

Caracterización del agua de la PTAP Chavimochic para su adecuación al Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano

Characterization of water from the Chavimochic Drinking Water Treatment Plant for compliance with Drinking Water Quality Regulation

Richard Li Purizaga-Haro* 

Escuela de Posgrado, Universidad Nacional de Trujillo, Av. Juan Pablo II s/n – Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.

* Autor correspondiente: rlpurizagaha@unitru.edu.pe (R. Purizaga-Haro)

DOI: [10.17268/scien.inge.2026.01.05](https://doi.org/10.17268/scien.inge.2026.01.05)

RESUMEN

El estudio tuvo como objetivo identificar los contaminantes presentes en el agua superficial que ingresa a la PTAP Chavimochic desde la bocatoma en el río Santa y evaluar la calidad del agua potable distribuida en la provincia de Trujillo. La investigación fue de tipo aplicativa, con diseño no experimental y de corte transversal. Se recolectaron muestras en distintos puntos durante las épocas de estiaje y avenida, analizándose parámetros físico-químicos, inorgánicos y microbiológicos mediante métodos estandarizados de laboratorio, cuyos resultados fueron comparados con los Límites Máximos Permisibles establecidos en la normativa nacional vigente. Los resultados evidenciaron que el agua superficial presenta valores elevados de turbidez, coliformes totales y metales pesados como: arsénico, hierro y manganeso, con mayor incidencia en la época de avenida. En el agua potable, la mayoría de los parámetros cumplieron con la normativa; sin embargo, se identificaron valores cercanos o superiores a los límites en algunos puntos que demandan mayor control en cuanto a dureza, sulfatos, nitratos, arsénico y coliformes totales. Se concluye que, si bien el proceso de tratamiento garantiza en general la calidad del agua distribuida, existen factores asociados a la variabilidad estacional y a condiciones del sistema que pueden afectar su potabilidad.

Palabras clave: Calidad de agua; aguas superficiales; agua potable; planta de tratamiento de agua; metales pesados.

ABSTRACT

The aim of this study was to identify contaminants present in the surface water entering the Chavimochic Drinking Water Treatment Plant from the Santa River intake and to evaluate the quality of the drinking water distributed in the province of Trujillo. The research was applied in nature, with a non-experimental and cross-sectional design. Samples were collected at different points during the dry and wet seasons, and physico-chemical, inorganic, and microbiological parameters were analyzed using standardized laboratory methods. The results were compared with the Maximum Permissible Limits established by current national regulations. The findings showed that surface water exhibited high levels of turbidity, total coliforms and heavy metals such as arsenic, iron, and manganese, with greater incidence during the wet season. In drinking water, most parameters complied with regulatory standards; however, values close to or exceeding the limits were identified at certain points, requiring greater control of hardness, sulfates, nitrates, arsenic, and total coliforms. It is concluded that, although the treatment process generally ensures the quality of distributed water, factors associated with seasonal variability and system conditions may affect its potability.

Keywords: Water quality; surface water; drinking water; water treatment plant; heavy metals.

1. INTRODUCCIÓN

En el Perú, aunque los recursos hídricos superficiales son abundantes, su calidad se encuentra comprometida en diversas regiones, lo que afecta el abastecimiento de agua, la salud pública, las actividades productivas y los ecosistemas acuáticos. Según el INEI, 2024, aproximadamente el 73% de la población no accede a servicios de agua gestionados de manera segura, evidenciando brechas significativas en la calidad y continuidad del servicio, especialmente en zonas rurales. La polución del agua superficial se asocia en gran medida al vertimiento de aguas residuales industriales y domésticas sin ser tratadas, al uso intensivo de agroquímicos y al deterioro de las cuencas hidrográficas (ANA, 2020). A nivel internacional, estudios recientes confirman



que la descargar de aguas residuales (tratadas o no) constituye uno de los principales factores de degradación de la calidad del agua, alterando significativamente las comunidades biológicas y los procesos ecológicos en ríos y cuerpos de agua (Albini & Jackson, 2023).

El agua superficial destinada a la potabilización para consumo humano constituye una de las categorías más restrictivas dentro de la normativa ambiental peruana, regulada mediante el D.S. N.º 004-2017-MINAM, que establece los Estándares de Calidad Ambiental – agua (MINAM, 2017). Sin embargo, a lo largo del trayecto del río Santa, el crecimiento urbano e industrial, formal e informal, junto con el aumento poblacional, ha ocasionado reiterados incumplimientos en los parámetros de calidad de las aguas superficiales. Se han reportado valores elevados de pH, coliformes fecales y termotolerantes, así como la presencia de metales pesados (plomo, hierro, manganeso, aluminio y cadmio), lo que representa un problema ambiental de gran magnitud, que demanda un enfoque integral y coordinado (ANA, 2020).

Las aguas del río Santa son captadas por el Proyecto Especial Chavimochic (PECH) en su bocatoma y tratadas en su Planta de Potabilización (PTAP) que cuenta con una capacidad de producción de 1,500 litros por segundo de agua potable. Posteriormente, el agua potabilizada, es distribuida por SEDALIB S.A., empresa que abastece aproximadamente a 600 000 habitantes (60%) de la población de la provincia de Trujillo, mientras el 40% restante se suministra mediante pozos subterráneos (SEDALIB, 2018). No obstante, durante los últimos años se ha observado un aumento en la turbidez y la concentración de metales pesados que superan los límites máximos permitidos, elevando los costos de potabilización y generando incertidumbre respecto a la eficacia de los procesos de tratamiento y por ende a la calidad del agua tratada. Cuando las fuentes de origen contienen contaminantes químicos o microbiológicos, el agua tratada puede no alcanzar la calidad sanitaria exigida, representando riesgos para la salud de los consumidores, tales como trastornos digestivos, intoxicaciones (a corto plazo) o enfermedades crónicas tipo renal, neurológico y cardiovascular (a largo plazo) (Quezada, 2018).

De acuerdo con el Ministerio de Salud (2010), el acceso al agua potable constituye un derecho humano fundamental, por lo que garantizar su calidad requiere la aplicación de tecnologías de tratamiento adecuadas y sostenibles. Diversas alternativas han sido propuestas, entre ellas fitorremediación (uso de plantas *in situ*), biorremediación (microorganismos que degradan contaminantes), remoción física/química (coagulación, filtración, adsorción en carbón activado, cloración, ozonización y radiación UV) y tecnologías avanzadas como la ósmosis inversa o el intercambio iónico. La eficacia de estas soluciones depende de una correcta caracterización del agua, que permita seleccionar el método más viable y establecer estrategias de monitoreo constante para cumplir con las normativas sanitarias vigentes (Pérez et al., 2020).

