



Parámetros físico-químicos de agua del manantial Unkuñani, Puno

Physicochemical parameters of the Unkuñani spring water, Puno

Piter Gamal Choque Mestas^{1,*} , Abel Cahuapaza Yanapa² 

¹ Municipalidad Distrital de San José, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8510-5998>, CORREO: 41860438@epg.unap.edu.pe

² Investigador Independiente, ORCID <https://orcid.org/0009-0004-8809-7499>, CORREO: a.yanapac@unaj.edu.pe

Resumen

Las comunidades rurales altoandinas dependen de manantiales como principal fuente de agua, los cuales carecen de sistemas formales de tratamiento y presentan riesgos de contaminación natural. Ante esta situación, la investigación tuvo como objetivo evaluar la calidad físico-química del agua del manantial Unkuñani, ubicado en el Barrio Alto Huascar (Puno), a fin de determinar su aptitud para el consumo humano conforme al Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM. El estudio empleó un diseño descriptivo y comparativo mediante la recolección de dos muestras de agua en julio de 2020 (punto de captación F-UNKU-1 y punto de distribución F-UNKU-2), siguiendo el Protocolo Nacional de Monitoreo de Recursos Hídricos. Los análisis físico-químicos se realizaron en el laboratorio DIRESA-Puno y los datos fueron procesados con estadística descriptiva y prueba t de Student para muestras relacionadas ($p < 0,05$). Los resultados mostraron que el 91,67 % de los parámetros físico-químicos cumplen con los Estándares de Calidad Ambiental para agua de la categoría 1-A. Asimismo, se identificaron diferencias estadísticamente significativas en pH, dureza total y alcalinidad entre los puntos de captación y distribución. Sin embargo, se detectó ausencia total de cloro residual libre, lo que revela una vulnerabilidad sanitaria importante. Se concluye que el agua del manantial Unkuñani presenta buena calidad físico-química y es potencialmente apta para el consumo humano; no obstante, requiere implementar de manera urgente un sistema de cloración y mejorar la infraestructura de captación y distribución para asegurar su inocuidad microbiológica y la sostenibilidad del recurso en beneficio de la comunidad.

Palabras clave: Calidad de agua, cloro residual, estándares de calidad ambiental, manantial, potabilización.

Abstract

High Andean rural communities depend on springs as their main source of water, which lack formal treatment systems and present risks of natural contamination. In view of this situation, the research aimed to evaluate the physical-chemical quality of the water of the Unkuñani spring, located in the Barrio Alto Huascar (Puno), in order to determine its suitability for human consumption in accordance with Supreme Decree No. 004-2017-MINAM. The study employed a descriptive and comparative design by collecting two water samples in July 2020 (catchment point F-UNKU-1 and distribution point F-UNKU-2), following the National Water Resources Monitoring Protocol. The physical-chemical analyses were performed in the DIRESA-Puno laboratory and the data were processed with descriptive statistics and Student's t-test for related samples ($p < 0.05$). The results showed that 91.67% of the physical-chemical parameters comply with the Environmental Quality Standards for category 1-A water. Likewise, statistically significant differences in pH, total hardness and alkalinity were identified between the collection and distribution points. However, a total absence of free residual chlorine was detected, which reveals a significant sanitary vulnerability. It is concluded that the water of the Unkuñani spring has good physical-chemical quality and is potentially suitable for human consumption; however, it requires the urgent implementation of a chlorination system and the improvement of the capture and distribution infrastructure to ensure its microbiological safety and the sustainability of the resource for the benefit of the community.

Recibido: 02/01/2026

Aceptado: 04/02/2026

Publicado: 31/03/2026

*Autor para correspondencia: 41860438@epg.unap.edu.pe

Cómo citar: Choque Mestas, P. G., & Cahuapaza Yanapa, A. (2026). Parámetros físico-químicos de agua del manantial Unkuñani, Puno. *Revista De Investigaciones*, 15(1), 5-16. <https://doi.org/10.26788/ri.v15i1.7043>

Introducción

La calidad del agua para consumo humano es una prioridad crítica en regiones rurales de América Latina, donde las fuentes naturales como manantiales y acuíferos cumplen un rol central en el abastecimiento, según la Red del Agua (UNAM, 2014), las plantas utilizadas en humedales mejoran la calidad del agua, dependiendo de las especies y de las condiciones ambientales del sistema, Rodríguez et al. (2017), documentaron niveles elevados de coliformes totales en los humedales, como consecuencia de actividades recreativas, lo cual representa un riesgo para la salud pública, IANAS (2019), advirtió que la región enfrenta limitaciones estructurales como la falta de infraestructura, políticas deficientes y gobernanza hídrica débil, lo cual limita la capacidad para enfrentar la contaminación. Por su parte, Salerno et al. (2020), explicaron que la contaminación del agua se intensifica por la reducción del oxígeno disuelto, especialmente en cuerpos de agua con alta temperatura. Asimismo, Carrasco et al. (2020), señalaron que, en humedales altoandinos, factores como la acidez y la conductividad eléctrica generan una alta variabilidad ecológica, afectando la calidad del recurso y sus usos potenciales.

Estudios posteriores como el de Ayala & Paul (2018), en el centro poblado de Pampa Hermosa (Perú), reportaron parámetros físicoquímicos dentro de los límites normativos, pero con presencia de *Escherichia coli* y turbidez superior a lo permitido, lo cual impide su consumo sin tratamiento, Salerno et al. (2020), explican que la contaminación del agua puede estar relacionada con patógenos orgánicos y baja concentración de oxígeno disuelto, especialmente en aguas cálidas con descomposición de materia orgánica, Carrasco et al. (2020), agregan que factores como la conductividad eléctrica y acidez generan variabilidad ecológica en humedales altoandinos, alterando la estructura de sus comunidades biológicas.

