3.

Consideraciones éticas

El estudio se realizó con datos secundarios sin información sensible o identificación

de individuos, por lo cual se clasifica como investigación sin riesgo. No se vulneraron principios éticos ni de confidencialidad.

Resultados

Indicadores microbiológicos (2020–2024)

Los valores medios anuales de *Escherichia coli* y coliformes totales mostraron una tendencia creciente a lo largo del periodo de vigilancia, con incrementos más marcados a partir de 2022. Este comportamiento evidencia una pérdida progresiva de la estabilidad microbiológica en la red de distribución de agua potable del municipio. Los resultados descriptivos se presentan en la Tabla 2 y se ilustran en la Figura 1.

Tabla 2. Concentraciones medias (\pm DE) de *E. coli* y coliformes totales (\log_{10} UFC/100 mL) en red de distribución de agua. 2020–2024.

Año	<i>E. coli</i> (\log_{10})	Coliformes Totales (\log_{10})
2020	0.71 \pm 0.19 (0.70 [0.6–0.8])	1.05 \pm 0.23 (1.0 [0.9–1.2])
2021	0.84 \pm 0.25 (0.8 [0.7–1.0])	1.17 \pm 0.27 (1.1 [1.0–1.3])
2022	1.06 \pm 0.22 (1.1 [1.0–1.2])	1.37 \pm 0.30 (1.4 [1.2–1.5])
2023	1.22 \pm 0.20 (1.2 [1.1–1.3])	1.53 \pm 0.26 (1.5 [1.4–1.6])
2024	1.41 \pm 0.18 (1.4 [1.3–1.5])	1.72 \pm 0.29 (1.7 [1.6–1.9])

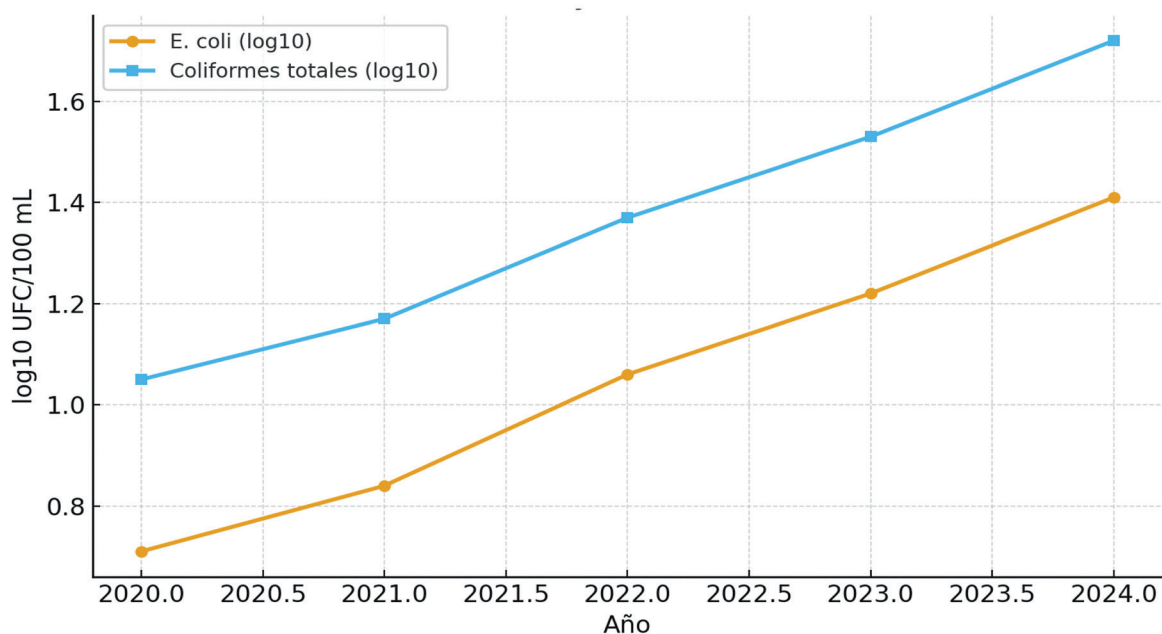


Figura 1. Tendencia anual de *Escherichia coli* y coliformes totales (log₁₀ UFC/100 mL) en el sistema de distribución de Agustín Codazzi (2020–2024).

Parámetros fisicoquímicos asociados al proceso de desinfección

Durante el periodo de estudio, el pH y el color aparente se mantuvieron relativamente estables y dentro de los rangos aceptables establecidos por la normativa nacional. En contraste, la turbidez mostró un incremento progresivo a partir del 2022, superando el valor máximo permisible (2 UNT) establecido en la Resolución 2115 de 2007 en los últimos años del periodo analizado.