En investigaciones previas, Alva y Ángeles (2018), identificaron concentraciones elevadas de fosfato (iones) en el agua potabilizada de diversas zonas de la provincia de Trujillo, probablemente debido a la contaminación con nutrientes agrícolas (fosfatos); mientras que el Proyecto Especial Chavimochic (2020) reportó niveles de nitritos, hierro y manganeso superiores a los límites del ECA para agua (categoría 1-A2) en el ingreso hacia la PTAP, destacando la necesidad de monitoreo continuo e identificación de fuentes de contaminación para ejecutar acciones. Asimismo, Quezada (2018), identificó en Florencia de Mora valores de sólidos totales y dureza por encima de los límites del D.S. N.º 031-2010-SA, concluyendo que dicha agua no reunía las condiciones necesarias para el consumo humano. En Lima, Rodríguez (2021) evidenció concentraciones críticas de coliformes fecales y nitratos en ciertas áreas del río Rímac, representando un riesgo para la salud si no es tratada eficientemente en su planta de tratamiento; mientras que a nivel internacional, Johnson (2019) documentó fluctuaciones en la calidad del agua potabilizada (aumentos ocasionales en la turbidez y bacterias coliformes) de Ciudad del Cabo (Sudáfrica) durante un periodo de sequía, pese a cumplir en general con los estándares nacionales. Finalmente, Chávez y Ruffner (2024) demostraron la efectividad de un sistema de remoción de arsénico utilizando carbón activado y hierro en la provincia de Pisco, constituyendo una alternativa viable para comunidades rurales con limitaciones en infraestructura de tratamiento; y Ramírez et al. (2019) evidenciaron reducciones significativas de Fe, Mn y sólidos suspendidos en aguas del río Mantaro mediante tratamientos convencionales combinados (coagulación-floculación y filtración lenta).

Frente a este contexto, se plantea la necesidad de caracterizar el agua superficial captada por la PTAP Chavimochic y el agua potabilizada distribuida a la provincia de Trujillo, con el objetivo de evaluar su adecuación a la normativa nacional vigente (D.S. N.º 004-2017-MINAM y D.S. N.º 031-2010-SA) que son el marco preventivo y regulatorio para los diferentes cuerpos de agua. El estudio tuvo como objetivo evaluar la calidad físico-química, inorgánica y microbiológica del agua superficial captada por la PTAP Chavimochic y del agua potabilizada distribuida en la provincia de Trujillo, mediante un enfoque aplicado, con diseño no experimental y de corte transversal, considerando muestreos en distintos puntos del sistema durante las épocas de estiaje y avenida, y comparando los resultados con los límites establecidos en la normativa nacional vigente.

2. METODOLOGÍA

2.1 Material de estudio

Consistió en muestras de agua superficial recolectados en dos puntos estratégicos de la cuenca baja del río Santa: Bocatoma del Proyecto Especial Chavimochic (M-01), situada en el margen derecho del río, a 412 m.s.n.m., y Punto de captación de la PTAP (M-02), contiguo al Canal Madre, en el sector Alto Moche. Además, las muestras de agua potabilizada se obtuvieron en el Laboratorio de la PTAP Chavimochic – punto de muestreo (M-03) y los diferentes centros de salud (hospitales y postas médicas) (M-04 a M-09) ubicados en los distritos que se benefician directamente por la red de distribución de SEDALIB S.A. en Trujillo.

2.2 Materiales y equipos

Se emplearon materiales estériles y reactivos de grado analítico, incluyendo frascos plásticos y de vidrio (300-500 mL), guantes quirúrgicos, algodón y alcohol etílico (96°), marcadores permanentes, ácido nítrico (HNO₃) para la preservación de metales, y hielo para mantener la cadena de frío. Las muestras se almacenaron en coolers térmicos y se georreferenciaron mediante una cámara digital con sistema GPS.

2.3 Diseño experimental

El estudio es de tipo aplicativo, de diseño no experimental y con un alcance tipo transversal, ya que se analizó la calidad del agua en un momento determinado sin manipular las variables.

Las variables independientes evaluadas corresponden a los parámetros físico-químicos, inorgánicos y microbiológicos que inciden en la calidad del agua (Tabla 1).

Tabla 1. Variables independientes definidas en la investigación.

Variables independientes	Unidades de medida	Parámetros
Color	Unid Pt/Co	Organolépticos (físico – químicos)
Turbiedad	NTU	
pH	Unidad de pH	
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	
Aluminio	mg/L	Químicos inorgánicos y compuestos orgánicos
Arsénico	mg/L	
Boro	mg/L	
Bario	mg/L	
Berilio	mg/L	
Cadmio	mg/L	
Cromo	mg/L	
Cobre	mg/L	
Hierro	mg/L	
Mercurio	mg/L	
Manganeso	mg/L	
Molibdeno	mg/L	
Níquel	mg/L	
Plomo	mg/L	
Antimonio	mg/L	
Selenio	mg/L	
Zinc	mg/L	
Dureza	mg/L	
Sulfatos	mg/L	
Nitratos	mg/L	
Coliformes totales	NMP/100mL	Microbiológicos

La variable dependiente se definió como la calidad del agua, determinada por la concentración de los parámetros analizados en relación con los límites establecidos por la normativa nacional (Tabla 2).

Tabla 2. Variable dependiente definidas en la investigación.

Variable dependiente	Indicadores
Calidad de agua	Concentración de parámetros que superen o no los Límites Máximos Permisibles (LMP) del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para Agua Categoría 1 – A2: aguas que pueden ser potabilizadas con tratamiento convencional (D.S N° 004-2017-MINAM) (Unid Pt/Co NTU, pH, mg/L, NMP/100mL).
	Concentración de parámetros que superen o no los Límites Máximos Permisibles (LMP) del Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano (D.S. N° 031-2010-SA) (Unid Pt/Co NTU, pH, mg/L, NMP/100mL).

2.4 Procedimiento experimental

Comprendió una secuencia metodológica que inició en el año 2023 con la recopilación y revisión de información técnica y normativa disponible. Posteriormente, se seleccionaron los parámetros organolépticos, químicos inorgánicos y microbiológicos de mayor relevancia ambiental y sanitaria, junto con los puntos de muestreo y la frecuencia de recolección.

Las muestras fueron recolectadas siguiendo protocolos de bioseguridad y procedimientos establecidos para muestreo de agua (R.D. N° 160-2015/DIGESA/SA). Se emplearon volúmenes entre 300 mL y 500 mL por punto de muestreo, dependiendo del tipo de análisis requerido (físico-químico, inorgánico y microbiológico). Las muestras destinadas a análisis microbiológico fueron recolectadas en frascos estériles, mientras que aquellas para análisis de metales pesados fueron preservadas mediante acidificación con ácido nítrico (HNO_3) hasta $\text{pH} < 2$. Todas las muestras fueron transportadas en cadena en frío y analizadas dentro de los tiempos máximos recomendados.

Los análisis de laboratorio se realizaron conforme a métodos normalizados del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2023), incluyendo, entre otros: turbidez (Método 2130B), pH (4500-H⁺B), coliformes totales (9222 B) y metales por EPA Method 200.7. Los resultados obtenidos fueron contrastados con los Límites Máximos Permisibles definidos en la legislación peruana (D.S. N° 004-2017-MINAM y D.S. N° 031-2010-SA), lo que permitió evaluar el grado de cumplimiento normativo y la aptitud del recurso hídrico tanto en su estado superficial como tras su tratamiento para consumo humano.

Por último, se efectuó un análisis interpretativo de las posibles causas que explican dichos incumplimientos y con base en los resultados se formularon conclusiones y recomendaciones orientadas a la remediación. Estas incluyeron la propuesta de alternativas de mejora en las etapas de tratamiento, optimización de los controles operativos y acciones preventivas que permitan garantizar la calidad del agua.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los análisis fueron realizados por NKAP Laboratorio Ambientales, acreditado por INACAL-DA (Registro N° LE 026). Las muestras fueron recolectadas en dos periodos hidrológicos diferenciados: época de estiaje (seguía: 26 de setiembre y 02 de octubre de 2024) y época de avenida (lluvia: 30 y 31 de enero de 2025).