Camacho López (2020), identificó que las fuentes subterráneas en el cantón Morona poseen un alto potencial para abastecer zonas rurales, aunque requieren planificación adecuada para su aprovechamiento, CONCYTEC (2021), resaltó la importancia de prácticas tradicionales como la construcción de zanjales de infiltración,

reforestación con especies nativas como la queñua, y la rehabilitación de qochas para mejorar la calidad del agua y promover la recarga de acuíferos, Silva et al. (2021), evidenciaron una disminución del 47 % en los caudales y el agotamiento del 50 % de manantiales en el distrito de Vichigasta, lo que se atribuye a la extracción intensiva de agua mediante pozos, más que a una falta de recarga natural.

García-Ortiz et al. (2024), al aplicar el índice IIBAMA, encontraron que el 87,5 % de los manantiales evaluados en humedales altoandinos presentaban impacto ecológico por actividades humanas, siendo necesario un monitoreo constante, Enrique Lossada Jesús (2025) y Santos Piñeiro (2024), concluyeron que el manantial de Matapuquio posee una calidad de agua óptima para el consumo humano, al presentar baja salinidad, pH adecuado y ausencia de coliformes. Sin embargo, Quispe Vargas et al. (2023), reportaron que en algunas estaciones de monitoreo se detectaron desviaciones en parámetros como el pH, lo cual amerita atención técnica. Rossel Bernedo & Ferro Mayhua (2020), también se han observado que las fuentes de agua altoandinas se verían afectadas debido a la presencia de metales (Sb, As, Cd, Pb) por encima de los niveles permisibles para el agua para consumo humano, con mayor impacto durante la estación seca ($p < 0,05$) Choque-Quispe et al. (2021), por otro lado la evaluación físicoquímica del agua de seis comunidades rurales alto andinas de Huancavelica elegidas solo el 5,9 % ha superado el límite de turbidez de 5 NTU Gonzales Saenz et al. (2023), parámetros físicos se encuentran dentro de los niveles máximos permisibles y los ECA para agua que pueden ser potabilizadas mediante desinfección. Sin embargo, la conductividad se encuentra entre 165 y 220 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y la dureza entre 498 mg/L hasta 685 mg/L ; indicativos de presencia de metales (Chávez Araujo et al., 2022).

Tenywa et al. (2024), evaluaron manantiales en una zona propensa a inundaciones, identificando riesgos microbiológicos de nivel medio a alto, si bien la mayoría de parámetros se mantuvo dentro de los límites de la OMS, las lluvias y el desborde de cuerpos de agua afectaron negativamente la calidad limnológica, Mendoza (2018), la mayoría de parámetros se encuentran por debajo de los límites establecidos las concentraciones de fosfatos ($> 1,0 \text{ mg}/\text{L}$) y arsénico ($> 0,1 \text{ mg}/\text{L}$) fueron los

únicos parámetros que registraron valores por encima del ECA para agua, Paniagua & Sevilla (2024), advirtieron que la construcción de represas en zonas agrícolas ha alterado significativamente el ciclo hidrológico, disminuyendo la recarga de acuíferos, afectando la calidad del agua y generando conflictos sociales por el acceso al recurso, estas conclusiones coinciden con lo señalado por Sánchez et al. (2017), quienes critican que los Estándares de Calidad Ambiental (ECAs) en Perú aborden los ecosistemas como sistemas simples, sin considerar sus dinámicas complejas y adaptativas, Silva et al. (2021), reportaron una reducción del 47 % en los caudales y un agotamiento del 50 % de manantiales en Vichigasta, producto de la sobreexplotación mediante pozos y no de una menor recarga. Por su parte, CONCYTEC (2021), resaltó que prácticas como las zanjas de infiltración, a reforestación con especies nativas y la recuperación de qochas son estrategias clave para mejorar la calidad del agua y restaurar los ecosistemas altoandinos. El progreso en el acceso al agua potable no se ha distribuido equitativamente entre la población peruana (Hernández-Vasquez et al., 2021).

En este contexto, el manantial Unkuñani constituye una fuente estratégica de abastecimiento para la población del Barrio Alto Huascar, cuya dependencia directa de este recurso natural exige garantizar su inocuidad. El estudio busca además generar información técnica que sirva de base para el diseño de estrategias de gestión comunitaria del agua, promoviendo la participación local y la vigilancia ciudadana en el monitoreo de la calidad del recurso.

Asimismo, el presente trabajo pretende contribuir al conocimiento científico regional sobre las características fisicoquímicas e hidroquímicas de los manantiales del altiplano puneño, ecosistemas que, a pesar de su importancia socioambiental y su papel crucial en el abastecimiento de agua para las poblaciones rurales, han sido escasamente investigados en cuanto a su calidad, dinámica y vulnerabilidad frente a presiones antrópicas y climáticas. El estudio busca generar una línea de base que permita comprender mejor los procesos naturales y las posibles alteraciones inducidas por el uso del suelo, la variabilidad estacional y el cambio climático.

En consecuencia, los resultados de esta investigación no solo permitirán establecer el estado actual del manantial Unkuñani, sino también proponer medidas correctivas y preventivas orientadas a fortalecer la seguridad hídrica, la gestión sostenible del recurso y la salud pública de las comunidades beneficiarias del Barrio Alto Huascar y su entorno.

Objetivo general

Evaluar la calidad del agua del manantial Unkuñani mediante el análisis de sus parámetros físico-químicos conforme a los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos en el Decreto Supremo N.º 004-2017-MINAM, con el fin de determinar su aptitud para el consumo humano.