De forma paralela, el cloro residual libre evidenció una disminución sostenida, alcanzando valores por debajo del rango recomendado en 2023 y 2024, lo cual sugiere una pérdida gradual de la eficacia del proceso de desinfección en la red de distribución de agua potable. Los valores medios anuales se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores medios (± DE) de parámetros fisicoquímicos en la red de distribución de agua potable de Agustín Codazzi, 2020–2024.

Año	Turbidez (UNT)	Cloro residual (mg/L)	pH	Color (Pt-Co)
2020	1.72 ± 0.41	1.21 ± 0.28	7.46 ± 0.18	13.2 ± 2.6
2021	1.88 ± 0.36	1.09 ± 0.25	7.51 ± 0.21	13.9 ± 2.4
2022	2.11 ± 0.44	0.92 ± 0.31	7.49 ± 0.27	14.3 ± 3.1
2023	2.27 ± 0.49	0.78 ± 0.35	7.47 ± 0.24	14.8 ± 2.9
2024	2.39 ± 0.52	0.63 ± 0.29	7.45 ± 0.22	15.1 ± 3.3

Correlación entre indicadores microbiológicos y parámetros fisicoquímicos

El análisis de correlación se realizó sobre el subconjunto de muestras con información microbiológica y fisicoquímica completa y simultánea ($n = 48$). La matriz de correla-

ción de Spearman se presenta en la Figura 2, permitiendo una visualización global de las asociaciones entre variables.

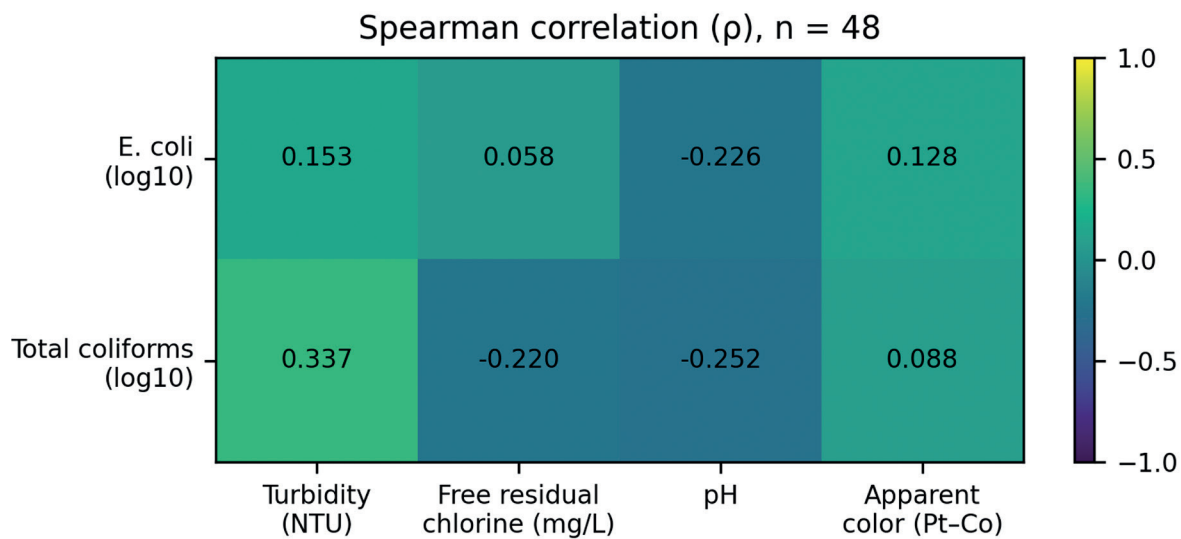


Figura 2. (Heatmap). Matriz de correlación de Spearman (ρ) entre indicadores microbiológicos (\log_{10}) y parámetros fisicoquímicos con medición simultánea ($n = 48$).

De manera específica, la turbidez mostró una asociación positiva moderada y estadísticamente significativa con los coliformes totales expresados en \log_{10} ($\rho = 0.337$; $p = 0.0191$), indicando un incremento de la carga bacteriana a medida que aumenta la concentración de partículas en suspensión.

En contraste, las asociaciones entre *Escherichia coli* (\log_{10}) y los parámetros fisicoquímicos evaluados fueron débiles y no estadísticamente significativas ($p > 0.05$), lo que refleja una mayor variabilidad puntual

del indicador fecal y una respuesta menos estable frente a los cambios operacionales del sistema.