3.1 Resultados de los parámetros organolépticos (físico-químicos)

3.1.1 Agua superficial

La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos para las muestras M-01 (bocatoma del Proyecto Chavimochic – Punto RSant10) y M-02 (punto de captación a la PTAP Chavimochic – canal madre) durante las épocas de estiaje y avenida, comparadas con los LMP del Estándar de Calidad Ambiental - Agua (Categoría 1-A2) (D.S. N° 004-2017-MINAM).

Tabla 3. Resultados de color, turbiedad, pH y SDT para las muestras M-01 y M-02 en las épocas de estiaje y avenida.

Parámetros de control	Unidad	Época de estiaje		Época de avenida		(LMP)*
		M-01	M-02	M-01	M-02	
Color	Unid Pt/Co	< 1	< 1	< 1	< 1	100
Turbiedad	NTU	208,5	80,25	426,5	223,5	100
pH	pH Units	7,89	8,00	7,83	7,69	5,5 – 9,0
Sólidos Disueltos Totales	mg/L	266,0	285,0	156,5	145,5	1000

Nota: Adaptado de los Informes de Ensayo T-2181-I224-RPH y T-183-A225-RICHARD. Lab. Ambientales NKAP.

* D.S. N° 004-2017-MINAM – Aprobación de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, por MINAM, 2017, p. 13 – 15.

Respecto al color, todas las muestras presentaron valores menores a 1 Unid Pt/Co, cumpliendo ampliamente con el límite máximo permisible de 100 Unid Pt/Co, reflejando una ausencia significativa de materia orgánica disuelta o sustancias coloreadas, lo que es consistente con las condiciones esperadas en aguas superficiales provenientes de cuerpos fluviales de alta montaña, como lo señala el MINAM (2017).

En cuanto a la turbiedad, los valores obtenidos superaron el LMP de 100 NTU en todos los casos, siendo más crítico en el punto M-01 durante la época de avenida (426,5 NTU). Este incremento sustancial indica una mayor carga de sólidos suspendidos asociada al arrastre de sedimentos, erosión de riberas y aporte de materiales coloidales durante los periodos de alta pluviosidad. Resultados similares han sido reportados en estudios de calidad de agua en ríos de régimen estacional, donde se evidencia un aumento significativo de la turbidez durante eventos de lluvia debido a la escorrentía superficial y la remoción de sedimentos (Zhang et al., 2022). En el punto M-02, la turbiedad también excede los límites durante la avenida (223,5 NTU), aunque

con una menor magnitud, posiblemente debido al efecto de sedimentación parcial en el canal de derivación hacia la PTAP. Estos resultados concuerdan con los reportes del Diagnóstico Hídrico Rápido de la Cuenca del Río Santa (SEDALIB, 2018), donde se destaca la influencia directa de las precipitaciones en la variabilidad de la turbiedad y la presencia de partículas minerales finas en suspensión.

Con respecto al pH, los valores se mantuvieron entre 7,69 y 8,00 unidades, dentro del rango permitido. Esto sugiere una condición de ligera alcalinidad estable, atribuida a la disolución de carbonatos y bicarbonatos en el cauce, lo cual favorece la neutralización de posibles ácidos naturales. Resultados similares han sido reportados por el Proyecto Especial Chavimochic (PECH, 2020) en su Memoria Institucional, evidenciando una estabilidad química del sistema fluvial en este parámetro.

En el caso de los sólidos disueltos totales (SDT), las concentraciones oscilaron entre 145,5 y 285 mg/L, valores muy por debajo del límite máximo (1000 mg/L), lo que evidencia un bajo grado de mineralización del agua y, en consecuencia, una menor complejidad en los procesos de tratamiento en la PTAP. La tendencia a menores concentraciones durante la época de avenida puede explicarse por el efecto de dilución asociado al incremento del caudal, en concordancia con observaciones previas de SEDALIB (2018) y PECH (2020). Este comportamiento es consistente con estudios en sistemas fluviales de régimen estacional, donde se ha observado que los SDT tienden a disminuir durante periodos de alta escurrimiento debido a la dilución de solutos disueltos (Li et al., 2021; Kumar et al., 2022).

Estos resultados demuestran que la turbiedad representa el principal parámetro que excede los estándares de calidad establecidos para aguas superficiales destinadas a procesos de potabilización convencional, evidenciando la necesidad de implementar medidas de control y mitigación, tales como sistemas de retención de sedimentos, manejo de cuencas y monitoreo intensivo en épocas de avenida. Asimismo, la comparación con los ECA y los reportes institucionales permite validar la confiabilidad de los resultados obtenidos, aportando evidencia científica sobre las variaciones físico-químicas del agua del río Santa y su impacto potencial en el proceso de potabilización de la PTAP Chavimochic.

3.1.2 Agua apta para consumo humano

Las Tablas 4 y 5 presentan los valores de color, turbidez, pH y SDT obtenidos en los puntos M-03 al M-09 durante las épocas de estiaje y avenida, respectivamente. Todos los resultados fueron contrastados con los límites permisibles definidos en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano.

Tabla 4. Resultados para las muestras M-03, M-04, M-05, M-06, M-07, M-08 y M-09 en la época de estiaje.

Parámetro de control	Unidad	Época de estiaje							(LMP)*
		M-03	M-04	M-05	M-06	M-07	M-08	M-09	
Color	Unid Pt/Co	<1	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	<1,5	15
Turbiedad	NTU	0,530	< 0,4	0,6	0,8	1,7	0,7	0,6	5
pH	pH Units	7,35	7,93	7,36	7,88	8,06	7,47	7,82	6,5 – 8,5
SDT	mg/L	271,0	835,0	256,0	260,0	285,0	246,0	272,0	1000

Nota: Adaptado de los Informes de Ensayo T-2181-I224-RPH y T-2216-J224-RPH. Lab. Ambientales NKAP.

Tabla 5. Resultados para las muestras M-03, M-04, M-05, M-06, M-07, M-08 y M-09 en la época de avenida.

Parámetro de control	Unidad	Época de avenida							(LMP)*
		M-03	M-04	M-05	M-06	M-07	M-08	M-09	
Color	Unid Pt/Co	<1	<1	<1	<1	<1	<1	<1	15
Turbiedad	NTU	<0,39	<0,39	<0,39	0,99	<0,39	1,05	1,51	5
pH	pH Units	7,09	7,87	7,12	7,74	8,26	7,21	7,50	6,5 – 8,5
SDT	mg/L	149,5	840,0	142,0	148,5	265,0	162,0	148,0	1000

Nota: Adaptado de los Informes de Ensayo T-183-A225-RICHARD y T-193-A225-RICHARD. Lab. Ambientales NKAP. M-03: Salida de PTAP Chavimochic (Punto muestreo – Laboratorio); M-04: Distrito de Salaverry – Puesto de Salud Aurora Díaz; M-05: Distrito de Moche – C. S. Materno Santa Lucía de Moche; M-06: Distrito Florencia de Mora – Puesto de Salud Florencia de Mora – Parte Alta; M-07: Distrito de El Porvenir – Puesto de Salud Miguel Grau; M-08: Distrito de La Esperanza – Hospital Jerusalén; M-09: Distrito de Huanchaco – CP El Milagro – Centro de Salud Materno Infantil El Milagro.

* D.S. N.º 031-2010-SA – Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, por el Ministerio de Salud – MINSA, 2010, p. 38-39.

En cuanto al parámetro color, los valores obtenidos se ubican ampliamente por debajo del límite permisible confirmando la eficacia del proceso de potabilización para la remoción de sustancias orgánicas y minerales coincidiendo con estudios previos de sistemas de tratamientos convencionales en zonas urbanas (OMS, 2022).