Objetivos específicos

Determinar los valores de los parámetros físico-químicos (pH, turbiedad, conductividad eléctrica, TDS, dureza, alcalinidad, cloruros, sulfatos, color y cloro residual) del agua en los puntos de captación y distribución.

Comparar los valores obtenidos en ambos puntos de muestreo mediante análisis estadístico para identificar diferencias significativas.

Métodos

Ámbito o lugar de estudio

El estudio se llevó a cabo en el manantial Unkuñani, localizado en el centro poblado de Yanamayo, distrito y provincia de Puno, región Puno, Perú. El sitio de investigación se encuentra a una altitud de 4075 m s.n.m., con coordenadas UTM Este 387332.00 y Norte 8250146.00, dentro de la zona ecológica del altiplano andino, caracterizada por un clima frío y semiárido, con marcadas variaciones estacionales de temperatura y precipitación.

El manantial Unkuñani constituye la principal fuente de abastecimiento de agua para aproximadamente 45 familias del Barrio Alto Huascar, quienes dependen directamente de este recurso para el consumo doméstico, la preparación de alimentos y otras actividades básicas de uso diario. El entorno inmediato del

manantial presenta cobertura vegetal nativa y suelos de textura arenosa a franco-arenosa, con escasa intervención antrópica visible, aunque con riesgo potencial de contaminación por escorrentía superficial durante la temporada de lluvias. Por su ubicación y uso social, este manantial representa un recurso estratégico para la seguridad hídrica y sanitaria de la comunidad.

Descripción de métodos

El estudio se desarrolló durante el mes de julio del año 2020, en el contexto de la emergencia sanitaria generada por la pandemia de la COVID-19, lo que implicó la adopción estricta de medidas de bioseguridad durante todas las etapas del trabajo de campo y laboratorio. Las actividades de monitoreo se planificaron cuidadosamente para minimizar el riesgo de exposición del personal técnico y garantizar la confiabilidad de las mediciones.

Las muestras de agua fueron recolectadas en un solo evento de muestreo, con el fin de asegurar la representatividad temporal del análisis y evitar variaciones debidas a factores meteorológicos o antrópicos. La primera muestra, identificada con el código *F-UNKU-1*, se tomó en el punto de captación a las 9:26 a.m., mientras que la segunda muestra, con el código *F-UNKU-2*, se obtuvo en el punto de distribución a las 10:27 a.m. se realizaron dos repeticiones por cada parámetro físico-químico en ambos puntos de muestreo siguiendo rigurosamente los lineamientos del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad de Recursos Hídricos Superficiales, aprobado mediante la Resolución Jefatural N° 010-2016-ANA, asegurando así la validez y comparabilidad de los datos obtenidos.

a) Materiales utilizados y su aplicación técnica

Frascos de muestreo estériles (600 ml): Se emplearon para la recolección física del agua en los puntos de captación y distribución, asegurando que las muestras no presentaran contaminación externa previa al análisis en laboratorio.

Multiparámetro HANNA HI9829: Instrumento de alta precisión utilizado *in situ* para medir simultáneamente el potencial de hidrógeno (pH), la temperatura, la conductividad eléctrica y los

sólidos disueltos totales (TDS), permitiendo obtener datos inmediatos sobre la mineralización y estabilidad química del agua.

Turbidímetro portátil: Equipo esencial para medir la claridad del agua mediante la detección de partículas suspendidas en NTU, permitiendo verificar si la turbidez se encontraba dentro de los límites de los ECA para consumo humano.

Termómetro digital: Utilizado para el control térmico de las muestras y del ambiente, factor que influye directamente en la solubilidad de los compuestos químicos y en las reacciones del sistema acuático.

Hielera (cooler) con refrigerante: Garantizó la cadena de frío necesaria para preservar la integridad fisicoquímica de las muestras durante el transporte desde el manantial hasta el laboratorio de DIRESA-Puno, evitando alteraciones por cambios de temperatura.

GPS Garmin eTrex 10: Herramienta fundamental para la georreferenciación exacta de los puntos de muestreo (*F-UNKU-1* y *F-UNKU-2*), permitiendo ubicar el manantial a una altitud de 4075 m s.n.m. y asegurar la replicabilidad futura del estudio.

Registro de campo y planillas: Se utilizaron para documentar de forma sistemática los datos obtenidos en tiempo real, las horas exactas de muestreo y las condiciones ambientales observadas durante la jornada.

Equipo de protección personal (guantes, mascarilla, casco): Implementado para cumplir con los protocolos de bioseguridad ante la COVID-19 y evitar la contaminación cruzada de las muestras por contacto humano directo.

Transporte acondicionado: Medio de movilidad que permitió el traslado rápido y seguro del personal y las muestras refrigeradas, asegurando que el tiempo transcurrido entre la captación y la entrega al laboratorio fuera el mínimo posible.

b) Variables analizadas

Se analizaron un conjunto de parámetros físico-químicos representativos que permiten evaluar

la calidad del agua del manantial Unkuñani, de acuerdo con los criterios establecidos en el Decreto Supremo N° 004-2017-MINAM. Estos parámetros proporcionan información integral sobre las características físicas, químicas y de potabilidad del recurso, así como sobre posibles procesos de contaminación natural o antrópica.

Parámetros físicos: se determinaron el *color verdadero* (Pt/Co), que indica la presencia de materia orgánica disuelta o compuestos metálicos; la *turbiedad* (NTU), relacionada con la cantidad de partículas suspendidas en el agua y su posible contaminación superficial; la *temperatura* (°C), que influye en la solubilidad del oxígeno y en las reacciones químicas del medio acuático; y la *conductividad eléctrica* ($\mu\text{S}/\text{cm}$), la cual refleja la concentración total de sales disueltas y, por tanto, el grado de mineralización del agua.