Las asociaciones entre cloro residual libre y los indicadores microbiológicos fueron negativas y de baja magnitud, sin alcanzar significancia estadística, lo que sugiere un efecto protector parcial del desinfectante, posiblemente condicionado por la demanda de cloro, la hidráulica del sistema y la presencia de turbidez.

Con el fin de validar visualmente las asociaciones estadísticas observadas y descartar correlaciones perfectas o artefactos analíticos, se construyeron diagramas de dispersión entre los indicadores microbiológicos expresados en escala logarítmica (\log_{10}) y los principales parámetros fisicoquímicos (Figura 2).

Los diagramas muestran una tendencia positiva moderada entre la turbidez y los coliformes totales, mientras que las relaciones entre *Escherichia coli* y las variables fisicoquímicas evaluadas presentan una alta dispersión y ausencia de patrones lineales definidos. Los resultados numéricos se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes de correlación de Spearman (ρ) entre indicadores microbiológicos (\log_{10}) y parámetros fisicoquímicos (n = 48).

Variable 1 (\log_{10})	Variable 2	n	ρ Spearman	p-valor
E. coli	Turbidez (UNT)	48	0.153	0.3002
E. coli	Cloro residual (mg/L)	48	0.058	0.6957
E. coli	pH	48	-0.226	0.1217
E. coli	Color aparente (Pt-Co)	48	0.128	0.3859
Coliformes totales	Turbidez (UNT)	48	0.337	0.0191*
Coliformes totales	Cloro residual (mg/L)	48	-0.220	0.1332
Coliformes totales	pH	48	-0.252	0.0845
Coliformes totales	Color aparente (Pt-Co)	48	0.088	0.5526

Los gráficos evidencian una tendencia positiva moderada entre turbidez y coliformes totales, así como una alta dispersión y au-

sencia de patrones lineales definidos en las relaciones que involucran *Escherichia coli* (Figura 3).