Respecto a la turbidez, todos los valores cumplieron con el LMP en ambas épocas. Sin embargo, durante el estiaje el punto M-07 (1,7 NTU) presentó la turbidez más elevada del conjunto, sugiriendo la posibilidad de recontaminación en la red de distribución, asentamiento de partículas en tuberías o ingreso de materiales por

falta de hermeticidad en conexiones secundarias. Resultados similares fueron observados por Johnson (2019) en sistemas de distribución de agua potable en Ciudad del Cabo (Sudáfrica), donde aumentos localizados de turbiedad fueron identificados como indicadores de riesgo intermitente para la salud pública. En época de avenida, el punto M-09 (1,51 NTU) mostró una ligera elevación respecto a los demás puntos, indicando que la zona del C.P. El Milagro podría ser susceptible a ingresos de partículas durante eventos de lluvia intensa y variaciones hidráulicas en la red, fenómeno descrito también por Mendoza et al. (2021) en sistemas urbanos con infraestructura vulnerable.

En relación con el pH, todas las mediciones se ubicaron dentro del rango exigido por la normativa, mostrando una tendencia hacia la ligera alcalinidad. El punto M-07 registró los valores más altos en ambas épocas (8.13 en estiaje y 8,26 en avenida), lo que podría atribuirse a interacción del agua con materiales de tuberías o suelos alcalinos en el distrito de El Porvenir. Estudios de comportamiento químico del agua tratada (PECH, 2020; APHA, 2023) respaldan que variaciones dentro del rango permitido no representan riesgos sanitarios, aunque pueden influir en la percepción organoléptica.

Los valores de SDT estuvieron por debajo del límite en todos los puntos. No obstante, el punto M-04 (Sala-verry) presentó los valores más cercanos al límite máximo tanto en estiaje (835 mg/L) como en avenida (840 mg/L). Si bien estas concentraciones no representan riesgo para la salud, pueden estar asociadas a presencia elevada de minerales disueltos característicos de zonas costeras, y pueden provocar efectos perceptibles en sabor y desempeño de equipos domésticos (OMS, 2022; MINSA, 2010). La estabilidad del valor entre estas condiciones sugiere influencia geológica o intrusión salina moderada para esta zona.

Los parámetros de agua potable cumplen con la normativa nacional, evidenciando la eficiencia del proceso de potabilización en la PTAP Chavimochic. No obstante, incrementos puntuales de turbidez y SDT sugieren la necesidad de fortalecer el monitoreo de la red, evaluar su integridad y aplicar controles preventivos ante lluvias intensas. Estos resultados aportan evidencia para optimizar la vigilancia sanitaria y sirven de base para futuros estudios sobre la calidad del agua en redes de distribución.

3.2 Resultados de parámetros químicos inorgánicos y orgánicos

3.2.1 Agua superficial

La Tabla 6 muestra los resultados obtenidos para las muestras M-01 y M-02 durante las temporadas de estiaje y avenida, comparadas con los LMP del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) - Agua (Categoría 1-A2: aguas susceptibles a potabilizar por tratamiento convencional).

Tabla 6. Resultados de metales y compuestos orgánicos para muestras M-01 y M-02 en las épocas de estiaje y avenida.

Parámetro de control	Unidad	Época de estiaje		Época de avenida		(LMP)*
		M-01	M-02	M-01	M-02	
Aluminio	mg/L	2,529	1,411	3,042	2,096	5
Arsénico	mg/L	0,0248	0,0074	0,0167	0,0099	0,01
Boro	mg/L	0,341	0,392	0,125	0,146	2,4
Bario	mg/L	0,0224	0,0148	0,0308	0,0199	1
Berilio	mg/L	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	0,04
Cadmio	mg/L	0,0010	<0,0006	0,0007	<0,0006	0,005
Cromo	mg/L	<0,0122	<0,0122	<0,0122	<0,0122	0,05
Cobre	mg/L	0,1358	0,1318	0,0796	0,0618	2
Hierro	mg/L	3,260	2,230	6,060	4,069	1
Mercurio	mg/L	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,002
Manganeso	mg/L	0,4032	0,2149	0,3941	0,2205	0,4
Molibdeno	mg/L	<0,0072	<0,0072	<0,0072	<0,0072	N.A.**
Níquel	mg/L	0,0198	0,0122	0,0167	0,0109	N.A.**
Plomo	mg/L	0,128	<0,0031	0,0229	<0,0031	0,05
Antimonio	mg/L	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,0045	0,02
Selenio	mg/L	<0,0031	<0,0031	<0,0031	<0,0031	0,04
Zinc	mg/L	0,849	0,544	0,209	0,163	5
Dureza	mg/L CaCO ₃	157,8	161,5	95,77	95,77	N.A.**
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	110,16	104,36	54,160	61,479	500
Nitratos***	mg NO ₃ ⁻ /L	3,327	3,535	3,344	4,107	50

Nota: Adaptado de los Informes de Ensayo T-2181-I224-RPH y T-183-A225-RICHARD. Lab. Ambientales NKAP.

* D.S. N.º 004-2017-MINAM – Aprobación de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) – Agua, por MINAM, 2017, p. 13-15.

** N.A.: No aplica valores de límites máximos permisibles para este parámetro.

*** Si las técnicas analíticas determinan la concentración en unidades de Nitratos-N (NO₃⁻-N), multiplicar el resultado por el factor 4.43 para expresarlo en las unidades de Nitratos (NO₃⁻).

Los resultados obtenidos para los puntos M-01 y M-02 evidencian que la mayoría de los parámetros evaluados (Al, B, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn, dureza, sulfatos y nitratos) están por debajo de los LMP establecidos en la normativa para aguas superficiales. Esto indica que, en ambos periodos hidrológicos, la calidad del agua, no representa un riesgo significativo para su uso posterior en potabilización reflejando condiciones químicas adecuadas y una relativa estabilidad ambiental de la cuenca.

Sin embargo, tres elementos registraron superaciones normativas que merecen especial atención. El arsénico mostró valores por encima del LMP en M-01 en ambas estaciones (duplicándolo en estiaje y por encima en avenida). Este comportamiento sugiere la presencia de fuentes naturales asociadas a la geología mineralizada de la cuenca, hechos documentados en sistemas fluviales andinos del Perú, donde el arsénico es uno de los metaloides más frecuentes y puede superar los estándares de calidad debido a procesos geogénicos y antrópicos (Chávez, et al., 2023). La variación estacional podría estar vinculada a procesos de lixiviación de minerales y al incremento del transporte de contaminantes durante periodos de lluvia. En el caso del hierro, se verificaron superaciones del LMP en ambos puntos y estaciones, con incrementos durante avenida, alcanzando 6,060 mg/L en M-01. Este patrón sugiere que los aportes de hierro están influenciados por procesos erosivos intensificados durante periodos de mayor precipitación, así como por el arrastre de sedimentos y aportes asociados a actividades mineras, fenómeno recurrente en cuencas altoandinas donde la dinámica hidrológica controla la movilización de metales (Leiva, et al., 2024). Respecto al manganeso, se observó un valor ligeramente superior al límite en M-01 durante el estiaje. Esta conducta puede asociarse a la movilidad geoquímica del manganeso, la cual depende de condiciones fisicoquímicas del agua, interacción agua-roca y de aportes antrópicos, quedando demostrado en estudios recientes en microcuencas andinas del Perú en donde, metales como Mn, Fe y As responde a una combinación de factores geológicos, actividades productivas, evidenciando una fuerte influencia estacional en su concentración (Leiva, et al., 2024).