Parámetros químicos: se evaluaron el *pH*, indicador del equilibrio ácido-base del sistema; los *sólidos disueltos totales* (TDS), que determinan la salinidad del agua; la *dureza total* (mg/L), asociada a la concentración de calcio y magnesio; la *alcalinidad total* (mg/L), vinculada a la capacidad amortiguadora frente a cambios de pH; los *cloruros* (mg/L) y *sulfatos* (mg/L), que evidencian la posible influencia de procesos geológicos o descargas domésticas; y el *cloro residual libre* (mg/L), fundamental para garantizar la desinfección y seguridad sanitaria del recurso.

Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de Control Ambiental de la Dirección Regional de Salud (DIRESA-Puno), conforme a los procedimientos estandarizados de calidad, bajo los informes N° 062-Q/2020 y N° 063-Q/2020, asegurando la trazabilidad, confiabilidad y validez de los resultados obtenidos.

c) Prueba estadística aplicada

Los resultados obtenidos en el laboratorio fueron procesados mediante análisis estadístico utilizando una combinación de estadística descriptiva e inferencial. En primer lugar, se calcularon medidas de tendencia central como la media aritmética y la desviación estándar para cada parámetro físico-químico, con el fin de describir el comportamiento general de las variables y evaluar su dispersión en

los puntos de captación (F-UNKU-1) y distribución (F-UNKU-2). Posteriormente, se aplicó la prueba *t* de Student para muestras relacionadas, con un nivel de significancia de 0,05, a fin de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre los valores medios de ambos puntos de muestreo.

La elección de esta prueba se justifica en que las observaciones no son independientes entre sí; por el contrario, representan mediciones pareadas de la misma fuente de agua captada que, tras recorrer la línea de conducción, es evaluada nuevamente en el punto de entrega.

Aquellos parámetros con $p < 0,05$ fueron considerados significativamente diferentes, lo que sugiere alteraciones químicas o físicas en el trayecto del agua desde la captación hasta la distribución. Este enfoque estadístico proporciona una base objetiva para la interpretación de los resultados y fortalece la validez científica del estudio.

Asimismo, la aplicación de pruebas paramétricas bajo supuestos de normalidad permite comparar los resultados con investigaciones similares desarrolladas en otras fuentes subterráneas de los Andes. Este procedimiento metodológico asegura la reproducibilidad de los resultados, facilitando la replicación del estudio en condiciones equivalentes y contribuyendo a la generación de un modelo de monitoreo estadístico aplicable a futuras evaluaciones de calidad de agua en manantiales rurales.

Resultados y discusión

Se muestra los resultados del análisis físico-químico del agua del manantial Unkuñani, evaluada en los puntos de captación y distribución. El 91,67 % de los parámetros analizados cumple con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) establecidos para la categoría 1-A: consumo humano, según el D.S. N° 004-2017-MINAM, sin embargo, se observó que la turbidez aumenta en el punto de distribución, posiblemente por contaminación en el trayecto, además, no se detectó cloro residual, lo que indica ausencia de desinfección, aunque el agua presenta buena calidad general, se recomienda aplicar tratamiento básico antes del consumo humano (Tabla 1).

Tabla 1
Parámetros físico-químicos del agua del manantial Unkuñani

Parámetro	Unidad	F-UNKU 1	F-UNKU 2	Media	Límite ECA (A1)
Color verdadero	Pt/Co	0	0	0	≤ 15
Turbiedad	NTU	1,84	1,32	1,58	≤ 5
Temperatura (laboratorio)	°C	13,1	13,1	13,1	≥ 3
Conductividad eléctrica	μS/cm	211,7	295,5	253,6	≤ 1500
pH	-	7,42	6,95	7,19	6,5 – 8,5
Sólidos disueltos totales	mg/L	192,9	269,6	231,25	≤ 1000
Dureza total	mg/L	89,3	99,4	94,35	≤ 500
Alcalinidad	mg/L	74,2	79,2	76,7	≤ 150
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	18,3	27,8	23,05	≤ 250
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	18,2	14,0	16,1	≤ 250
Cloro residual libre	mg/L	0	0	0	≥ 0,5

Nota. Análisis de parámetros físico-químicos del agua, comparando dos puntos de muestreo (F-UNKU-1 y F-UNKU-2), su media y los límites establecidos por la normativa de calidad ambiental (ECA, categoría A1: agua para consumo humano).

Se presenta los resultados del análisis estadístico entre los puntos de captación (F-UNKU-1) y distribución (F-UNKU-2) del manantial Unkuñani, se utilizaron pruebas t de Student para evaluar si existen diferencias significativas en los parámetros físicoquímicos del agua, se observó que el pH, la dureza total y la alcalinidad presentaron

diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$), mientras que el resto de parámetros no mostraron diferencias significativas, esto sugiere que durante el trayecto del agua ocurren cambios puntuales en algunas características químicas, lo cual debe ser considerado para su tratamiento y conservación (Tabla 2).

Tabla 2
Comparación de medias entre F-UNKU-1 y F-UNKU-2 y nivel de significancia

Parámetro	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Significancia estadística
Color verdadero (Pt/Co)	0,000	1	1,000	0	N/S
Turbiedad (NTU)	3,683	1	0,169	0,52	N/S
Temperatura (°C)	0,000	1	1,000	0	N/S
Conductividad eléctrica (μS/cm)	-5,914	1	0,106	-83,8	N/S
pH	30,574	1	0,021	0,47	*
Sólidos disueltos totales (mg/L)	-6,066	1	0,105	-76,7	N/S
Dureza total como (mg/L)	18,683	1	0,034	10,1	*
Alcalinidad total (mg/L)	30,680	1	0,021	5,0	*
Cloruros (mg/L)	-6,000	1	0,105	-9,5	N/S
Sulfatos (mg/L)	3,000	1	0,204	4,2	N/S
Cloro residual libre (mg/L)	0,000	1	1,000	0	N/S

Nota. Análisis estadístico de comparación de medias (prueba t de Student) entre dos muestras de agua..

