

Gobernanza del agua para consumo humano: un análisis desde el enfoque de su calidad y propuestas para una gestión hídrica sostenible en la cuenca baja del río Moquegua, Perú

Water governance for human consumption: an analysis from the perspective of its quality and proposal for sustainable water management in the lower basin of the Moquegua River, Perú

Governação da água para consumo humano: uma análise na perspectiva da sua qualidade e propostas para a gestão sustentável da água na bacia inferior do rio Moquegua, Peru

ARTÍCULO ORIGINAL

Melissa Vilca-Mamani¹ 

mvilcam.espg@unjbg.edu.pe

Edwin Pino-Vargas² 

epinov@unjbg.edu.pe

Pablo Franco-León³ 

pfrancol@unjbg.edu.pe



¹Programa Doctoral en Recursos Hídricos. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, Perú.

²Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, Perú

³Laboratorio de Procesos Ecológicos, Grupo de Investigación de Zonas Áridas, Desiertos y Cambio Climático (ADERIZA), Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, Perú

Escanea en tu dispositivo móvil
o revisa este artículo en:

<https://doi.org/10.33996/revistaalfa.v10i28.436>

Artículo recibido: 12 de noviembre 2025 / Arbitrado: 27 de diciembre 2025 / Publicado: 7 de enero 2026

RESUMEN

El estudio evaluó la calidad del agua para consumo humano en la cuenca baja del río Moquegua (Perú), en un contexto de presión urbana, agrícola y minera, y estimó la influencia de la gobernanza hídrica —eficiencia institucional, actividad regulatoria y cumplimiento de planes GIRH— durante 2020–2024. Con enfoque cuantitativo, longitudinal y correlacional-explicativo, se analizaron cinco estaciones mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA), parámetros microbiológicos, metales pesados (As, Pb, Cd) y el índice biótico BMWP/Col. Los resultados muestran una calidad críticamente deficiente en el tramo bajo: los coliformes termotolerantes exceden sistemáticamente los estándares ambientales aplicables y el estado ecológico se clasifica entre "Pobre" y "Crítico". La regresión múltiple indica que la gobernanza predice significativamente la calidad ($R^2_{aj} = 0.58$). La actividad regulatoria (fiscalización) fue el predictor dominante ($\beta = 0.61$; $p < 0.001$) y se asoció inversamente con la contaminación microbiológica ($r = -0.71$), evidenciando un efecto disuasorio. La eficiencia institucional también fue significativa ($\beta = 0.30$), mientras que el cumplimiento formal de los planes GIRH no presentó un efecto estadístico directo. Se concluye que la mejora de la calidad del agua en la cuenca baja depende de una gobernanza aplicada, priorizando fiscalización sostenida y gestión institucional eficiente para reducir riesgos sanitarios y favorecer la recuperación ecológica.

Palabras clave: Calidad del agua; Agua para consumo humano; Gobernanza hídrica; Río Moquegua

ABSTRACT

Water is essential for public health and human development, however its availability in sufficient quantity and adequate quality has declined in semi arid basins under increasing anthropogenic pressure, therefore this study assessed water quality for human consumption in the lower Moquegua River basin and estimated the influence of water governance through three factors, institutional efficiency, regulatory activity and compliance with IWRM plans, during 2020–2024, using a quantitative, longitudinal and correlational explanatory approach, water quality was determined through a Water Quality Index, microbiological indicators, heavy metals and the BMWP/Col bioindicator index, results showed a critical deterioration in the lower reach, with thermo tolerant coliforms exceeding applicable environmental standards and an ecological status classified as poor to critical, multiple regression indicated that water governance significantly predicts water quality with adjusted $R^2 = 0.58$, highlighting regulatory activity as the most influential factor with $\beta = 0.61$ and $p < 0.001$, additionally a negative correlation with microbiological contamination was observed with $r = -0.71$, suggesting a strong deterrent effect, institutional efficiency was also significant with $\beta = 0.30$, whereas formal compliance with IWRM plans showed no direct statistical influence, in conclusion improving water quality in the lower Moquegua River basin depends on applied governance, prioritizing active enforcement and efficient institutional management over merely declarative planning, as a key strategy to mitigate health and ecological risks.

Key words: Water quality; Water governance; Regulatory enforcement; Bioindication; Moquegua River

RESUMO

Este estudo avaliou a qualidade da água potável na bacia do baixo rio Moquegua (Peru), num contexto de pressões urbanas, agrícolas e mineiras, e estimou a influência da governação da água — eficiência institucional, atividade regulatória e conformidade com os planos de GIRH (Gestão Integrada dos Recursos Hídricos) — durante o período de 2020 a 2024. Utilizando uma abordagem quantitativa, longitudinal e correlacional-explicativa, foram analisadas cinco estações através do Índice de Qualidade da Água (IQA), parâmetros microbiológicos, metais pesados (As, Pb, Cd) e o índice biótico BMWP/Col. Os resultados mostram uma qualidade da água criticamente fraca nos troços inferiores: os coliformes termotolerantes excedem consistentemente os padrões ambientais aplicáveis, e o estado ecológico é classificado entre "Mau" e "Crítico". A regressão múltipla indica que a governação prediz significativamente a qualidade da água (R^2 ajustado = 0,58). A atividade reguladora (fiscalização) foi o principal preditor ($\beta = 0,61$; $p < 0,001$) e apresentou uma associação inversa com a contaminação microbiológica ($r = -0,71$), demonstrando um efeito dissuasor. A eficiência institucional foi também significativa ($\beta = 0,30$), enquanto a conformidade formal com os planos de GIRH (Gestão Integrada dos Recursos Hídricos) não apresentou um efeito estatístico direto. Conclui-se que a melhoria da qualidade da água na bacia inferior depende de uma governação eficaz, dando prioridade à fiscalização contínua e a uma gestão institucional eficiente para reduzir os riscos para a saúde e promover a recuperação ecológica.

Palavras-chave: qualidade da água, água potável, governação da água, rio Moquegua

INTRODUCCIÓN

El acceso a agua segura sostiene salud pública y ODS, Hong, Kumar (1), señalan que la gobernanza define resultados, Merheb, Moussa (2), describen que el clima y la actividad humana intensifican la escasez, la Organización Mundial de la Salud (3), estima que 2.2 mil millones carecen de agua gestionada segura, Walsh y Ward (4), muestran que la regulación condiciona el control de contaminantes, y Rosso (5), advierte riesgos por arsénico y nitratos, por ello este trabajo analiza la cuenca baja del río Moquegua.

En contextos geográficos vulnerables, como las cuencas semiáridas del sur del Perú—incluida la cuenca baja del río Moquegua—, la escasez de agua se agrava por la contaminación, comprometiendo la aptitud del recurso para el consumo humano (6). Diversos estudios en cuencas altoandinas peruanas, como la del río Chumbao evaluada por Choque, Ligarda (7), han identificado que la calidad del agua es seriamente afectada por el sistema antrópico, tal como describe Sánchez y Vega (8), destacando la influencia de las descargas de aguas residuales, la agricultura y la actividad minera.

La principal brecha de calidad en estos ecosistemas radica en la contaminación microbiológica (coliformes), que excede los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) y representa un riesgo sanitario significativo, como señalan (9). Adicionalmente, las concentraciones

de metales pesados como arsénico y cadmio son una preocupación constante; Saifullislam, Kawsar (10), reportan la persistencia de estos elementos tanto de origen geogénico como antrópico. Esto coincide con estudios realizados en ríos de la macrorregión andina sur, como el Suches analizado por Salas, Chaiña (11). La evaluación de la calidad química también puede complementarse mediante índices específicos para determinar la aptitud del agua para consumo, como proponen Das (12), y Soueilem, N'diaye (13).

Para obtener una perspectiva integral de la salud del ecosistema fluvial, la evaluación de la calidad del agua se complementa con el uso de bioindicadores ecológicos. Los macroinvertebrados bentónicos, a través de índices bióticos, son herramientas valiosas para reflejar la calidad del agua a largo plazo, como señala Lazo, Piscoya (14). Investigaciones recientes en cuencas peruanas, como el río Tambo estudiado por Coayla, Cheneaux (15), el río Cañipia evaluado por Jimenez, Mendoza (16), y los humedales de Callali-Oscollo documentados por Coayla, Cheneaux (15), han demostrado que la degradación de la comunidad de macroinvertebrados está directamente asociada con el aumento de la contaminación orgánica y la toxicidad. Este patrón también se observa mediante otros bioindicadores como las diatomeas epilíticas, utilizadas en el estudio de Motta y Ranilla (17).