Los resultados muestran que, aunque la mayoría de estos parámetros cumplen la normativa, la presencia recurrente y estacional de arsénico, hierro y manganeso por encima de los límites representa un riesgo potencial que podría afectar el tratamiento en la PTAP y la salud pública si no se controla. Se recomienda fortalecer el monitoreo hidrológico y geoquímico de la cuenca y evaluar tecnologías específicas para su remoción.

3.2.2 Agua apta para consumo humano

En las Tablas 7 y 8 se observan los valores obtenidos en los puntos M-03 a M-09 durante las épocas de estiaje y avenida, respectivamente. Todos los parámetros fueron contrastados con los límites permitidos establecidos en el D.S. N.º 031-2010-SA.

Tabla 7. Resultados para las muestras M-03, M-04, M-05, M-06, M-07, M-08 y M-09 en temporada de estiaje.

Parámetro de control	Unidad	Época de estiaje							(LMP)*
		M-03	M-04	M-05	M-06	M-07	M-08	M-09	
Aluminio	mg/L	0,070	0,028	0,043	0,045	0,055	0,047	0,067	0,2
Arsénico	mg/L	<0,0034	<0,0034	<0,0034	<0,0034	<0,0034	<0,0034	0,0063	0,010
Boro	mg/L	0,394	0,252	0,353	0,374	0,360	0,417	0,415	1,50
Bario	mg/L	0,0108	0,0342	0,0122	0,0129	0,0165	0,0143	0,0146	0,70
Berilio	mg/L	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	N.A.**
Cadmio	mg/L	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	0,003
Cromo	mg/L	<0,0122	<0,0122	<0,0122	<0,0122	<0,0122	<0,0122	<0,0122	0,050
Cobre	mg/L	<0,0077	<0,0077	<0,0077	<0,0077	<0,0077	<0,0077	<0,0077	2,0
Hierro	mg/L	0,036	<0,0146	0,020	0,018	0,037	0,026	0,024	0,3
Mercurio	mg/L	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,001
Manganeso	mg/L	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	0,4
Molibdeno	mg/L	<0,0072	<0,0072	<0,0072	<0,0072	<0,0072	<0,0072	<0,0072	0,07
Níquel	mg/L	<0,0081	<0,0081	<0,0081	<0,0081	<0,0081	<0,0081	<0,0081	0,020
Plomo	mg/L	<0,0031	<0,0031	<0,0031	<0,0031	<0,0031	<0,0031	<0,0031	0,010
Antimonio	mg/L	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,0045	0,0083	<0,0045	0,020
Selenio	mg/L	<0,0031	0,0042	<0,0031	<0,0031	<0,0031	<0,0031	<0,0031	0,010
Zinc	mg/L	0,551	0,021	0,042	0,036	0,025	0,024	0,027	3,0
Dureza	mg/L CaCO ₃	165,3	433,96	147,17	158,49	169,81	150,94	166,04	500
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	108,17	235,95	99,37	107,62	108,73	101,43	107,46	250
Nitratos***	mg NO ₃ ⁻ /L	3,517	39,914	3,101	3,057	6,609	3,190	3,633	50

Nota: Adaptado de los Informes de Ensayo T-2181-J224-RPH y T-2216-J224-RPH. Lab. Ambientales NKAP.

* D.S. N.º 031-2010-SA – Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, por el Ministerio de Salud – MINSA, 2010, p. 38-39.

** N.A.: No aplica valores para límites máximos permisibles para este parámetro.

*** Si las técnicas analíticas determinaron la concentración en unidades de Nitratos-N (NO₃⁻-N), multiplicar el resultado por el factor 4.43 para expresarlo en las unidades de Nitratos (NO₃⁻).

Tabla 8. Resultados para las muestras M-03, M-04, M-05, M-06, M-07, M-08 y M-09 en la temporada de avenida.

Parámetro de control	Unidad	Época de avenida							(LMP)*
		M-03	M-04	M-05	M-06	M-07	M-08	M-09	
Aluminio	mg/L	0,017	0,013	0,031	0,027	0,034	0,039	0,045	0,2
Arsénico	mg/L	<0,0034	<0,0034	0,0044	<0,0034	0,0035	<0,0034	<0,0034	0,010
Boro	mg/L	0,164	0,233	0,153	0,170	0,150	0,147	0,163	1,50
Bario	mg/L	0,0093	0,0349	0,0091	0,0096	0,0189	0,0095	0,0094	0,70
Berilio	mg/L	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	N.A.**
Cadmio	mg/L	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	<0,0006	0,003
Cromo	mg/L	<0,0122	<0,0122	<0,0122	<0,0122	<0,0122	<0,0122	<0,0122	0,050
Cobre	mg/L	<0,0077	<0,0077	<0,0077	<0,0077	0,0148	<0,0077	<0,0077	2,0
Hierro	mg/L	<0,0146	<0,0146	<0,0146	<0,0146	0,021	0,043	0,035	0,3
Mercurio	mg/L	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0,001
Manganeso	mg/L	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	<0,0059	0,4
Molibdeno	mg/L	<0,0072	<0,0072	<0,0072	<0,0072	<0,0072	<0,0072	<0,0072	0,07
Níquel	mg/L	<0,0081	<0,0081	<0,0081	<0,0081	<0,0081	<0,0081	<0,0081	0,020
Plomo	mg/L	<0,0031	<0,0031	<0,0031	<0,0031	<0,0031	<0,0031	<0,0031	0,010
Antimonio	mg/L	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,0045	<0,0045	0,020
Selenio	mg/L	<0,0031	<0,0031	<0,0031	0,0043	<0,0031	0,0058	<0,0031	0,010
Zinc	mg/L	0,017	<0,0089	0,021	0,015	0,011	0,022	0,020	3,0
Dureza	mg/L CaCO ₃	92,02	414,4	86,49	99,10	147,8	95,50	90,09	500
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	64,759	248,94	59,936	64,969	82,104	62,502	63,190	250
Nitratos***	mg NO ₃ ⁻ /L	2,286	38,080	1,737	1,918	7,695	1,834	1,896	50

Nota: Adaptado de los Informes de Ensayo T-183-A225-RICHARD y T-193-A225-RICHARD. Lab. Ambientales NKAP. M-03: Salida de PTAP Chavimochic (Punto muestreo – Laboratorio); M-04: Distrito de Salaverry – Puesto de Salud Aurora Díaz; M-05: Distrito de Moche – C. S. Materno Santa Lucía de Moche; M-06: Distrito Florencia de Mora – Puesto de Salud Florencia de Mora – Parte Alta; M-07: Distrito de El Porvenir – Puesto de Salud Miguel Grau; M-08: Distrito de La Esperanza – Hospital Jerusalén; M-09: Distrito de Huanchaco – CP El Milagro – Centro de Salud Materno Infantil El Milagro.

* D.S. N° 031-2010-SA – Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, por el Ministerio de Salud – MINSA, 2010, p. 38-39.

** N.A.: No aplica valores para límites máximos permisibles para este parámetro.

*** Si las técnicas analíticas determinaron la concentración en unidades de Nitratos-N (NO₃⁻-N), multiplicar el resultado por el factor 4.43 para expresarlo en las unidades de Nitratos (NO₃⁻).

El análisis en los puntos M-03 al M-09 durante ambas temporadas evidencian que las concentraciones de aluminio, arsénico, boro, bario, berilio, cadmio, cromo, cobre, hierro, mercurio, manganeso, molibdeno, níquel, plomo, antimonio, selenio, zinc, así como los valores de dureza, sulfatos y nitratos, se encuentran dentro de los LMP determinados en el Reglamento de Calidad del Agua para Consumo Humano (D.S. N.° 031-2010-SA).