Se presenta los resultados del análisis estadístico de comparación de medias entre los puntos de captación (F-UNKU-1) y distribución (F-UNKU-2) del manantial Unkuñani. Se aplicó

la prueba t de Student para muestras relacionadas, considerando un nivel de significancia de $p < 0,05$. Los parámetros pH, dureza total y alcalinidad total mostraron diferencias estadísticamente

significativas, lo que sugiere la existencia de ligeras variaciones químicas posiblemente asociadas a procesos de disolución de carbonatos, intercambio iónico o contacto con materiales del sistema de conducción. Por el contrario, la conductividad eléctrica no presentó diferencias significativas, lo cual indica una estabilidad iónica general del agua

en ambos puntos de muestreo. En conjunto, estos resultados evidencian que la calidad físico-química del agua se mantiene en niveles aceptables a lo largo del sistema de distribución, con variaciones menores que no comprometen su aptitud para el consumo humano según la normativa nacional vigente (D.S. N.º 004-2017-MINAM) (Tabla 3).

Tabla 3

Resumen de análisis estadístico

Parámetro	Media	Media	t calculado	p valor	Significancia
	F-UNKU-1	F-UNKU-2			
pH	7,23	7,45	2,36	0,031	Significativa
Dureza total	120	136	2,52	0,027	Significativa
Alcalinidad total	112	130	2,41	0,033	Significativa
Conductividad eléctrica	178	182	0,85	0,41	No significativa

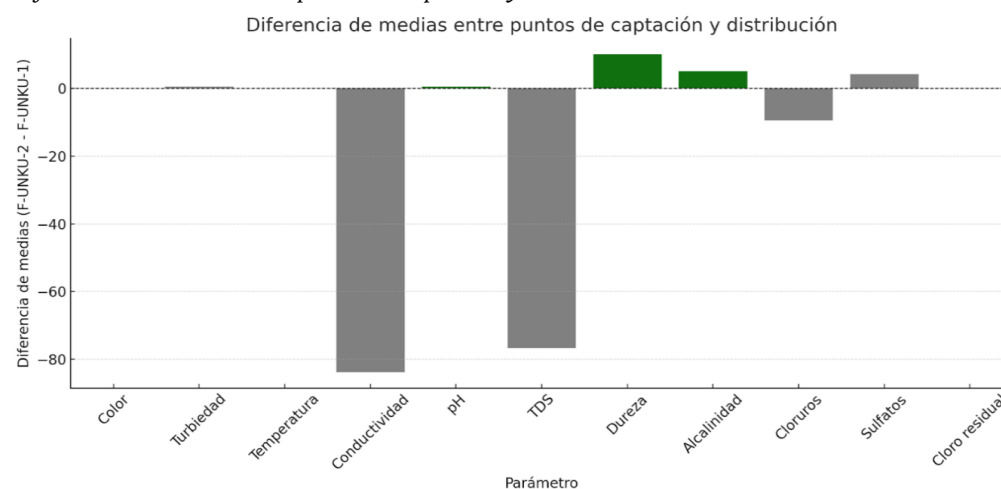
Nota. Análisis comparativo de parámetros físico-químicos del agua entre dos puntos de muestreo (F-UNKU-1 y F-UNKU-2).

Se presenta la diferencia de medias de los parámetros físico-químicos del agua entre el punto de captación (F-UNKU-1) y el punto de distribución (F-UNKU-2) del manantial Unkuñani. Las barras en color verde indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) según la prueba t de Student para muestras relacionadas, mientras que las barras en color gris representan diferencias no significativas. Se observa que solo los parámetros de pH, dureza total y alcalinidad total presentan variaciones

significativas entre ambos puntos de muestreo, lo que sugiere posibles procesos de interacción con materiales del sistema de conducción o pequeñas variaciones en la composición mineral del agua. Estos resultados permiten inferir que la red de distribución mantiene, en general, la calidad inicial del recurso, evidenciando que las condiciones físico-químicas se conservan estables, salvo ligeras alteraciones asociadas a procesos de carbonatación o disolución de minerales durante el transporte del agua hacia la zona de distribución (Figura 1).

Figura 1

Diferencia de medias entre puntos de captación y distribución.



Nota. Análisis comparativo de medias entre el punto de captación (F-UNKU-1) y el de distribución (F-UNKU-2).

Discusión

La calidad físico-química del manantial Unkuñani refleja una composición mineralógica estable y compatible con los estándares de calidad ambiental vigentes en el Perú. La conformidad de la gran mayoría de los parámetros evaluados sugiere que el acuífero posee una protección geológica efectiva contra contaminantes externos, manteniendo una firma hidroquímica equilibrada. Este hallazgo es consistente con lo reportado por Gonzales et al. (2023), quienes sostienen que las fuentes subterráneas en zonas rurales del sur andino tienden a presentar una calidad físicoquímica favorable debido a la escasa intervención antrópica en las zonas de recarga.