Frente a esta compleja problemática, la gobernanza de la gestión hídrica emerge como un factor determinante para la seguridad del agua y la mejora de la calidad ambiental. Hong, Kumar (1), destacan que la gobernanza efectiva está directamente asociada con mejores resultados ambientales, mientras que Walsh y Ward (4), ejemplifican cómo los marcos regulatorios condicionan el control de la contaminación. La gobernanza del agua, entendida como el conjunto de reglas, instituciones, políticas y mecanismos de participación que estructuran la toma de decisiones, es esencial para reducir los contaminantes y asegurar el cumplimiento de la normativa Fahad, Jasim (9), y Rowbottom, Graversgaard (18). Estudios en grandes cuencas internacionales, como los realizados por Qiao, Schmidt (19), han vinculado directamente una gobernanza efectiva con resultados positivos en la calidad de las aguas superficiales. Asimismo, Nedachi, Oporto (20), destacan que las influencias sociales y gubernamentales son clave para una gestión efectiva, incluso en el monitoreo participativo.

Un enfoque innovador de gobernanza debe comprender la coordinación y los acuerdos institucionales a escala global, y basarse en un conjunto de axiomas que guíen la toma de decisiones y las acciones de los diversos actores involucrados en cuestiones relacionadas

con el agua (5). A pesar de las mejoras que se vienen consiguiendo en el ámbito internacional, la normativa actual necesita adaptarse a los conocimientos científicos más recientes, en especial para los parámetros que pueden afectar a la salud (21). La gobernanza del agua se basa en principios como el derecho humano al agua, la equidad, la sostenibilidad, la participación, la transparencia y la rendición de cuentas (22). Modelos internacionales (como los Principios de Dublín y las directrices de la OCDE) enfatizan la gestión integrada, la participación de múltiples actores y la consideración del agua como bien común, no solo como mercancía (23).

Es evidente entre los expertos en la materia que las actividades humanas están alterando profundamente la salud y el funcionamiento de los ecosistemas de agua dulce, alejándolos de su estado natural (24). La contaminación de las cuencas expone a las personas, al cadmio en la parte norte del Perú, al plomo en la central y al arsénico en el sur (25). Al sur de Perú, los resultados, basados en evidencia científica, muestran que las condiciones actuales y futuras del agua subterránea del acuífero Caplina, Tacna, no son sostenibles y que, por lo tanto, las políticas públicas no son efectivas para revertir esta situación (26).

En Perú, la implementación de planes de gestión, como la Gestión Integrada de Recursos

Hídricos (GIRH), busca abordar estos desafíos; sin embargo, persisten brechas que sugieren la necesidad de evaluar empíricamente cómo las dimensiones de gobernanza inciden en los resultados ambientales a escala local. Este estudio tiene como objetivo analizar la calidad del agua para consumo humano en la cuenca baja del río Moquegua durante el periodo 2020–2024, y evaluar la influencia de factores clave de gobernanza (eficiencia institucional, número de inspecciones regulatorias y grado de cumplimiento de planes de GIRH) sobre dicha calidad. La investigación considera dos dimensiones: (1) parámetros físicos y químicos y (2) contaminantes biológicos (incluyendo el índice biótico de macroinvertebrados). Los hallazgos buscan contribuir al entendimiento de la relación entre

la gobernanza y la calidad del agua en contextos andinos semiáridos, proporcionando información útil para la gestión pública y la formulación de políticas que garanticen agua segura para las comunidades locales.

MÉTODO

El presente estudio adopta un enfoque cuantitativo con un diseño no experimental, longitudinal y correlacional-explicativo. La investigación es longitudinal al analizar datos de calidad del agua y variables de gobernanza a lo largo de cinco años (2020–2024) y es correlacional-explicativa al buscar establecer la relación y el grado de influencia de las variables de gobernanza sobre la calidad del agua.

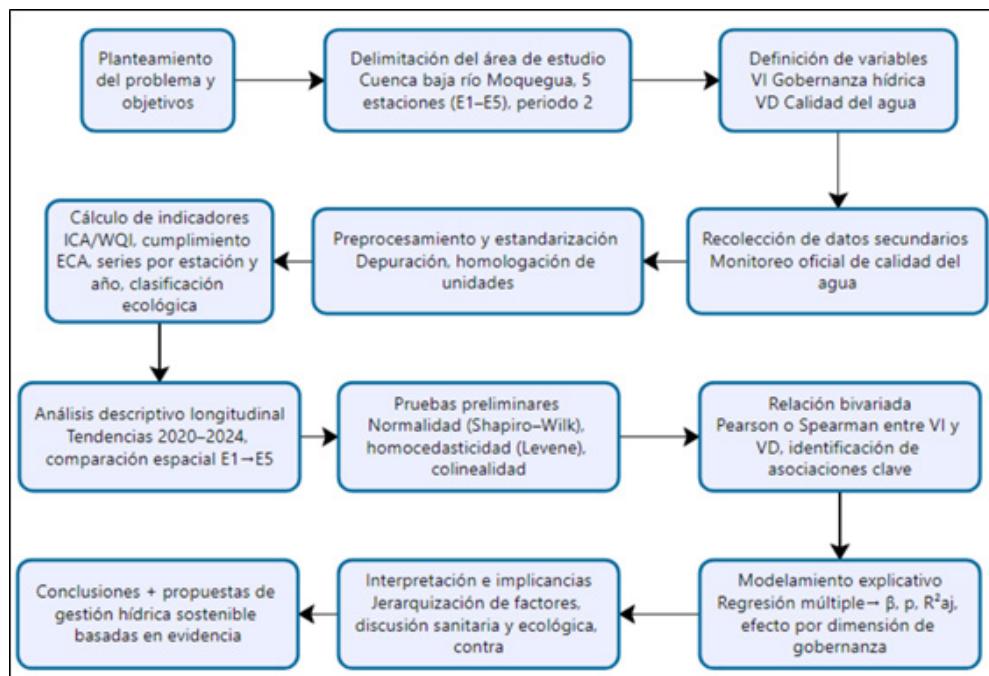


Figura 1. Esquema metodológico.

Área de Estudio y Período

El estudio se focaliza en la Cuenca Baja del Río Moquegua, ubicada en la región de Moquegua, Perú, un área que presenta características hídricas de estrés y vulnerabilidad ambiental, tal como señalan Nina y Román (6), en su análisis geoespacial. La selección de esta subcuenca se justifica por su relevancia como fuente de

agua para consumo humano en la zona urbana y agrícola, y por la presión antrópica que recibe, evidenciada en los trabajos sobre la influencia de la PTAR en la parte baja de la intercuenca del río Moquegua (27). La Figura 1 muestra la ubicación del departamento de Moquegua en el mapa de Perú y en la Figura 2, muestra la zona de estudio en el ámbito de la cuenca del río Moquegua.