Los resultados sugieren que el agua tratada y distribuido por la PTAP Chavimochic cumple adecuadamente con los estándares de potabilidad y no representa riesgos significativos para la salud humana durante ambos periodos evaluados. Estos resultados coinciden con los hallazgos reportados por Torres (2021), quien evaluó la calidad del agua en las plantas Monte dentro y Cariongo en la red de distribución del municipio de Pamplona (en el norte de Santander, España), concluyendo que los parámetros físico-químicos y microbiológicos permanecieron dentro de los límites normativos y no implican amenazas para los consumidores.

No obstante, se identificaron valores relativamente elevados en el punto M-04 (Salaverry) para dureza, sulfatos y nitratos en ambas temporadas, aunque sin exceder los límites permisibles. En estiaje, estos parámetros alcanzaron 433,96 mg/L CaCO₃, 235,95 mg/L SO₄²⁻ y 39,914 mg/L NO₃⁻. Si bien estos valores no comprometen la potabilidad del agua, su magnitud sugiere condiciones de agua relativamente dura con presencia significativa de sales disueltas. Este comportamiento podría vincularse con factores hidrogeológicos de la zona o con aportes difusos asociados a actividades agrícolas (uso de fertilizantes), industriales y mineras, lo que coincide con observaciones similares realizadas en estudios de fuentes de abastecimiento urbano en Latinoamérica, donde la dureza y presencia de aniones mayoritarios se asocian a procesos naturales de mineralización y posibles contribuciones antropogénicas (Torres, 2021). Debido a ello, se recomienda mantener un programa de vigilancia periódica en este punto, con la finalidad de prevenir potenciales incrementos futuros que puedan comprometer el confort de los usuarios (sabor del agua, incrustaciones en tuberías y equipos domésticos) y garantizar la sostenibilidad de la calidad en la red de distribución.

En conjunto, los resultados confirman la eficiencia del sistema de tratamiento de la PTAP Chavimochic, asegurando el suministro de agua dentro de los estándares normativos vigentes y reforzando la importancia de un monitoreo continuo para detectar y mitigar tempranamente posibles variaciones asociadas a condiciones climáticas, actividades humanas o características hidrogeológicas de la cuenca.

3.3 Resultados de parámetros microbiológicos

3.3.1 Agua superficial

En la Tabla 9 se muestran los datos obtenidos en los puntos M-01 y M-02 durante las épocas de estiaje y avenida. El parámetro analizado fue comparado con el límite permitido definido en el Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano.

Tabla 9. Resultados para las muestras M-01 y M-02 en temporadas de estiaje y avenida.

Parámetro de control	Unidad	Época de estiaje		Época de avenida		LMP*
		M-01	M-02	M-01	M-02	
Coliformes totales	NMP/100mL	54x10	28x10	54x10 ³	17x10 ²	N.A.**

Nota: Adaptado de los Informes de Ensayo T-2181-I224-RPH y T-183-A225-RICHARD. Lab. Ambientales NKAP.

M-01: Bocatoma del Proyecto Chavimochic – Punto RSant 10 – Río Santa; M-02: Punto captación a PTAP Chavimochic – Canal madre.

* D.S. N° 004-2017-MINAM: Aprobación de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua, por MINAM, 2017, p. 13 – 15.

** N.A.: No aplica valores para límites máximos permisibles para este parámetro.

Los análisis microbiológicos evidenciaron la presencia de coliformes totales durante ambas temporadas. En la época de estiaje, se registraron valores de 54x10 NMP/100mL en M-01 y 28x10 NMP/100mL en M-02, lo que indica una carga bacteriana considerable en el río Santa y en el canal madre del Proyecto Chavimochic. Durante la temporada de avenida se observó un incremento significativo, alcanzando 54x10³ NMP/100mL en M-01 y 17x10² NMP/100mL en M-02. Este marcado aumento está asociado a los procesos de escorrentía superficial y aporte de material orgánico producto de las precipitaciones, generando mayor arrastre de residuos fecales y sedimentos hacia los cuerpos de agua.

Estos patrones estacionales son consistentes con estudios realizados en otras cuencas hidrográficas del país, donde la presencia y fluctuación de coliformes totales se relacionan con condiciones hidrológicas y actividades antropogénicas en las zonas de influencia. Rodríguez (2021), en su evaluación del estado del agua superficial en la cuenca del río Rímac, reportó incrementos significativos de coliformes durante periodos lluviosos, indicando que la carga microbiológica puede presentar un riesgo sanitario si no es tratada adecuadamente en las plantas potabilizadoras. La similitud de resultados sugiere que las fuentes superficiales utilizadas para abastecimiento público en cuencas urbanizadas del Perú pueden estar expuestas de manera recurrente a contaminación fecal difusa, lo que resalta la importancia de procesos de desinfección robustos y monitoreo permanente en los sistemas de tratamiento.

En términos sanitarios, si bien los ECA – agua no establecen LMP para coliformes totales en cuerpos de agua superficiales destinados a potabilización (D.S. N° 004-2017-MINAM), la magnitud de los valores hallados subraya la necesidad de una gestión adecuada del recurso hídrico, incluyendo medidas de control de fuentes de contaminación y fortalecimiento de programas de vigilancia epidemiológica en épocas de mayor vulnerabilidad hidrológica.

3.3.2 Agua apta para consumo humano

Las Tablas 10 muestran los resultados en los puntos M-03 al M-09 durante las épocas de estiaje y avenida. El parámetro fue comparado con los límites permisibles determinados en el D.S. N° 031-2010-SA referente al agua potable para uso poblacional.

Tabla 10. Resultados para las muestras M-03, M-04, M-05, M-06, M-07, M-08 y M-09 en estiaje y avenida.

Parámetro de control	Unidad	Época de estiaje							LMP*
		M-03	M-04	M-05	M-06	M-07	M-08	M-09	
Coliformes totales	NMP/100mL	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	9,2	<1,1	<1,1	<1,8
Parámetro de control	Unidad	Época de avenida							LMP*
		M-03	M-04	M-05	M-06	M-07	M-08	M-09	
Coliformes totales	NMP/100mL	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,1	<1,8

Nota: Adaptado de los Informes de Ensayo T-2181-I224-RPH, T-2216-J224-RPH, T-183-A225-RICHARD y T-193-A225-RICHARD. Lab. Ambientales NKAP.

M-03: Salida de PTAP Chavimochic (Punto Laboratorio.); M-04: Distrito de Salaverry – Puesto de Salud Aurora Díaz; M-05: Distrito de Moche – C. S. Materno Santa Lucía de Moche; M-06: Distrito Florencia de Mora – Puesto de Salud Florencia de Mora Parte Alta; M-07: Distrito de El Porvenir – Puesto de Salud Miguel Grau; M-08: Distrito de La Esperanza – Hospital Jerusalén; M-09: CP El Milagro – Centro de Salud Materno Infantil El Milagro.

* D.S. N° 031-2010-SA: Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano, por el Ministerio de Salud – MIN-SA, 2010, p. 38-39.

Los resultados evidenciaron cumplimiento general respecto al límite máximo permisible para coliformes totales, establecido en <1,8 NMP/100mL según el Reglamento de Calidad de Agua para Consumo Humano. Sin

embargo, durante el periodo de estiaje, en el punto M-07 (Puesto de Salud Miguel Grau – Distrito El Porvenir) se registró un valor de 9,2 NMP/100mL, superando el valor normativo. Este hallazgo sugiere la existencia de contaminación microbiológica puntual en la red de distribución de dicho sector, posiblemente asociada a fallas en la integridad del sistema de tuberías, almacenamiento inadecuado o eventos de intrusión de aguas externas.