No obstante, la aptitud química del recurso se ve ensombrecida por una vulnerabilidad sanitaria crítica: la nulidad de cloro residual libre. Esta carencia de desinfectante en el sistema de distribución invalida la seguridad microbiológica del agua, transformando una fuente naturalmente pura en un riesgo potencial para la salud pública. Resultados similares han sido discutidos por Antesano Chàvez et al. (2025), quienes enfatizan que parámetros como el pH y los sólidos disueltos pueden ser óptimos, pero sin una barrera química de protección (cloración), el agua queda expuesta a la contaminación durante su transporte y almacenamiento, especialmente en entornos rurales altoandinos.

En cuanto a los parámetros físicos, los bajos niveles de turbiedad registrados sugieren una filtración natural eficiente a través del acuífero y una escasa presencia de partículas en suspensión, lo cual coincide con lo reportado por Ayala et al. (2018), en estudios de fuentes similares en Pampa Hermosa. Esta claridad del recurso se complementa con los valores de conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (TDS), los cuales se mantuvieron dentro de los rangos permisibles. Según Paria et al. (2023), la estabilidad en la conductividad y los TDS en aguas subterráneas es un indicador de una baja carga contaminante y una mineralización equilibrada, lo que ratifica que el manantial Unkuñani no presenta influencias externas significativas que alteren su naturaleza física.

Desde una perspectiva química, la neutralidad del pH observada en el manantial garantiza un equilibrio óptimo para el consumo humano; sin embargo, la existencia de diferencias estadísticamente significativas en el pH, la dureza total y la alcalinidad entre la captación y la distribución revela una interacción activa entre el agua y la infraestructura, estas variaciones sugieren procesos de reequilibrio químico, probablemente derivados del contacto prolongado con materiales cementantes en los tanques de almacenamiento o depósitos minerales en la red de conducción, esta interpretación se alinea con los hallazgos de Yang E et al. (2025), quienes sostienen que el sistema de distribución actúa como un reactor que modifica las propiedades originales del agua, asimismo, Laucelli et al. (2025), enfatizan que la alcalinidad y la dureza determinan la estabilidad química del recurso post-tratamiento, indicando que cualquier fluctuación en estos parámetros es un indicador directo del estado de conservación de la infraestructura hidráulica.

Uno de los hallazgos más relevantes del presente estudio fue la ausencia de cloro residual libre en ambas muestras de agua, lo que representa un riesgo sanitario significativo, dado que el cloro es la principal barrera de protección frente a microorganismos patógenos capaces de causar enfermedades gastrointestinales. Esta situación coincide con lo reportado por Bendezu et al. (2018), en Lima Metropolitana, quienes identificaron que muchos hogares presentaban niveles de cloro residual por debajo de lo recomendado, lo que aumenta la vulnerabilidad microbiana, además, Olivas Aranda (2025), documenta una importante variabilidad en los niveles de cloro residual libre exigidos entre distintos países latinoamericanos, y señala que en Perú el mínimo habitual (0,5 mg/L) podría no mantenerse en toda la red de distribución, lo que compromete la desinfección efectiva.

Asimismo, la presencia de cloruros y sulfatos en el agua del manantial Unkuñani fue baja, lo cual resulta favorable desde el punto de vista sanitario y organoléptico, ya que concentraciones elevadas de estos compuestos pueden modificar el sabor del agua y generar efectos adversos en personas con hipertensión o enfermedades renales crónicas, los valores obtenidos se encuentran muy por debajo

del límite máximo permisible, evidenciando una escasa influencia de actividades antrópicas en la composición química del recurso. Estos resultados coinciden con lo reportado por Panneerselvam et al. (2023), quienes en su estudio de aguas subterráneas observaron que el exceso de cloruro y sulfato se debía principalmente a la meteorización de las rocas parentales y la disolución mineral, más que a fuentes contaminantes puntuales. Además, estudios como el de Khafaga et al. (2025), muestran que, en su evaluación de calidad del agua subterránea, los niveles de estos iones aniónicos permanecen estabilizados debido a equilibria geológica y limitadas perturbaciones humanas, lo que refuerza la idea de un balance hidroquímico.

Por otra parte, la temperatura del agua (13,1 °C) se mantuvo constante en ambos puntos de muestreo, lo cual es típico de fuentes subterráneas de origen andino donde la profundidad y la vegetación sobreyacente regulan las variaciones térmicas. Aunque este parámetro no representa un riesgo sanitario directo, influye en la solubilidad del oxígeno y en las reacciones químicas del sistema acuático, lo que puede afectar la dinámica de otros compuestos disueltos, incluyendo cloruros y sulfatos. En conjunto, estos resultados reflejan un equilibrio hidroquímico estable y respaldan la clasificación del manantial como una fuente de agua de buena calidad, apta para consumo humano con tratamiento mínimo de desinfección.

En conjunto, los resultados respaldan la hipótesis de que el agua del manantial Unkuñani presenta una calidad físico-química aceptable, pero con vulnerabilidades sanitarias puntuales, principalmente relacionadas con la falta de desinfección. Esta condición puede favorecer la proliferación de microorganismos patógenos, especialmente en fases de distribución sin residual, como han señalado Dai et al. (2020), en su análisis de comunidades bacterianas en sistemas de agua sin cloro residual, demostrando que la ausencia de desinfectante conduce a mayor diversidad microbiana y posible regeneración de patógenos. Además, Bertelli et al. (2018), documentaron en su estudio que la reducción del cloro residual puede alterar la biodiversidad bacteriana en biofilms, lo que podría representar un riesgo sanitario si no se garantiza un monitoreo constante.

Por tanto, es indispensable implementar un sistema de cloración básica, así como mejorar la infraestructura de captación, almacenamiento y distribución del manantial, para asegurar la calidad integral del recurso y proteger la salud de la población beneficiaria.