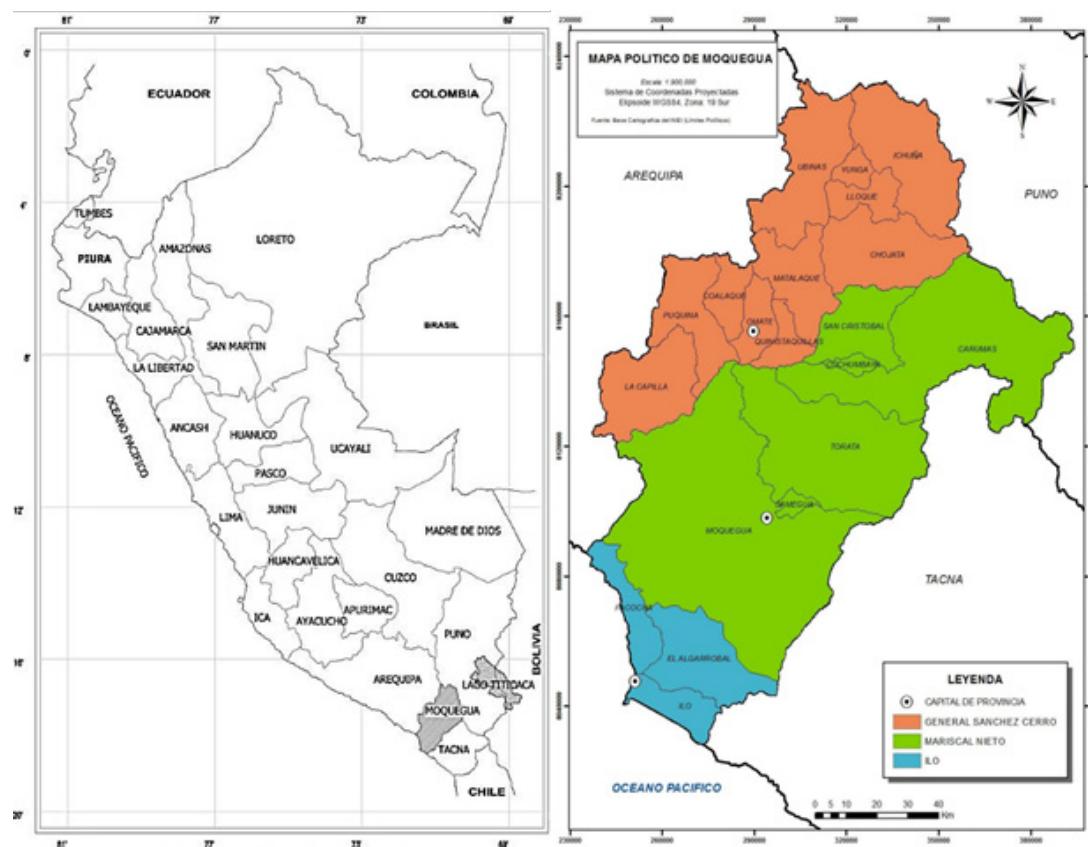


Figura 2. Mapa del Perú zonificación del departamento de Moquegua. Note. Panel (a) shows the location of the Moquegua department within the national territory of Peru. Panel (b) depicts the study area in the lower Moquegua River basin.



Figura 3. Zona de estudio en el ámbito de la cuenca del río Moquegua.

El período de análisis abarca desde el año 2020 hasta el 2024, permitiendo capturar tendencias temporales en la calidad del agua y la evolución de los esfuerzos de gobernanza hídrica aplicados.

Clústeres temáticos dominantes y variables de estudio

El análisis de la literatura de referencia (2021–2025) revela dos clústeres temáticos dominantes que convergen en este estudio:

Clústeres temáticos

Calidad del Agua y Bioindicación en el Contexto Andino: Existe una producción constante sobre la contaminación en cuencas altoandinas de Perú, focalizada en metales pesados y contaminación orgánica, como reportan Sánchez y Vega (8), Salas, Chaiña (11), y Choque, Ligarda (7). La literatura

confirma la creciente importancia del uso de macroinvertebrados bentónicos y sus índices (BMW/COL) como herramientas esenciales para la bioindicación y evaluación ecológica en los ecosistemas peruanos, desarrollada por Coayla, Cheneaux (15), y Jimenez, Mendoza (16).

Gobernanza y Seguridad Hídrica: La investigación reciente subraya la complejidad de la gobernanza, destacando la necesidad de evaluar estructuras multinivel, como demuestran Rowbottom, Graversgaard (18); el papel de la regulación activa en la calidad del agua, discutida por Walsh y Ward (4); y la influencia de la participación social en el monitoreo de la calidad hídrica, destacada en el estudio de Nedachi, Oporto (20). Estos trabajos confirman que la gobernanza es un factor crítico para el cumplimiento de los

ODS y la seguridad hídrica, tal como enfatizan Hong, Kumar (1), y Hairunnisa y Ern (28).

Variables de estudio

Variable Independiente. La gobernanza hídrica se operacionalizó mediante la recopilación y el análisis de indicadores clave para el periodo 2020–2024, tomando como sustento marcos conceptuales de gestión y aprendizaje institucional en cuencas, además de enfoques de gobernanza multinivel, en esa línea Hong, Kumar (1), destacan la gobernanza como vía para resultados sostenibles, asimismo Gerlak, Karambelkar (29), enfatizan la gestión del conocimiento en decisiones públicas, y Rowbottom, Graversgaard (18), evidencian barreras por legados institucionales.

La eficiencia institucional. Se evaluó mediante indicadores de capacidad técnica disponible, coordinación interinstitucional y presupuesto asignado a la gestión de la calidad del agua, de modo que se refleje la aptitud real para planificar, ejecutar y sostener intervenciones en el tramo bajo, además se consideró la consistencia operativa de los equipos responsables, así como la disponibilidad de recursos para monitoreo y respuesta, con énfasis en la continuidad anual de acciones durante 2020–2024.

La actividad regulatoria. Se cuantificó a partir del número de acciones de fiscalización, monitoreos de cumplimiento y sanciones aplicadas por la autoridad competente en la cuenca baja, por lo tanto se construyó un indicador anual que integra inspecciones y medidas correctivas, buscando capturar el nivel de enforcement efectivo, en esa línea Coayla, Cheneaux (15), resaltan la sensibilidad ecológica a presiones antrópicas, por ello la fiscalización se asume como mecanismo de control de fuentes contaminantes.

El cumplimiento de planes GIRH. Se midió a través del grado de implementación de metas y acciones previstas en el Plan de Gestión de Recursos Hídricos de la cuenca, por consiguiente se registró el avance anual de actividades programadas y su evidencia documental, además se verificó la ejecución de componentes vinculados a saneamiento, monitoreo y recuperación ambiental, de manera que el indicador represente cumplimiento efectivo y no solo formal, permitiendo contrastar planificación declarativa frente a resultados observables en calidad del agua.

Variable dependiente. Calidad del Agua para Consumo Humano La calidad del agua fue evaluada a partir de tres componentes principales:

Parámetros físico-químicos y microbiológicos.

Incluyen pH, Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5) (Fahad et al., 2025), Coliformes Termotolerantes y Sólidos Suspendidos Totales.

Metales pesados. Se monitorearon las concentraciones de Arsénico (As), Plomo (Pb) y Cadmio (Cd), debido a la relevancia de estas sustancias en cuencas andinas afectadas por actividades mineras o geogénicas (10, 11).

Índice biótico. La calidad ecológica del río se evaluó mediante el análisis de macroinvertebrados bentónicos.

Recolección y análisis de datos

El estudio utilizó datos de monitoreo oficial proporcionados por entidades ambientales del Perú (ANA, MINAM y DIGESA) correspondientes al tramo de la cuenca baja. Las muestras fueron analizadas en laboratorios acreditados y comparadas con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Agua en sus categorías 1 (poblacional y recreacional) y 3 (riego de vegetales). Para una valoración integral, los parámetros físico-químicos y metales se integraron mediante el Índice de Calidad del Agua (ICA/WQI), siguiendo metodologías aplicadas en estudios de

microcuencas andinas, como los desarrollados por Das (12), Soueilem, N'diaye (13), y Choque, Ligarda (7).

En paralelo, la calidad ecológica se evaluó mediante macroinvertebrados bentónicos, reconocidos como bioindicadores del estado del ecosistema fluvial. Se aplicó el índice BMWP/Col, validado para ecosistemas neotropicales y altoandinos del Perú por Motta y Ranilla (17). La recolección e identificación de organismos siguió protocolos estandarizados y la clasificación final se interpretó según las categorías de calidad establecidas por este índice.

Análisis de la relación gobernanza-calidad

Los datos recolectados de calidad del agua (ICA, contaminantes específicos, puntaje BMWP/Col) y los indicadores de gobernanza (Eficiencia Institucional, Actividad Regulatoria, Cumplimiento GIRH) se someterán a un riguroso análisis estadístico para determinar la naturaleza y la magnitud de la relación entre ambas variables, siguiendo el diseño longitudinal de la investigación.

Estadística descriptiva y pruebas preliminares

Se utilizará la estadística descriptiva (medias, desviaciones estándar, coeficientes de variación, boxplots) para caracterizar las variables a lo largo del período 2020–2024. Esto permitirá identificar

tendencias temporales, la estacionalidad y la variabilidad en la contaminación y en los esfuerzos de gestión. Las pruebas de Normalidad (Shapiro-Wilk) y Homogeneidad de varianzas (Levene) se aplicarán a los datos para seleccionar las pruebas de inferencia más adecuadas, particularmente cruciales para el análisis de los parámetros bióticos y fisicoquímicos.

Análisis de Correlación Bivariado

Se emplearán coeficientes de Correlación de Spearman o Pearson (dependiendo de la distribución de los datos) para medir la fuerza y dirección de la asociación lineal entre pares de variables. Este paso es fundamental para establecer la base empírica de la hipótesis, buscando correlaciones específicas y teóricamente relevantes, tales como:

La asociación entre el índice de actividad regulatoria (ej. número de inspecciones y sanciones) y la disminución en los niveles de contaminación microbiológica (Coliformes

Termotolerantes) y/o metales pesados, en línea con la necesidad de asegurar el cumplimiento normativo (4).