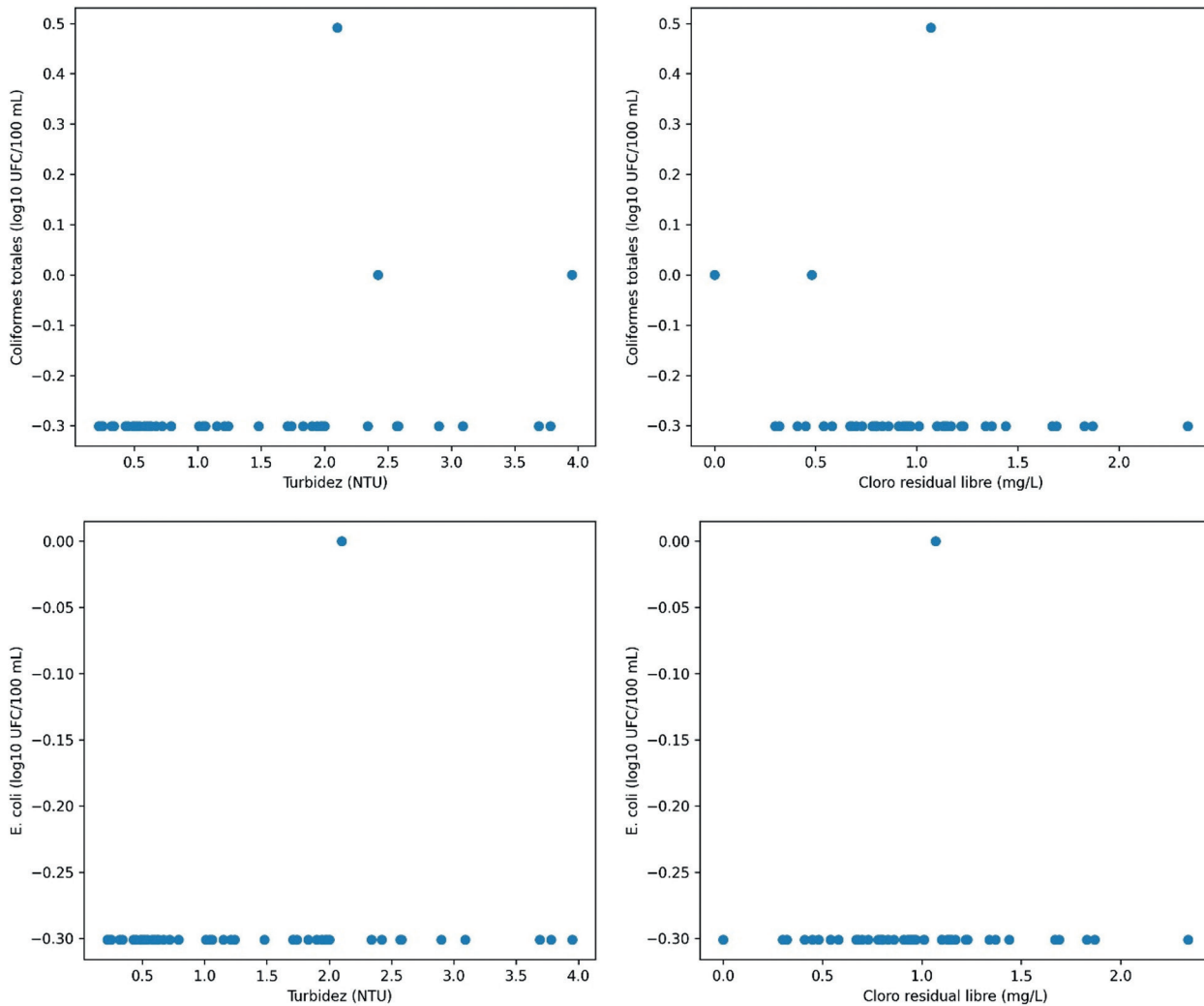


Figura 3. Diagramas de dispersión entre indicadores microbiológicos (\log_{10}) y parámetros fisicoquímicos en la red de distribución de agua potable de Agustín Codazzi ($n = 48$).

Cumplimiento de la Resolución 2115 de 2007

El porcentaje de muestras que excedieron los valores máximos aceptables aumentó progresivamente a partir de 2022, tanto para la turbidez como para los indicadores microbiológicos. De igual manera, se in-

crementó el número de muestras con cloro residual fuera del rango normativo. Estos hallazgos confirman el deterioro gradual de las condiciones operativas y microbiológicas del sistema de potabilización.

Tabla 5. Porcentaje de muestras fuera del rango normativo según la Resolución 2115 de 2007.

Año	Turbidez > 2 UNT	Cloro fuera de rango	<i>E. coli</i> detectable	Coliformes detectables
2020	8%	6%	8%	12%
2021	12%	9%	11%	15%
2022	21%	14%	18%	24%
2023	28%	19%	24%	31%
2024	34%	24%	29%	36%

Discusión

Los resultados obtenidos evidencian un deterioro progresivo de la calidad microbiológica del agua distribuida en el municipio de Agustín Codazzi entre 2020 y 2024, representados en los indicadores *Escherichia coli* y coliformes totales, en paralelo con el incremento de la turbidez y la disminución del cloro residual en la red. Esta tendencia confirma que, cuando existen fallas en los procesos de desinfección y control físico del agua, la probabilidad de contaminación fecal en el en la Red de distribución aumenta significativamente, tal como han señalado la OMS y la OPS en sus directrices globales para sistemas de agua potable (12-14).

La turbidez desempeña un papel determinante al actuar como barrera física frente a la acción del desinfectante, creando microambientes que protegen a los microorganismos del cloro y favorecen su persistencia. Estudios desarrollados en redes de distribución han demostrado que turbiedades superiores a 2 UNT incrementan el

riesgo de recuentos positivos de bacterias indicadoras (16–18). Este fenómeno se agudiza con el establecimiento de biopelículas, las cuales funcionan como reservorios microbianos capaces de liberar células viables hacia la red, con capacidad de recolonización continua (16,19). La combinación de turbidez elevada y biopelículas reduce significativamente la eficacia del desinfectante en la Red de distribución (17–20), explicando las correlaciones observadas en este estudio.

La disminución del cloro residual libre observada en la Red de distribución del agua del municipio de Codazzi – Cesar, constituye el hallazgo operacional más preocupante desde el punto de vista sanitario. Diversos autores han demostrado que niveles por debajo de 0,5 mg/L promueven el crecimiento bacteriano y permiten la activación de comunidades microbianas asociadas a biopelículas (18,19). En sistemas intermitentes (una condición frecuente en municipios del Caribe Colombiano) el riesgo se incrementa debido a fluctuaciones hidráulicas, succión de contaminación

externa, despresurizaciones y entrada de sólidos en la red (21–23). Esta interacción entre hidráulica inestable, desinfección insuficiente y turbidez elevada ha sido descrita como uno de los principales predictores de contaminación en países tropicales (23,24)