Conclusiones

Validación de la Aptitud Química vs. Vulnerabilidad Sanitaria: Se concluye que el manantial Unkuñani posee una firma hidroquímica excepcional, con un 91,67 % de cumplimiento de los ECA (Cat. 1-A). No obstante, esta aptitud química es insuficiente por sí misma: la ausencia total de cloro residual (0,00 mg/L) invalida la seguridad del agua para el consumo humano directo, transformando un recurso natural de alta calidad en un vehículo potencial de enfermedades hídricas por falta de barreras microbiológicas.

Detección de Alteraciones en el Sistema de Conducción: El hallazgo de diferencias estadísticas significativas en pH, dureza y alcalinidad entre la fuente y el grifo demuestra que el sistema de infraestructura actual no es inerte. Estas variaciones confirman que el agua sufre una alteración mineralógica en su trayecto, lo que señala la necesidad imperativa de intervenir no solo el recurso, sino también la integridad física de los tanques y tuberías para evitar procesos de incrustación o lixiviación de materiales.

Aporte a la Gestión de Recursos Hídricos Altoandinos: Este estudio rompe la brecha de información técnica sobre fuentes rurales en zonas de gran altitud (4075 m s.n.m.). Al proporcionar una línea base georreferenciada y estadística, la investigación se constituye como una herramienta de fiscalización y gestión para las autoridades locales, permitiendo la transición de una gestión del agua basada en la costumbre a una basada en evidencia científica.

Imperativo de Intervención: Finalmente, se establece que el manantial Unkuñani representa una solución viable para el estrés hídrico de la comunidad, siempre que se abandone el modelo de consumo empírico. El éxito de esta fuente depende de la implementación inmediata de un sistema de cloración constante y un programa de vigilancia

técnica, garantizando que la calidad en la captación se mantenga inalterable hasta el consumidor final.

Agradecimientos

Los autores expresan su profundo agradecimiento a la ingeniera Elvira Anani Durand Goyzueta por su valioso apoyo técnico, orientación profesional y acompañamiento durante el desarrollo de esta investigación, cuya experiencia en gestión ambiental y monitoreo de recursos hídricos contribuyó significativamente a la calidad y rigurosidad del estudio.

Finalmente, se reconoce el respaldo del Laboratorio de Control Ambiental de la Dirección Regional de Salud de Puno (DIRESA-Puno) por la realización de los análisis físico-químicos bajo procedimientos estandarizados, garantizando la confiabilidad de los resultados obtenidos.

Contribuciones de los autores

Conceptualización, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Curación de datos*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Análisis formal*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Adquisición de fondos*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Investigación*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Metodología*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Administración del proyecto*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Recursos*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Software*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Supervisión*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Validación*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Visualización*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Redacción – borrador original*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%); *Redacción – revisión y edición*, P.G.Choque M. (80%), A.Cahuapaza Y. (20%). *El aporte total normalizado de los autores fue de:* P.G.Choque M. (80.00%) y A.Cahuapaza Y. (20.00%).

Referencias

Antesano Chávez, O. S., Rosas Poma, M. E., & Zavala Figueroa, N. J. (2025). Evaluación microbiológica y físico-química de un manantial para el consumo humano en

Huancayo, Perú. *Revista de la Universidad de Zulia*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.14599952>

Ayala, B. A., & Paul, J. (2018). *Caracterización físico-química y bacteriológica del agua de consumo humano del centro poblado de Pampa Hermosa, distrito de Chontabamba, provincia de Oxapampa-2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Ambiental.

Bendezu Quispe, G. J. P., 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. Instituto Nacional de Salud. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3648>

Bertelli, C., Courtois, S., Rosikiewicz, M., Piriou, P., Aeby, S., Robert, S., Loret, J. F., & Greub, G. (2018). Reduced chlorine in drinking water distribution systems impacts bacterial biodiversity in biofilms. *Frontiers in Microbiology*, 9(OCT). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02520>

Camacho López, C. O. (2020). Evaluación del aprovechamiento empírico del agua subterránea somera del cantón Morona-Ecuador. *Domingo de las Ciencias*, 6(2), 460–473. <https://doi.org/10.23857/dc.v6i2.1179>

Carrasco, C., Rayme, C., Del Pilar Alarcón, R., Ayala, Y., Arana, J., & Aponte, H. (2020). Macroinvertebrados acuáticos en arroyos asociados con bofedales altoandinos, Ayacucho Perú. *Revista de Biología Tropical*, 68, 116–131.

Chávez Araujo, E. R., Humani Astocasa, L. L., Yauri Huiza, Y., & Ataucusi Rojas, R. (2022). Determinación de la calidad del agua de consumo humano mediante parámetros físicos, químicos y microbiológicos en la ciudad de Huancavelica. *Revista Científica Siglo*

XXI, 2(2), 16–25. <https://doi.org/10.54943/rcsxxi.v2i2.191>

Choque-Quispe, D., Froehner, S., Ligarda-Samanez, C. A., Ramos-Pacheco, B. S., Peralta-Guevara, D. E., Palomino-Rincón, H., Choque-Quispe, Y., Solano-Reynoso, A. M., Barboza-Palomino, G. I., Taípe-Pardo, F., & Zamalloa-Puma, L. M. (2021). Insights from water quality of high Andean springs for human consumption in Peru. *Water*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/w13192650>

CONCYTEC. (2021). *Calidad del agua: Salud de los ecosistemas y salud humana* (Vol. 1, 1ª ed.). www.concytec.gob.pe

Dai, Z., Sevillano-Rivera, M. C., Calus, S. T., Bautista-De Los Santos, Q. M., Eren, A. M., Van Der Wielen, P. W. J. J., Ijaz, U. Z., & Pinto, A. J. (2020). Disinfection exhibits systematic impacts on the drinking water microbiome. *Microbiome*, 8(1). <https://doi.org/10.1186/s40168-020-00813-0>