La relación entre la eficiencia institucional y los indicadores de calidad ecológica (puntaje BMWP/Col) y global (ICA).

Modelado de regresión para la influencia predictiva

El núcleo del análisis reside en la aplicación de modelos de regresión, que permitirán determinar la influencia predictiva de los indicadores de gobernanza sobre la Calidad del Agua.

Dada la naturaleza longitudinal de los datos (observaciones repetidas en la cuenca baja del río Moquegua a lo largo de 5 años), se privilegiará el uso de Modelos de Regresión Múltiple o Modelos de Datos de Panel (si el diseño espacial y temporal lo permite) para explotar la dimensión de series de tiempo de la información y minimizar el riesgo de sesgo por variables omitidas. La estructura general del modelo se planteará de la siguiente manera:

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1(Eficiencia\ institucional) + \beta_2(Actividad\ regulatoria) + \beta_3(Cumplimiento\ G) \quad (1)$$

Donde Y_t representa el Índice de Calidad del Agua (ICA) en el tiempo t , Para capturar distintas dimensiones del fenómeno, se estimaron modelos independientes: (i) un modelo con el Índice de Calidad del Agua (ICA) como variable dependiente, que refleja la condición global del recurso, y (ii) un modelo alternativo con la concentración logarítmica de contaminantes críticos (coliformes termotolerantes y arsénico), orientado a evaluar riesgos sanitarios específicos. Los coeficientes $\beta_1+\beta_2+\beta_3$ medirán la magnitud y significancia estadística del impacto de cada dimensión de gobernanza, permitiendo:

Cuantificar el peso específico de la institucionalidad y la regulación en los resultados ambientales.

Controlar la influencia de variables de confusión (ej. caudal hídrico promedio anual, precipitación, o cambios poblacionales), asegurando que el efecto observado se atribuya a la gobernanza.

Este enfoque metodológico se justifica por la necesidad de evaluar estructuras de gobernanza complejas y multinivel, buscando evidencia causal de que la gestión implementada genera resultados ambientales verificables en la calidad del recurso hídrico (1, 18, 19).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Calidad del agua 2020–2024: Descripción general

La Tabla 2, resume los valores observados de los parámetros físico-químicos en las cinco estaciones de monitoreo durante el periodo de estudio. Se presentan los promedios anuales por estación, junto con los rangos mínimos y máximos registrados (entre paréntesis):

Tabla 1. Parámetros físico-químicos del agua en cinco estaciones (E1–E5), periodo 2020–2024.

Parámetro	E1 (upstream)	E2	E3	E4	E5 (downstream)
pH (u.n.)	7.59 (7.55–7.62)	7.75 (7.70–7.87)	7.98 (7.94–8.03)	8.09 (8.01–8.19)	8.24 (8.08–8.38)
OD (mg/L)	8.5 (8.4–8.7)	8.2 (8.0–8.4)	8.0 (7.5–8.6)	7.3 (6.7–8.0)	6.4 (5.4–7.4)
Turbidez (NTU)	1.3 (0.9–1.7)	4.6 (3.8–5.2)	7.4 (5.9–8.6)	10.2 (8.6–11.4)	15.3 (12.8–18.3)
SDT (mg/L)	103.5 (101.1–106.3)	199.2 (196.0–202.4)	289.0 (277.5–299.8)	384.3 (364.3–400.4)	474.2 (447.7–501.1)
Cond. eléctrica (μS/cm)	203.4 (187.1–213.6)	392.5 (381.8–404.6)	589.2 (555.3–631.9)	773.7 (742.5–804.4)	946.6 (892.6–990.8)
Nitratos (mg/L)	1.11 (0.00–2.06)	2.67 (2.13–3.08)	3.91 (3.06–4.83)	6.03 (4.95–7.34)	9.05 (7.15–11.52)
Cloro residual (mg/L)	0.23 (0.20–0.26)	0.19 (0.06–0.34)	0.16 (0.00–0.32)	0.22 (0.00–0.38)	0.25 (0.00–0.49)
Sulfatos (mg/L)	17.4 (14.2–22.8)	30.5 (28.7–31.9)	37.4 (32.6–40.6)	45.3 (40.2–50.0)	52.5 (45.3–62.8)
Cloruros (mg/L)	15.1 (11.8–16.6)	20.1 (18.2–21.9)	29.1 (28.2–30.3)	33.6 (26.7–40.0)	42.8 (35.8–48.1)
Dureza (mg/L CaCO ₃)	52.0 (45.3–61.3)	99.1 (96.2–105.9)	142.6 (135.6–153.5)	189.2 (181.0–198.2)	236.6 (221.7–252.7)

En la Tabla 1, se presenta el valor medio anual y el rango mínimo–máximo entre paréntesis, además se define u.n. como unidades de pH, OD como oxígeno disuelto, NTU como unidades nefelométricas, SDT como sólidos disueltos totales y Cond. como conductividad, asimismo los valores se comparan con los estándares nacionales para agua de consumo humano (ECA Perú, categoría 1), por ello se evidencia que el pH se mantuvo entre 6.5 y 8.5 en todas las estaciones durante 2020–2024.

Respecto al oxígeno disuelto, se mantuvo elevado en E1–E3 con valores ≥ 7.5 mg/L, mientras que río abajo disminuyó hasta un mínimo de 5.4 mg/L en E5, aunque sin descender por debajo de 5 mg/L, por consiguiente, no se alcanza el umbral crítico ecológico, además la turbidez mostró un gradiente espacial marcado, debido a que E1 registró agua muy clara con un promedio de 1.3 NTU, mientras que E5 alcanzó cerca de 15 NTU, superando el valor recomendado de 5 NTU para agua potable.

Los sólidos disueltos y la conductividad aumentaron de forma acumulativa a lo largo del río, por lo tanto se observa un incremento aproximado por tramos asociado a aportes minerales y descargas, de modo que E5 alcanzó 947 μ S/cm, equivalente a 474 mg/L de SDT, además se mantuvo por debajo del límite secundario de 1000 mg/L, en paralelo los nitratos fueron bajos

en cabeceras con 1–4 mg/L en E1–E3, aunque aumentaron hasta 9 mg/L en E5, sin superar el estándar de 10 mg/L.

El cloro residual fue casi nulo en estaciones bajas al inicio del periodo, lo que evidencia ausencia de cloración en fuentes no tratadas, mientras que hacia 2024 se detectaron valores en E4–E5 de hasta 0.4–0.5 mg/L, por ende se infiere la implementación de desinfección en sistemas abastecidos con agua del río, además sulfatos, cloruros y dureza aumentaron de E1 a E5 por geología y entradas antrópicas, aunque permanecieron bajo límites de palatabilidad.

En síntesis, durante 2020–2024 los parámetros físico-químicos clásicos como pH, salinidad y nutrientes se mantuvieron en rangos aceptables según normativa, mientras que la turbidez destacó como el principal incumplimiento en estaciones medias y bajas, por consiguiente el agua presenta una condición química generalmente apta para potabilización, siempre que se priorice la remoción de turbidez y sólidos mediante procesos de clarificación, además de asegurar desinfección efectiva para controlar riesgos sanitarios asociados a la calidad microbiológica.

La Tabla 3, presenta los resultados para los contaminantes de preocupación (biológicos y metales) y el índice BMWP/Col en cada estación. Se observan tendencias espaciales definidas:

Tabla 2. Contaminantes biológicos y metálicos, e índice BMWP/Col, en E1–E5 (2020–2024).

Parámetro	E1	E2	E3	E4	E5
Coliformes (NMP/100 mL)	23 (0–87)	116 (0–172)	767 (564–1050)	3535 (2057–5013)	6016 (2007–9940)
Arsénico (μg/L)	5.22 (5.02–5.53)	5.32 (4.46–5.99)	6.70 (5.51–7.69)	8.62 (6.25–10.79)	12.64 (10.08–16.06)
Plomo (μg/L)	1.01 (0.59–2.05)	2.04 (1.21–2.69)	3.91 (3.44–4.53)	5.38 (4.15–6.21)	7.58 (5.76–9.28)
Cadmio (μg/L)	0.66 (0.47–0.82)	0.95 (0.60–1.16)	1.21 (1.03–1.58)	1.56 (0.85–1.96)	2.62 (1.54–3.23)
Índice BMWP/Col (puntaje)	92.6 (91.4–95.0)	85.1 (79.2–89.3)	67.1 (60.1–75.3)	49.9 (39.1–58.6)	45.4 (30.3–60.7)

En la Tabla 2, se reporta el promedio anual y el rango mín–máx, donde NMP es el número más probable y BMWP/Col el índice biológico basado en macroinvertebrados, así los coliformes termotolerantes muestran un gradiente marcado porque E1 registró conteos bajos o no detectables <1–87 NMP/100 mL mientras las estaciones bajas evidenciaron contaminación fecal severa, en especial al inicio cuando E5 promedió 6000 NMP/100 mL y superó el estándar 0, lo que coincide con reportes previos [4], sin embargo en 2024 los conteos bajaron en E4–E5 hasta 2000 NMP/100 mL con una reducción de 60–80% respecto a 2020, e incluso E1–E2 alcanzaron 0 en ocasiones, lo que sugiere mejoras de saneamiento.