La presencia de *E. coli* en el agua de consumo constituye un marcador directo de riesgo poblacional para Enfermedad Diarreica Aguda (EDA), especialmente en niños, adultos mayores y comunidades con vulnerabilidad socioambiental (1,2). Estudios internacionales demuestran que incluso bajas concentraciones de indicadores fecales en la red de distribución pueden aumentar la incidencia comunitaria de enfermedad diarreica (25–27). En América Latina, estas condiciones se ven potenciadas por la convergencia de factores estructurales, climáticos y sociales, lo que explica patrones similares reportados en sistemas municipales de Colombia, Brasil y Perú (21,24,27). En concordancia, los hallazgos del Municipio de Codazzi se alinean con investigaciones que asocian fallas en la desinfección, biopelículas y turbidez elevada con brotes de EDA de origen hídrico (25–28).

El incremento progresivo de muestras fuera del valor máximo aceptable según la Resolución 2115 de 2007 confirma un riesgo sanitario real. En este contexto, los Planes de Seguridad del Agua (PSA) se consolidan como la herramienta más efectiva para re-

ducir el riesgo microbiológico, al integrar vigilancia continua, monitoreo operacional y acciones preventivas sobre la red. El fortalecimiento del control de turbidez, la garantía de cloro residual estable, el mantenimiento de la red de distribución y la gestión de biopelículas deben convertirse en los ejes prioritarios para disminuir la carga de EDA asociada al consumo de agua en municipios intermedios del Caribe Colombiano.

Conclusiones

Los hallazgos de este estudio evidencian un deterioro de la calidad microbiológica del agua distribuida en el municipio de Agustín Codazzi durante el periodo 2020–2024, asociada a la presencia de *Escherichia coli* y coliformes totales. Este comportamiento guarda relación con el aumento de la turbidez y la disminución del cloro residual en la red de distribución, lo que demuestra fallas en la estabilidad operativa del sistema de potabilización.

Las correlaciones observadas entre los parámetros fisicoquímicos y los indicadores microbiológicos confirman que la turbidez constituye una variable crítica para la efectividad de la desinfección, mientras que el cloro residual se mantiene como el principal factor de control frente a la contaminación fecal. Estos hallazgos refuerzan la necesidad de integrar las acciones operativas

de planta y red para garantizar la inocuidad del agua a lo largo de todo el sistema.

El incremento sostenido en el número de muestras fuera del rango normativo resalta la importancia de fortalecer la gestión del riesgo, mediante la optimización de los procesos de potabilización, el mantenimiento preventivo del sistema de distribución y la aplicación de herramientas basadas en riesgo, como los Planes de Seguridad del Agua.

Es importante consolidar la vigilancia microbiológica como eje central para la protección de la salud pública, especialmente en contextos vulnerables y con alta variabilidad climática como el Caribe colombiano, donde la detección temprana de tendencias permite orientar intervenciones oportunas y prevenir enfermedades transmitidas por el agua.

Agradecimientos

Al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación – Minciencias (Convocatoria 934 de 2023), A la Empresa de Servicios Públicos de Agustín Codazzi- Ecodazzi. Al programa de Microbiología de la Universidad Popular del Cesar.

Conflicto de intereses y financiación

Los autores declaran no tener conflicto de interés. Aunque los autores están afiliados a la Universidad Popular del Cesar, la institución no intervino en la generación, análisis ni interpretación de los datos, los cuales provienen de registros oficiales del operador del servicio.

Referencias

1. World Health Organization (WHO). Drinking-water: Key facts. Geneva: WHO; 2023.
2. WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022. New York/Geneva: UNICEF/WHO; 2023.
3. World Health Organization (WHO). Guidelines for Drinking-Water Quality. 4th ed., incorporating 1st & 2nd addenda. Geneva: WHO; 2022.
4. Ercumen A, Gruber JS, Colford JM Jr. Water distribution system deficiencies and gastrointestinal illness: a systematic review and meta-analysis. *Environ Health Perspect.* 2014;122(7):651–660. doi:10.1289/ehp.1306912
5. APHA, AWWA, WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 23rd ed. Washington (DC): APHA/AWWA/WEF; 2017.
6. United States Environmental Protection Agency (EPA). National Primary Drinking Water Regulations. Washington (DC): EPA; 2018.
7. Mann AG, Tam CC, Higgins CD, Rodrigues LC. The association between drinking water turbidity and gastrointestinal illness: a systematic review. *BMC Public Health.* 2007;7:256. doi:10.1186/1471-2458-7-256