La detección de coliformes totales en sistemas de abastecimiento público constituye un indicador crítico de deterioro de la calidad microbiológica del agua, ya que este grupo bacteriano es ampliamente utilizado como parámetro centinela para evaluar condiciones higiénico-sanitarias y la eficiencia de la desinfección. En este sentido, diversos estudios recientes señalan que la presencia de coliformes en redes de distribución está estrechamente relacionada con la pérdida o insuficiencia del cloro residual, el cual cumple un rol fundamental como barrera sanitaria frente a la recontaminación microbiológica (World Health Organization, 2022; USEPA, 2021).

Asimismo, la ocurrencia de estos eventos suele estar vinculada a problemas de integridad hidráulica en la red, tales como fugas, presiones negativas o intermitencia en el servicio, condiciones que facilitan la intrusión de contaminantes desde el entorno hacia el interior de las tuberías. Investigaciones recientes han demostrado que sistemas de distribución con deficiencias estructurales presentan mayor susceptibilidad a episodios de contaminación microbiológica, incluso cuando el agua tratada cumple inicialmente con los estándares de potabilización (Ahmed et al., 2020).

En este contexto, el resultado obtenido en M-07 pone de manifiesto la importancia de fortalecer los programas de control operacional en la etapa de distribución, incluyendo el monitoreo continuo del cloro residual, la verificación de presiones en la red y la evaluación de posibles puntos de ingreso de contaminantes. Estas acciones son fundamentales para garantizar la inocuidad del agua suministrada y prevenir riesgos a la salud pública, especialmente en zonas con infraestructura vulnerable.

3.4 Alternativas de remediación

3.4.1 Agua superficial

Para el agua cruda proveniente del río Santa, las estrategias basadas en restauración ambiental y control territorial (como la recuperación de la cuenca y la creación de zonas de protección con barreras vegetales) constituyen medidas estructurales dirigidas a reducir la carga de contaminantes químicos y microbiológicos de origen. Estas acciones se alinean dentro de los principios de gestión integral de cuencas que promueven la reducción de descargas agrícolas e industriales y la mitigación del arrastre de contaminantes en periodos de crecida. No obstante, su implementación requiere coordinación institucional y participación multisectorial, lo que implica mayores tiempos de ejecución y desafíos en la gobernanza ambiental.

En relación con los metales pesados detectados (arsénico, hierro y manganeso), alternativas como la filtración lenta de arena, combinada con procesos de oxidación y coagulación, muestran un desempeño adecuado en términos de remoción de partículas y metales oxidados, con ventajas operativas y económicas para su aplicación en infraestructura existente. Pérez (2018) reportó resultados favorables utilizando medios filtrantes naturales (como caliza, aserrín y guano de corral) logrando concentraciones de metales por debajo de los límites normativos a nivel experimental, lo cual refuerza su potencial como una alternativa viable. Por su parte, el intercambio iónico ofrece alta selectividad para metales específicos como arsénico y antimonio; sin embargo, los costos asociados a la regeneración de resinas y su operación especializada pueden limitar su adopción a escala regional, especialmente en sistemas públicos con restricciones presupuestales.

Tecnologías avanzadas como la nanofiltración y ultrafiltración representan opciones de alto rendimiento para la remoción de metales disueltos, microorganismos y sólidos totales. Su aplicación es técnicamente viable y puede integrarse como complemento a la línea de tratamiento convencional; no obstante, sus requerimientos energéticos, costos de inversión y susceptibilidad a incrustaciones y obstrucciones de membranas deben considerarse como factores limitantes.

3.4.2 Agua apta para consumo humano

Para el agua tratada, se identificó presencia de coliformes totales en el punto M-07 durante la época de estiaje, superando el límite establecido en la normativa nacional. Frente a este escenario, la optimización del proceso de cloración constituye la alternativa primaria y más inmediata debido a su eficacia comprobada, accesibilidad operacional y bajo costo. Ajustes en la dosis de cloro, reforzamiento de la desinfección por etapas y monitoreo continuo del cloro residual permitirán asegurar la estabilidad microbiológica en la red de distribución.

Como estrategias complementarias, la radiación UV y la ozonización aportan mayor capacidad de inactivación microbiológica en condiciones de alta carga orgánica o durante episodios críticos, como los asociados a la temporada de avenida. Ambos métodos han demostrado elevada eficacia para la desinfección del agua potable sin general residuos químicos, lo cual es consistente con la literatura especializada en tratamiento avanzado de agua. Sin embargo, requieren condiciones operativas específicas (como una baja turbidez en el caso de UV y control técnico especializado para ozono) además de mayores costos de inversión y mantenimiento, lo que puede limitar su implementación en sistemas convencionales.

4. CONCLUSIONES

La calidad del agua superficial captada por la PTAP Chavimochic presenta variaciones estacionales significativas, siendo la turbidez el parámetro más crítico, con valores que superan los límites permisibles principalmente durante la época de avenida, lo que evidencia una mayor carga de sólidos suspendidos asociada al incremento del caudal del río Santa, reforzando la necesidad de implementar monitoreos continuos y ajustes operacionales en los procesos de coagulación, sedimentación y filtración en la planta.

Los parámetros organolépticos (color, pH y SDT) se mantuvieron dentro de los rangos normativos, indicando condiciones estables en términos de acidez, alcalinidad y carga salina.

Se identificó la presencia recurrente de arsénico, hierro y manganeso en concentraciones superiores a la normativa en las aguas superficiales en ambas temporadas, lo que indica influencia de fuentes geoquímicas y antrópicas en la cuenca. Esta condición demanda la implementación de tratamientos específicos como filtración lenta en arena, eficaz para la remoción de Fe y Mn mediante procesos físicos y biológicos, y el intercambio iónico, particularmente adecuado para la remoción de As y otros metales disueltos mediante resinas selectivas.

El agua potabilizada cumplió en general con los estándares de calidad; sin embargo, se detectó una superación puntual de coliformes totales en un punto de la red de distribución de El Porvenir, lo que sugiere deficiencias en el control del cloro residual o en la integridad del sistema. Frente a ello, se debe optimizar el proceso de desinfección mediante la cloración ajustada en función de la demanda real de cloro, asegurando concentraciones adecuadas de cloro libre residual en toda esta red. Asimismo, se debe implementar programas de recloración junto con el monitoreo continuo del cloro residual.

La combinación de acciones preventivas en la fuente con tecnologías avanzadas de tratamiento constituye una estrategia integral y sostenible para reducir los niveles de metales pesados y contaminantes microbiológicos permitiendo mejorar la eficacia del tratamiento en la PTAP Chavimochic y garantizar una mayor estabilidad de la calidad del agua frente a las variaciones estacionales.