En metales pesados, las concentraciones iniciales en la estación más impactada E5 en 2020 alcanzaron 0.01606 mg/L de As, 0.00928 mg/L de Pb y 0.00323 mg/L de Cd según la Tabla 3, por lo que As 16 μg/L y Cd 3.23 μg/L excedieron los estándares para agua potable 10 μg/L As y 3 μg/L Cd, mientras Pb quedó apenas bajo 0.01 mg/L, en contraste E1 registró ~0.005 mg/L As, <0.002 mg/L Pb y

<0.0008 mg/L Cd atribuibles a geología natural, además entre 2020–2024 la carga disminuyó y en 2024 E5 redujo a 0.010 mg/L As, 0.006 mg/L Pb y 0.0015–0.002 mg/L Cd, lo que podría vincularse a mejores prácticas mineras y remediación en el marco GIRH, aunque el arsénico siguió cerca del umbral sanitario y sugiere tratamiento específico si se destina a consumo.

El índice biológico BMWP/Col corroboró las tendencias físico-químicas, ya que en E1 el puntaje promedió 93 y evidenció una calidad aceptable a buena al situarse cerca del umbral de 100, mientras que hacia E5 el BMWP descendió hasta una media de 45 y clasificó la condición ecológica como regular a mala, lo cual sugiere contaminación orgánica relevante, además esta degradación desde cabecera a desembocadura refleja pérdida de biodiversidad por cargas crecientes, aunque en E5 se observó recuperación parcial al pasar de 30 en 2020 a 60 en 2024, consistente con la mejora reportada por Coayla, Cheneaux (15).

En síntesis, los resultados descriptivos evidencian que durante 2020–2024 la cuenca baja

del río Moquegua registró mejoras notables en la calidad del agua, particularmente por la reducción de la contaminación fecal y de metales pesados en las estaciones más impactadas, sin embargo al cierre del periodo persisten retos críticos porque la turbidez y los coliformes continúan excediendo los estándares de agua potable en E3–E5, por ello el agua cruda aún requiere clarificación y desinfección rigurosa para consumo seguro, además los parámetros inorgánicos se mantuvieron aceptables, mientras el BMWP indica recuperación parcial sin alcanzar buena calidad biológica.

Correlaciones entre variables

El análisis de correlación de Pearson evidenció varias relaciones estadísticamente significativas ($p<0.05$) entre los parámetros de calidad del agua, coherentes con las interacciones fisicoquímicas y las fuentes de contaminación. Destacan los siguientes hallazgos:

Turbidez vs. Coliformes. Se observó una correlación positiva alta ($p<0.01$) entre la turbidez y el \log_{10} de coliformes termotolerantes al considerar todas las muestras. Esto indica que en las estaciones y años con aguas más turbias se registraron mayores niveles de contaminación fecal. Ello es consistente con la idea de que la turbidez en este río está asociada a arrastre de materia orgánica y sólidos provenientes de

descargas domésticas o ganaderas. Así, la turbidez puede servir como un indicador indirecto de riesgo microbiológico.

Oxígeno disuelto vs. contaminantes orgánicos. Se encontró una fuerte correlación negativa entre OD y coliformes ($p<0.05$), y entre OD y turbidez ($r=0.91$). Aguas abajo, donde la carga orgánica es alta, el OD tiende a disminuir debido al consumo de oxígeno por degradación biológica. En cambio, en aguas limpias de cabecera (baja turbidez y coliformes), el OD se mantiene cercano a la saturación. Esto refleja la afectación de la calidad ecológica por la contaminación: ríos con mayor carga contaminante presentan menor oxigenación, perjudicando la biota acuática.

Sólidos disueltos vs. dureza/iones. La conductividad eléctrica mostró alta correlación con SDT ($r>0.99$) de forma esperada, ya que ambos miden contenido iónico disuelto. Asimismo, la dureza, sulfatos y cloruros correlacionaron positivamente entre sí (r entre 0.80–0.95), sugiriendo origen común (minerales disueltos naturales y aportes de retornos de riego). Estas variables aumentan conjuntamente río abajo, evidenciando la acumulación de sales. Ninguna de estas tuvo correlación significativa con los coliformes, lo que implica que la contaminación fecal es independiente de la salinidad (proviene de fuentes puntuales orgánicas, no de salinización).

Metales pesados vs. pH. Se observó una correlación negativa leve entre pH y las concentraciones de arsénico y cadmio, con $r \approx -0.5$ y $p < 0.05$, además las estaciones con pH más alto y ligeramente básico, cercanas a 8.2 en E4–E5, presentaron mayores niveles disueltos de As y Cd, lo que podría explicarse por condiciones geoquímicas donde aguas con mayor pH y carga iónica favorecen la persistencia en solución de ciertos metales, sin embargo la relación no implica causalidad fuerte porque el pH varió en un rango estrecho de 7.5 a 8.4, por ello es plausible que ambos patrones respondan a una fuente común como influencia minera.

Índice BMWP vs. otros indicadores. El BMWP/Col mostró correlación negativa significativa con los niveles de coliformes ($r \approx -0.93$) y con la turbidez ($r \approx -0.89$). Es decir, a mayor contaminación orgánica (y turbidez), menor puntaje biológico, consistente con la sensibilidad de los macroinvertebrados a estas perturbaciones. También hubo correlación positiva moderada entre BMWP y OD ($r \approx 0.85$): tramos bien oxigenados alojan comunidades biológicas más diversas (mayor BMWP). Estos resultados confirman la validez del índice BMWP como reflejo integrado del estado químico-microbiológico del agua.

En suma, las correlaciones evidencian dos síndromes de calidad claramente diferenciados en

la cuenca: (1) Aguas limpias, bien oxigenadas (baja turbidez, bajos coliformes, OD alto, BMWP alto) características de la zona alta (E1–E2), y (2) Aguas contaminadas, turbias y pobres en oxígeno (altos coliformes, alta turbidez, OD bajo, BMWP bajo) en la zona baja (E4–E5). Esta dicotomía coincide con la transición de un ecosistema de cabecera poco intervenido a un río receptor de efluentes urbanos y agrícolas.

Respecto a las variables de gobernanza se halló que estaban fuertemente intercorrelacionadas entre sí con $p < 0.01$, así los años con mayor eficiencia institucional tendieron a coincidir con más inspecciones y mayor cumplimiento del plan GIRH, lo que refleja un fortalecimiento simultáneo en el tiempo, además esta colinealidad era esperada porque los tres indicadores responden a un esfuerzo integrado en la cuenca, por ello sus efectos individuales no se distinguen bien en análisis bivariado, sin embargo se observaron asociaciones relevantes, pues el cumplimiento promedio correlacionó con inspecciones ($r = 0.41$) y con eficiencia ($r = 0.39$)

Regresión lineal múltiple: influencia de la gobernanza en la calidad del agua

Para evaluar de forma conjunta el efecto de las dimensiones de gobernanza sobre la calidad del agua, se ajustó un modelo de regresión lineal múltiple. La variable dependiente fue el porcentaje

de parámetros en cumplimiento de estándares (por estación y año), y las variables predictoras fueron: (X1) Eficiencia institucional (escala 0–100),

(X2) Número de inspecciones anuales, y (X3) % Cumplimiento del plan GIRH. El modelo obtenido se resume en la Tabla 3

Tabla 3. Resultados de la regresión lineal múltiple.