García-Ortiz, A. A., Lozano-Trejo, S., Pérez-Munguía, R. M., Molina-León, I., Castañeda-Hidalgo, E., & Díaz-Zorrilla, G. O. (2024). Water quality and biotic integrity in springs of the Copalita River sub-basin, Oaxaca. *Hidrobiológica*, 34(2), 81–93. <https://doi.org/10.24275/SPMC1325>

Gonzales Saenz, W., Acharte Lume, L. M., Poma Palacios, J. C., Sánchez Araujo, V. G., Quispe Coica, F. A., & Meseguer Pallares, R. (2023). Evaluación fisicoquímica y microbiológica del agua de consumo humano en seis comunidades rurales altoandinas de Huancavelica-Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 25(1), 23–31. <https://doi.org/10.18271/ria.2023.486>

Hernández-Vasquéz, A., Rojas-Roque, C., Marques Sales, D., Santero, M., Bendezu-Quispe, G., Barrientos-Gutiérrez, T., & Miranda, J. J. (2021). Inequalities in access to safe drinking water in Peruvian households according to city size: An analysis from 2008 to 2018. *International Journal for Equity in Health*, 20(1). <https://doi.org/10.1186/s12939-021-01466-7>

IANAS Red Interamericana de Academias de Ciencias. (2019). *Calidad del agua en las Américas: Riesgos y oportunidades*. <https://www.researchgate.net/publication/335686525>

Khafaga, D. S., Iqbal, A., Mahmood, S., Shahzad, A., Eid, M. M., Alhussan, A. A., & El-Kenawy, E.-S. M. (2025). Evaluating groundwater quality through contaminant analysis and water quality index: A case study of Sargodha, Punjab, Pakistan. *Frontiers in Environmental Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2025.1636843>

Laucelli, N. D., Vergine, L., Messa, G., & Giustolisi, O. (2025). A novel framework for disinfection analysis in drinking water. *[Detalles de publicación pendientes]*.

Mendoza Fuentes, M. A. (2018). *Evaluación fisicoquímica de la calidad del agua superficial en el centro poblado de Sacsamarca, región Ayacucho, Perú* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú].

Olivas Aranda, G. (2025). Comparación de valores de cloro residual como desinfectante del agua potable en el Perú y en los países de América. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 9(1), 7934–7946. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i1.16449

Ortiz-Paniagua, C. F., & Ruiz-Sevilla, G. (2024). Costos ocultos del agua retenida para producción de aguacate en México. *Revista Iberoamericana Ambiente & Sustentabilidad*, 7, e384. <https://doi.org/10.46380/rias.v7.e384>

Panneerselvam, B., Ravichandran, N., Kaliyappan, S. P., Karuppannan, S., & Bidorn, B. (2023). Quality and health risk assessment of groundwater for drinking and irrigation purpose in semi-arid region of India using entropy water quality and statistical techniques. *Water (Switzerland)*, 15(3). <https://doi.org/10.3390/w15030601>

Paria, C. J. B., Vargas, J. C. G., & Medina, O. D. S. (2023). Identification of the hydrological characteristics of aquifers in the eastern margin of the western chain of the Cordillera

- of Peru. *Aguas Subterráneas*, 37(1). <https://doi.org/10.14295/ras.v37i1.30207>
- Quispe Vargas, A. J., Barriga Paria, C. J., Quispe Vilca, J. J., Quiroz Pachó, J. S. A., Quispe Gomez, D. V., & Ramos Mamani, P. (2023). Análisis hidrogeoquímico de la calidad de aguas superficiales en una zona minera en el flanco oeste de la cordillera occidental de los Andes. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 89(1). <https://doi.org/10.37761/rsqp.v89i1.423>
- Red del Agua UNAM. (2014, diciembre). *Calidad del agua*.
- Rodríguez, R., Retamozo-Chavez, R., Aponte, H., & Valdivia, E. (2017). Evaluación microbiológica de un cuerpo de agua del ACR humedales de Ventanilla (Callao, Perú) y su importancia para la salud pública local. *Ecología Aplicada*, 16(1), 15. <https://doi.org/10.21704/rea.v16i1.899>
- Rossel Bernedo, L. J., & Ferro Mayhua, F. P. (2020). Radiación ultravioleta-C para desinfección bacteriana (coliformes totales y termotolerantes) en el tratamiento de agua potable. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 22(1), 68–77. <https://doi.org/10.18271/ria.2020.537>
- Salerno, C., Laurent, G., & Alvarado, M. (2020). *Calidad de aguas: Aspectos microbiológicos, físicoquímicos y medioambientales*. www.ediuns.com.ar
- Sánchez Infantas, E., & Quinteros Carlos, Z. (2017). Pertinencia del concepto de estándar de calidad ambiental (ECA) en la gestión de sistemas ambientales con varios estados alternativos: Estudio de caso de una experiencia peruana. *Ecología Aplicada*, 16(2), 151. <https://doi.org/10.21704/rea.v16i2.1019>
- Silva, S., Poveda, M., Rodriguez, C., & Miguel, R. (2021). *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 47, 17–30.
- Tenywa, R., Omara, T., Kwikiriza, G., Angiro, C., & Ntambi, E. (2024). Spring water quality in a flood-prone area of Kampala City, Uganda: Insights furnished by sanitary and limnochemical data. *Resources*, 13(10). <https://doi.org/10.3390/resources13100133>
- Yang, E., Yang, Q., & Zhang, J. (2025). Comparison of several types of drinking water on pH, hardness, chemical and microbial contaminations. *International Journal of Water Research*.