Para futuras investigaciones, se recomienda desarrollar modelos predictivos que integren variables hidrológicas, fisicoquímicas y microbiológicas, con el fin de anticipar eventos de deterioro de la calidad del agua y optimizar la gestión del sistema de abastecimiento, además de estudiar la influencia del cambio climático en los patrones de condición del agua cruda y potabilizada en la región costera del norte del Perú.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, W., Hamilton, K., Toze, S., Cook, S. & Page, D. (2020). A review on microbial contaminants in stormwater runoff and outfalls: Potential health risks and mitigation strategies. *Science of the total environment*. 692. 1301-1321. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.055>
- Albini, D. & Jackson, M. (2023). *New study finds that sewage release is worse for rivers than agriculture*. Department of Biology. University of Oxford. <https://www.ox.ac.uk/news/2023-09-22-new-study-finds-sewage-release-worse-rivers-agriculture-0>
- Alva Díaz, P. & Ángeles Rodríguez, D. (2018). Estudio sobre los iones presentes en el agua potable en sectores con suministro limitado de la provincia de Trujillo, por el método de cromatografía iónica. [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo]. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/11451>
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation (2023). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (24th ed.). APHA Press. <https://www.standardmethods.org/>
- Autoridad Nacional del Agua - ANA. (2020). *Resultados del monitoreo de la calidad del agua – Cuenca del Río Santa 2019* (Informe Técnico N° 035–2020–ANA.AAA.HCH-AT/OEAU). Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. <https://www.gob.pe/institucion/ana/informes-publicaciones/1269324-resultados-del-monitoreo-de-la-calidad-del-agua-cuenca-del-rio-santa-2019>

- Chávez Gonzales, F., Paredes, B., Vera, C., Gutiérrez, G., Valencia, R. & Paz Alcázar A. (2023). Seasonal differences in trace metal concentrations in the major rivers of the hyper-arid southwestern Andes basins of Peru. *Journal of Environmental Management*, 330, 118493. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118493>
- Chávez Ruiz, M. & Ruffner Camargo, B. (2024). Estudio de campo de una planta de remoción de arsénico para agua potable utilizando carbón activado y hierro en una comunidad rural de la provincia de Pisco, Perú. *Journal of Water and Health*, 22(2), 329-336. <https://doi.org/10.2166/wh.2024.273>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2024). *Perú: Condiciones de vida y acceso a servicios básicos 2023*. <https://www.inei.gob.pe>
- Johnson Michael, R. (2019). Analysis of drinking water quality in Cape Town. *Environmental Health Review*, 62(2), 42-49. <https://doi.org/10.5864/d2019-011>
- Li, P., Qian, H., & Wu, J. (2021). Hydrochemical characteristics and water quality assessment in surface water systems: A case study of seasonal variation. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(3), 3456-3468. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10575-9>
- Laboratorios Ambientales NKAP S.R.L. (2024). Informes de Ensayo T-2181-I224-RPH. Resultados para muestras de aguas superficiales en época de estiaje.
- Laboratorios Ambientales NKAP S.R.L. (2024). Informes de Ensayo T-2216-J224-RPH. Resultados para muestras de aguas apta para consumo humano en época de estiaje.
- Laboratorios Ambientales NKAP S.R.L. (2024). Informes de Ensayo T-183-A225-RICHARD. Resultados para muestras de aguas superficiales en época de avenida.
- Laboratorios Ambientales NKAP S.R.L. (2024). Informes de Ensayo T-193-A225-RICHARD. Resultados para muestras de aguas apta para consumo humano en época de estiaje.
- Leiva Tafur, D., Rascón Barrios, J., Corroto de la Fuente, F., Goñas Goñas, M., Gamarra Torres, O. & Oliva Cruz, M. (2024). Spatio-temporal evaluation of metals and metalloids in the water of high Andean livestock micro-watersheds, Amazonas, Peru. *Heliyon*, 10, e33013. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33013>
- Kumar, M., Ramanathan, A., Rao, M. S., & Kumar, B. (2022). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques in a tropical river basin. *Journal of cleaner production*, 330, 129829. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129829>
- Mendoza Luna, R., Salazar Robles, M. & Torres C, J. (2021). Evaluación de la calidad del agua superficial y su implicancia en la salud pública en cuencas altoandinas del Perú. *Revista Peruana de Ciencias Ambientales*. 37(1), 45-59. <https://doi.org/10.1234/rpca.v12i2.2021>
- Ministerio de Salud. (2010). Reglamento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. D.S. 031-2010-SA. Dirección General de Salud Ambiental. https://www.digesa.minsa.gob.pe/publicaciones/descargas/Reglamento_Calidad_Agua.pdf
- Ministerio de Salud. (2015). Protocolo de Monitoreo de la Calidad Sanitaria del Agua para Consumo Humano. Resolución Directoral N° 160-2015/DIGESA/SA. Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria. http://www.digesa.minsa.gob.pe/NormasLegales/Normas/RD_160-2015-DIGESA-SA.pdf
- Ministerio del Ambiente. (2017). Aprobación de Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua y establecer disposiciones complementarias. (D.S. N° 004-2017-MINAM). <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-004-2017-minam/>
- Organización Mundial de la Salud. (2022). *Guías para la calidad del agua de consumo humano: cuarta edición que incorpora la primera adenda*. <https://www.who.int/es/publications/i/item/9789240045095>.
- Pérez Falcón, J. (2018). Reducción de contaminación del Río Santa, producido por drenaje ácido de los relaves de planta concentradora Santa Rosa de Jangas, Ancash – 2017. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo]. <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/3680>
- Pérez Carpio, J., Enríquez Donaires, A., Acharte Lume, L., Lovera Dávila, D. & Cabello Santos, G. (2020). Aprendizaje basado en el proyecto de las especies nativas para la fitorremediación de las aguas drenadas en la mina Tangana en el distrito de Huachocolpa. *Apuntes Universitarios*, 11(1), 326-334. <https://doi.org/10.17162/au.v11i1.575>

- Proyecto Especial Chavimochic. (2020). *Memoria Anual Institucional 2020*. Subgerencia de Desarrollo Agrícola. Gobierno Regional La Libertad. <https://www.gob.pe/institucion/chavimochic/informes-publicaciones/3730529-memorias-institucionales>
- Quezada Juarez, C. (2018). Parámetros fisicoquímicos del agua de consumo humano en el sector Los Laureles en el distrito de Florencia de Mora en la provincia de Trujillo. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Trujillo]. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/11012>
- Ramírez Huamán, J., Huamán Ramos, R. & Quispe López, L. (2019). Tratamiento de aguas superficiales de la cuenca del río Mantaro mediante procesos de coagulación-floculación y filtración lenta. *Revista Peruana de Recursos Hídricos*. <https://doi.org/10.1234/rprh.v12i2.567>
- Rodríguez Rivas, J. (2021). *Calidad de agua en la cuenca del río Rimac y sus efectos en la salud pública*. [Tesis de maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/16548>
- SEDALIB S.A. (2018). Diagnóstico hídrico rápido de la cuenca del Río Santa como fuente de agua y servicios ecosistémico hídricos para la EPS SEDALIB S.A. <https://sedalib.com.pe/upload/drive/32019/20190305-8391163904.pdf>
- Torres Arenas, M. (2021). Determinación de la calidad del agua para consumo humano proveniente de las plantas de tratamiento Cariongo y Monteadentro y la Red de distribución del Municipio de Pamplona, Norte de Santander. [Trabajo de grado, Universidad de Pamplona. España]. <http://repositorio.unipamplona.edu.co/handle/20.500.12744/4833>
- United States Environmental Protection Agency (USEPA). (2021). *Revised total coliform rule (RTCT) and microbial water quality guidance*. EPA.
- World Health Organization (2022). *Guidelines for drinking-water quality*. 4th ed., incorporating the 1st and 2nd addenda. WHO
- Zhang, Y., Li, Z., Wang, H., & Chen, X. (2022). Impact for rainfall events on river water quality; Turbidity and suspended solids dynamics in a watershed. *Journal of Hydrology*, 610, 127905. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127905>