Variable independiente	Coeficiente (B)	Error estándar	p valor	Valor p
Intercepto (constante)	68.9	4.9	0.001 **	<0.001
Eficiencia institucional (pts de 100)	+0.50	0.23	0.030 *	<0.001
Nº de inspecciones (por año)	+0.77	0.34	0.024 *	0.002
Cumplimiento plan GIRH (%)	+0.15	0.08	0.080	<0.001
Promedio ponderado	-	-	52	-

Nota. variable dependiente: % de parámetros de calidad del agua en cumplimiento. B: coeficiente no estandarizado; p: nivel de significancia (p<0.01; * p<0.05; n.s. p>0.05). Estadísticos del modelo: $R^2 = 0.70$ (ajustado $R^2 = 0.65$), estadístico F = 14.8 (gl = 3, 21), p < 0.001.

El modelo global resultó estadísticamente significativo ($p<0.001$) y explica aproximadamente el 70% de la variabilidad observada en la calidad del agua ($R^2 = 0.70$). Esto indica un fuerte poder explicativo de los factores de gobernanza considerados. A continuación, se interpretan los coeficientes estimados de cada variable independiente:

Eficiencia institucional. Presentó un coeficiente $B = +0.50$ con $p = 0.03$, por ello es significativa, además manteniendo constantes las demás variables un aumento de 1 punto en el índice de eficiencia se asocia con +0.50 puntos en el cumplimiento de estándares de calidad, en términos prácticos cuando las instituciones mejoran su capacidad técnica, coordinación y desempeño la calidad del agua también mejora,

así de 2020 a 2024 el índice subió 25 puntos de 60 a 85 y el modelo sugiere un aporte aproximado de 12.5% adicional en cumplimiento, coherente con la tendencia observada.

Número de inspecciones. Obtuvo $B = +0.77$ con $p = 0.024$, por ello es significativo, además cada inspección anual adicional se asocia con +0.77% en el cumplimiento de parámetros de calidad, entre 2020 y 2024 las inspecciones aumentaron en 15 de 5 a 20, y el modelo estima un aporte cercano a 11.5% adicional, lo que sugiere que la fiscalización continua reduce vertimientos y mejora el tratamiento, y con $\beta \approx 0.40$ fue la dimensión más influyente al controlar las demás.

Cumplimiento del plan GIRH. Presentó $B = +0.15$ con $p = 0.08$, por lo tanto no es significativo al 5% aunque sí al 10%, además el coeficiente sugiere que

por cada aumento de 10% en la ejecución del plan el cumplimiento de la calidad del agua subiría en 1.5%, el signo positivo coincide con la expectativa de mejoras por medidas integradas, sin embargo el efecto fue más débil y con mayor incertidumbre que los otros factores, lo que sugiere impactos graduales o diferidos que exceden 2020–2024.

El término constante (intercepto) de 68.9% ($p<0.01$) representa el porcentaje de cumplimiento de calidad de agua esperado cuando las variables de gobernanza son cero (hipotético caso de gobernanza nula). Si bien no tiene un significado práctico directo (pues en 2020 ya había un nivel basal de gobernanza), su magnitud indica que incluso con escasa gobernanza inicial, cierta proporción de parámetros se mantenía dentro de norma (principalmente gracias a condiciones naturales favorables en la cabecera).

En conjunto, estos resultados de regresión apoyan firmemente la hipótesis de investigación: existe una asociación positiva pronunciada entre el mejoramiento de la gobernanza del agua y la

mejora en los indicadores de calidad del agua en la cuenca de Moquegua. Los tres factores analizados contribuyen en la dirección esperada (coeficientes positivos), siendo estadísticamente significativos dos de ellos (eficiencia institucional e inspecciones) y marginalmente significativo el tercero (plan GIRH). La multicolinealidad moderada entre las variables de gobernanza (VIF 5) no impidió detectar sus efectos principales, aunque sugiere interpretarlas como un paquete interrelacionado de acciones de gobernanza.

Estos hallazgos se visualizan en la Figura 3, que muestra la evolución temporal del porcentaje de cumplimiento de la calidad del agua en cada estación frente al progreso en los indicadores de gobernanza. Se aprecia que, conforme avanzan los años (2020 a 2024) y aumentan los valores de eficiencia, inspecciones y cumplimiento del plan, las curvas de cumplimiento de calidad de agua ascienden en todas las estaciones, con mejoras particularmente notables en las estaciones más críticas (E4, E5).

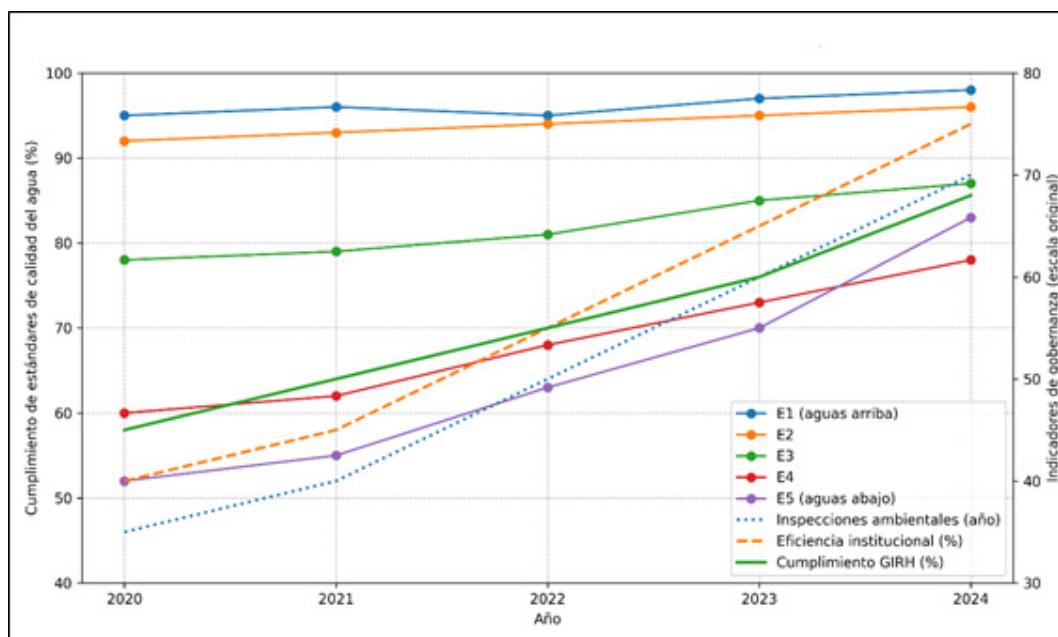


Figura 3. Evolución del cumplimiento de estándares de calidad de agua (2020–2024) en relación con el fortalecimiento de la gobernanza.

En la Figura 3 se muestra la evolución del cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para agua en cinco estaciones de monitoreo (E1–E5) durante el período 2020–2024, en relación con indicadores de fortalecimiento de la gobernanza ambiental.

Las estaciones E1 y E2, ubicadas aguas arriba mantienen niveles de cumplimiento elevados y relativamente estables, cercanos al 90–100 % a lo largo del período analizado, lo que refleja condiciones de calidad de agua dentro de los estándares normativos. Por el contrario, las estaciones E4 y E5, localizadas aguas abajo presentan valores iniciales más bajos en 2020 (aproximadamente 50–67 %), evidenciando

mayores presiones antrópicas; sin embargo, a partir de 2022 se observa una mejora progresiva, alcanzando niveles de 75–83 % en 2024.

Esta tendencia positiva coincide con el incremento en el número de inspecciones ambientales, el aumento de la eficiencia institucional y el avance en la implementación del plan de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH). En consecuencia, el efecto del fortalecimiento de la gobernanza resulta más marcado en las estaciones aguas abajo (E4 y E5), reduciéndose progresivamente la brecha espacial de calidad del agua respecto a las estaciones aguas arriba.

Discusión

En la Discusión se presenta la evaluación descriptiva de la calidad del agua durante 2020–2024 y, a partir de ello, se sintetiza el estado crítico observado en la cuenca baja, por consiguiente la Tabla 4 resume el comportamiento de las variables clave de calidad del agua y de gobernanza hídrica

a lo largo del periodo de estudio, de modo que se comparan sus promedios, dispersión y rangos para identificar tendencias, variabilidad y persistencia de incumplimientos, además esta síntesis permite sustentar la interpretación sanitaria y ecológica del sistema y vincularla con el desempeño institucional y regulatorio.

Tabla 4. Resumen descriptivo de las variables de estudio (2020–2024).