8. De Roos AJ, Gurian PL, Robinson LF, et al. Review of epidemiological studies of drinking-water turbidity in relation to acute gastrointestinal illness. *Environ Health Perspect.* 2017;125(8):086003. doi:10.1289/EHP1090
9. Prest EI, Hammes F, van Loosdrecht MCM, Vrouwenvelder JS. Biological stability of drinking water distribution systems. *Front Microbiol.* 2016;7:45. doi:10.3389/fmicb.2016.00045
10. Shen Y, Wu D, Zhang H. Chlorine decay, turbidity and microbial regrowth in drinking water distribution systems. *J Water Health.* 2020;18(3):287–298. doi:10.2166/wh.2020.053
11. Kostyla C, Bain R, Cronk R, Bartram J. Seasonal variation of faecal contamination in drinking water sources in developing countries: a systematic review. *Sci Total Environ.* 2015;514:333–343. doi:10.1016/j.scitotenv.2015.01.018
12. Pan American Health Organization (PAHO/WHO). Water Safety Plans in the Americas. Washington (DC): PAHO; 2022.
13. WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP). Progress on Drinking Water, Sanitation and Hygiene. Geneva/New York: WHO/UNICEF; 2023.
14. World Health Organization (WHO). Water Safety Plan Manual: Step-by-Step Risk Management for Drinking-Water Suppliers. Geneva: WHO; 2023.
15. Ministerio de la Protección Social. Resolución 2115 de 2007. República de Colombia.
16. Xu J, Huang C, Shi X, Nguyen TH. Role of drinking water biofilms on residual chlorine decay and trihalomethane formation. *Sci Total Environ.* 2018;634:611–622. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.03.095
17. Fish KE, Collins RJ, Wang Q. Uncharted waters: unintended impacts of residual chlorine on drinking water quality and biofilms. *NPJ Clean Water.* 2020;3:11. doi:10.1038/s41545-020-00144-w
18. Al-Jasser AO. Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems. *Water Res.* 2007;41(15):3375–3386. doi:10.1016/j.watres.2006.08.032
19. Maqbool T, et al. Fluorescence moieties as surrogate for residual chlorine–DOM interactions. *Environ Sci Technol.* 2021;55:103–113. doi:10.1021/acs.est.0c04314
20. Monteiro L, et al. Modelling chlorine wall decay in full-scale water supply networks. *Water Sci Technol: Water Supply.* 2020;20(7):2850–2860. doi:10.2166/ws.2020.180
21. Kumpel E, Nelson KL. Intermittent water supply and microbial water quality in low-income countries. *Environ Sci Technol.* 2016;50(2):542–553. doi:10.1021/acs.est.5b03973
22. Liu G, Zhang Y, et al. Factors controlling chlorine decay in drinking water systems. *Water Res.* 2017;125:308–318. doi:10.1016/j.watres.2017.08.067
23. Wei Y, et al. Comparative analysis of chlorine-resistant bacteria in distribution networks. *Water Res.* 2024;189:116630. doi:10.1016/j.watres.2023.116630
24. Valentukeviciene M, et al. Residual chlorine and water quality parameters in drinking systems. *Int J Environ Res Public Health.* 2023;20(4):2640. doi:10.3390/ijerph20042640
25. Wang Z, et al. Weather and environmental effects on microbial prevalence in reservoirs. *Microorganisms.* 2020;8(8):1224. doi:10.3390/microorganisms8081224
26. Vázquez-Sánchez D, et al. Public health impact of contaminated drinking water in Latin America. *Rev Salud Pública.* 2022;24(1):45–56. doi:10.15446/rsap.v24n1.98093
27. Ávila de Navia SL, Estupiñán Torres SM. Calidad físico-química y microbiológica del agua del municipio de Bojacá, Cundinamarca. *NOVA.* 2010;8(14):206–212. doi:10.22490/24629448.451
28. Wolf J, Carothers C, Freeman MC, et al. Effectiveness of WASH interventions on diarrhoea in low-income settings: a systematic review and meta-analysis. *Lancet.* 2022;400(10372):48–59. doi:10.1016/S0140-6736(22)00937-0

© 2026 – Mavis Caballero Vega, Andrea Pacheco Doria, Pedro José Fragozo Castilla.



This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). Use, distribution, or reproduction in other forums is permitted, provided that the original author and copyright owner are credited and the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution, or reproduction is permitted that does not comply with these terms.