Variable	Media (\bar{x})	Desviación Estándar (σ)	Rango (Mín–Máx)
Calidad del Agua			
ICA (WQI)	51.2	8.5	39 – 68
Coliformes Termotolerantes (NMP/100mL)	3,100	1,550	900 – 6,000
Arsénico (mg/L)	0.012	0.005	0.005 – 0.025
BMWP/Col Score	43	9.1	28 – 65
Gobernanza			
Actividad Regulatoria (Inspecciones/Año)	48	12	35 – 70
Eficiencia Institucional (%)	55.4	8.9	40 – 75
Cumplimiento GIRH (%)	52.1	6.5	45 – 68

Profundización en el riesgo sanitario y ecológico

Riesgo sanitario crónico: El promedio de coliformes termotolerantes (3,100 NMP/100mL) excede en más de tres veces el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para agua de consumo humano (Categoría 1). Este hallazgo se correlaciona con la deficiente gestión de aguas residuales en la cuenca baja, un patrón que (Choque Quispe y otros) identifica como recurrente en cuencas con

alta presión urbana en el sur del Perú. La alta desviación estándar ($\sigma = 1,550$) indica una variabilidad estacional marcada por picos de contaminación en estiaje, lo que incrementa el riesgo de enfermedades de transmisión hídrica, similar a lo advertido por la OMS (2023) sobre la vulnerabilidad de fuentes hídricas superficiales.

Toxicidad química persistente: La concentración promedio de arsénico (0.012 mg/L) supera el valor normativo de 0.010 mg/L, confirmando la amenaza de metales pesados. Aunque el promedio bordea

el límite, los valores máximos registrados (0.025 mg/L) ratifican un riesgo de toxicidad crónica. Estos resultados coinciden con lo reportado por Salas, Chaiña (11), quien señala que, en el macrorregión sur, la presencia de arsénico suele tener un origen tanto geogénico como antrópico, exigiendo un control regulatorio estricto para proteger la salud pública.

Deterioro ecológico severo: El puntaje promedio del BMWP/Col (43) clasifica la calidad ecológica como "Pobre a Crítica". Este bajo valor refleja una alteración biológica severa y la pérdida de especies sensibles, siendo sustituidas por organismos tolerantes a la polución. Al respecto, Jimenez, Mendoza (16), sostienen que la degradación de los macroinvertebrados bentónicos es el reflejo más fiel del impacto acumulado de contaminantes orgánicos y químicos, validando la condición de estrés ambiental observada en el río Moquegua.

Relación gobernanza - calidad: cuantificación de la influencia

La correlación específica evidencia el efecto disuasorio de la regulación. El análisis bivariado mostró que el esfuerzo regulatorio se relaciona directamente con la calidad del agua; niveles superiores de fiscalización y sanción se asocian con mejores indicadores ambientales. Esta relación sugiere que la regulación opera como un mecanismo de control efectivo al incrementar el "costo del incumplimiento". Este fenómeno es discutido por (19), quienes argumentan que la gobernanza basada en la fiscalización es el motor principal para la adopción de medidas correctivas en sectores industriales y municipales.

Table 5. Correlaciones clave entre gobernanza y calidad del agua (2020–2024).

Correlación (r de Spearman)	ICA	Coliformes Termotolerantes	Arsénico (As)	BMWP/Col Score
Actividad Regulatoria (Inspecciones)	0.65 (p < 0.01)	-0.71 (p < 0.001)	-0.45 (p < 0.05)	0.48 (p < 0.05)
Eficiencia Institucional	0.52 (p < 0.05)	-0.45 (p < 0.05)	-0.30 (p > 0.05)	0.35 (p > 0.05)

La correlación negativa muy fuerte ($r = -0.71$) entre la Actividad Regulatoria y los Coliformes Termo tolerantes es la más significativa. Esto sugiere que la fiscalización activa (aumento en

inspecciones y monitoreo) está fuertemente asociada a la reducción de la contaminación de aguas residuales, confirmando su rol como el mecanismo de gobernanza más eficaz para mitigar

la fuente principal de riesgo sanitario en la cuenca. La correlación positiva con el BMWP/Col Score ($r = 0.48$) también indica que el efecto disuasorio de la regulación se traduce en una moderada mejoría en la salud ecológica.

Modelado de Regresión Múltiple: Determinantes del ICA y Calidad Ecológica. El modelado de

regresión aísla el impacto de cada factor de gobernanza sobre la calidad del agua (ICA) y la calidad ecológica (BMWP/Col).

Modelo 1: Impacto sobre el ICA (Calidad Global del Agua). El modelo de regresión para el ICA Tabla 3, explicó un 58% de la varianza total (R^2 ajustado = 0.58; $p < 0.001$).

Table 6. Resultados del modelo de regresión múltiple (variable dependiente: ICA).

Predictor	Coeficiente no estandarizado (B)	Coeficiente estandarizado (β)	Valor p
(Constante)	18.50	—	0.003
Actividad Regulatoria	0.42	0.61	< 0.001
Eficiencia Institucional	0.28	0.30	0.015
Cumplimiento GIRH	0.08	0.05	0.352

Liderazgo Regulatorio, la Actividad Regulatoria es el principal predictor ($\beta = 0.61$), implicando que un aumento en las inspecciones mejora el ICA en 0.42 puntos (coeficiente β), lo cual valida la hipótesis de que una gobernanza robusta y proactiva es crucial para mejorar los resultados de calidad.

Rol de la Institucionalidad, la Eficiencia Institucional ($\beta = 0.30$) es el segundo factor más importante. Un sistema administrativo eficiente facilita la reducción de contaminantes, lo que se refleja en una mejora directa del ICA.

Insuficiencia de la Planificación, el Cumplimiento GIRH carece de significancia estadística. Este hallazgo es crítico, pues indica que la sola adhesión a los planes de gestión no produce per se mejoras en la calidad del agua; el impacto real está condicionado por la capacidad de las instituciones de traducir estos planes en regulación y ejecución efectiva.

Modelo 2: Impacto sobre la Calidad Ecológica (BMWP/Col Score). El modelo para el BMWP/Col Score (Tabla 4) explicó el 45% de su varianza (R^2 ajustado = 0.45; $p < 0.01$).

Table 7. Resultados del modelo de regresión múltiple (variable dependiente: BMWP/Col Score).

Predictor	Coeficiente no estandarizado (B)	Coeficiente estandarizado (β)	Valor p
(Constante)	10.15	—	0.045
Actividad Regulatoria	0.35	0.55	< 0.01
Eficiencia Institucional	0.15	0.18	0.120
Cumplimiento GIRH	0.10	0.06	0.410

En este modelo, la Actividad Regulatoria se mantiene como el único predictor estadísticamente significativo de la calidad ecológica ($\beta = 0.55$). Este hallazgo es fundamental, ya que demuestra que la fiscalización no solo reduce contaminantes puntuales, sino que permite la recuperación de las comunidades de macroinvertebrados. Al respecto, Jimenez, Mendoza (16), sostienen que la salud biótica de los ríos andinos depende directamente de la reducción de la presión antrópica mediante el control externo.

Asimismo, la importancia de la regulación como motor de recuperación biológica coincide con lo expuesto por Coayla, Cheneaux (15), quienes indican que el índice BMWP/Col reacciona positivamente cuando los mecanismos de control institucional limitan las descargas de carga orgánica y química en la cuenca baja. En contraste, la falta de significancia del Cumplimiento GIRH sugiere que la planificación documental no genera beneficios ecológicos tangibles si no está acompañada de una ejecución fiscalizadora.

Desafíos y enfoques innovadores

En la actualidad persisten retos importantes como la falta de coordinación y generación de sinergia entre instituciones, se observa debilidades en la aplicación de leyes, insuficiente participación de actores locales y dificultades para integrar la protección ambiental con el uso de recursos hídricos destinados al consumo humano. En regiones urbanas y rurales, la escasez, la contaminación y la desigualdad en el acceso al agua de consumo humano siguen siendo problemas críticos no resueltos.

Asimismo, podemos establecer algunos enfoques Innovadores, orientados a promover marcos de gobernanza participativa que integren soluciones de oferta y demanda, incentivos económicos, mejoras sustanciales de medición basadas en inteligencia artificial y participación de los actores involucrados para mejorar la eficiencia y la resiliencia. La gestión adaptativa del uso de agua para consumo humano y la evaluación cuantitativa de políticas públicas permitirán ajustar estrategias ante cambios ambientales y sociales, inclusive afrontando escenarios de cambio climático.

CONCLUSIONES

La investigación longitudinal sobre la cuenca baja del río Moquegua (2020–2024) concluye que la calidad del agua es insuficiente para el consumo humano y presenta un severo compromiso ecológico. La amenaza sanitaria es crítica debido a que los Coliformes Termotolerantes exceden sistemáticamente el Estándar de Calidad Ambiental (ECA), mientras que el bajo puntaje BMWP/Col refleja una alteración biótica severa y crónica del ecosistema fluvial.

Se demostró que la gobernanza hídrica influye de manera significativa y cuantificable en la mejora de la calidad del agua. Este efecto está jerarquizado: la Actividad Regulatoria (fiscalización e inspecciones) es el predictor más fuerte y dominante de la mejora en el Índice de Calidad del Agua (ICA) y en la salud ecológica. Su alta correlación negativa con la contaminación microbiológica evidencia su rol esencial como mecanismo de disuasión eficaz contra los vertimientos.

La Eficiencia Institucional es el segundo predictor relevante, confirmando que la capacidad de gestión y coordinación administrativa es necesaria para sostener las mejoras.

Se concluye que la Planificación no es un factor de cambio per se. La falta de significancia estadística del cumplimiento del Plan GIRH demuestra que el impacto ambiental de la

gobernanza no radica en la existencia formal de un plan, sino en su ejecución efectiva, proactiva y regulatoria por parte de las instituciones. El éxito en la calidad del agua en Moquegua está supeditado a la operatividad de la gobernanza, no a su diseño.

La Actividad Regulatoria (fiscalización e inspecciones) es el predictor más fuerte y estadísticamente significativo ($\beta = 0.61$). Esto significa que, por cada esfuerzo unitario en fiscalización, se produce una mejora cuantificable en el ICA. Este hallazgo subraya que la gestión efectiva requiere una gobernanza proactiva que aplique el enforcement de la ley como estrategia de disuasión y control de contaminantes, más allá de la mera existencia de normativas.

La Eficiencia Institucional es el segundo factor relevante ($\beta = 0.30$), lo que implica que la capacidad de las instituciones para coordinar, asignar recursos y ejecutar proyectos de saneamiento (como la optimización de PTAR) es crucial para materializar los beneficios regulatorios.

La falta de significancia estadística del Cumplimiento GIRH es la conclusión más crítica para la política pública. Se demuestra que el cumplimiento de los planes de gestión (GIRH) no se traduce directamente en mejoras de la calidad del agua. El impacto real de la gobernanza se produce únicamente cuando los planes se

convierten en acciones regulatorias efectivas y eficientes en el terreno.

CONFLICTO DE INTERESES. Los autores declaran que no existe conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

REFERENCIAS

1. Hong N, Kumar P, Tam P, Meraj G, Phuong P, Almazroui M, et al. A systematic review of water governance in Asian countries: challenges, frameworks, and pathways toward sustainable development goals. *Earth Syst Environ.* 2024;8(2):181-205. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00385-1>.
2. Merheb M, Moussa R, Abdallah C, Halwani J, Cudennec C. The water resources of Lebanon-A review to support water security. *Physics Chemistry of the Earth, Parts A/B/C.* 2024;136. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103683>.
3. Organización Mundial de la Salud. Agua para consumo humano: Organización Mundial de la Salud. 2023. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>.
4. Walsh R, Ward A. An overview of the evolving jurisdictional scope of the US Clean Water Act for hydrologists. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water.* 2022;9(5). <https://doi.org/10.1002/wat2.1603Digital>.
5. Rosso R. On Seven Principles of Water Governance. *Water.* 2025;17(6):896. <https://doi.org/10.3390/w17060896>.
6. Nina N, Román C. Zonas de vulnerabilidad y peligros ambientales en la cuenca del río Moquegua. *Ingeniería Investiga.* 2022;4. <https://doi.org/10.47796/ing.v4i0.583>.
7. Choque D, Ligarda C, Solano A, Ramos B, Quispe Y, Choque Y, et al. Water quality index in the high-Andean micro-basin of the Chumbao River, Andahuaylas, Apurímac, Peru. *Tecnología y ciencias del agua.* 2021;12(1):37-73. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-01-02>.
8. Sánchez A, Vega M, editors. *Anthropic System and Water Quality in a High Andean Basin in Peru.* 23º Multiconferencia Internacional de Ingeniería, Educación y Tecnología de LACCEI: "Ingeniería, Inteligencia Artificial y Tecnologías Sustentables al servicio de la sociedad"; 2025; Ciudad de México.
9. Fahad M, Jasim N, Naif A. Assessment of the microbiological, physicochemical quality of Diyala River water, with emphasis on regulatory roles of coliform bacteria. *Regulatory Mechanisms in Biosystems.* 2025;16(3). <https://doi.org/10.15421/0225093>.
10. Saifullislam M, Kawsar M, Al Bakky A, Ismail Z, Ibrahim K, Idris A. Assessing chemical properties and heavy metals in groundwater resources in a developing country: a baseline study. *Sci Rep.* 2025;15(1):29628. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-15128-z>.
11. Salas D, Chaiña F, Belizario G, Quispe E, Huanqui R, Velarde E, et al. Evaluación de metales pesados y comportamiento social asociados con la calidad del agua en el río Suches, Puno, Perú. *Tecnología y ciencias del agua.* 2021;12(6):145-95. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2021-06-04>.
12. Das A. Applying the water quality indices, geographical information system, and advanced decision-making techniques to assess the suitability of surface water for drinking purposes in Brahmani River Basin (BRB), Odisha. *Environ Sci Pollut Res.* 2025;1-36. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36329-z>.
13. Soueilem S, N'diaye A, Abdellahi O, M'Baye B, El Hadj Y, Cheikh M, et al. Evaluation of the quality of boreholes water using indicators like Water Quality Index (WQI), and the Comprehensive Pollution Index (CPI). *An-Najah University Journal for Research-A.* 2025;39(2):205-12. <https://doi.org/10.35552/anujr.a.39.2.2376>.
14. Lazo C, Piscoya J, Roa P. Análisis crítico del uso de macroinvertebrados bentónicos como bioindicadores de la calidad del agua en el Sistema Nacional de Gestión Ambiental. *Revista Kawsaypacha: sociedad y medio ambiente.* 2022(9):140-53. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202201.007>.

- 15.** Coayla P, Cheneaux A, Moreno C, Cruz C, Damborenea C. Aquatic macroinvertebrate community and water quality in the Tambo River, Arequipa, Perú. *Revista de Biología Tropical*. 2024;72(1). <http://dx.doi.org/10.15517/rev.biol.trop.v72i1.56670>.
- 16.** Jimenez K, Mendoza R, Minaya D, Leiva D, Iannacone J. Macroinvertebrados Bentónicos como Bioindicadores para Evaluar la Calidad del Agua en el Río Cañipia, Cusco, Perú. *Innovaciencia*. 2025;13(1). <https://doi.org/10.15649/2346075X.4843>.
- 17.** Motta J, Ranilla C. Bioindicadores de calidad del agua en la cuenca baja del río Ocoña, departamento de Arequipa, Perú, utilizando diatomeas epilíticas y su relación con algunos parámetros ambientales. *Revista internacional de contaminación ambiental*. 2024;40. <https://doi.org/10.20937/rica.54368>
- 18.** Rowbottom J, Graversgaard M, Wright I, Dudman K, Klages S, Heidecke C, et al. Water governance diversity across Europe: Does legacy generate sticking points in implementing multi-level governance? *Journal of Environmental Management*. 2022;319. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115598>.
- 19.** Qiao X, Schmidt A, Xu Y, Zhang H, Chen X, Xiang R, et al. Surface water quality in the upstream-most megacity of the Yangtze River Basin (Chengdu): 2000–2019 trends, the COVID-19 lockdown effects, and water governance implications. *Environmental Sustainability Indicators*. 2021;10. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2021.100118>.
- 20.** Nedachi T, Oporto J, Calderon C, Flores E, Rodríguez M, Párraga J, et al. Social and governmental influences when engaging in citizen participatory water quality monitoring in lower middle-income countries (LMICs). *Water Research X*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2025.100425>.
- 21.** Gómez A, Miralles M, Corbella I, García S, Navarro S, Llebaria X. La calidad sanitaria del agua de consumo. *Gaceta sanitaria*. 2016;30:63-8. <https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2016.04.012>.
- 22.** Jiménez A, Saikia P, Giné R, Avello P, Leten J, Liss B, et al. Unpacking water governance: A framework for practitioners. *Water*. 2020;12(3):827. <https://doi.org/10.3390/w12030827>.
- 23.** Singh K. A Study the concept and legal principles of Water Management. *Journal of Advances Scholarly Researches in Allied Education*. 2024;21(2):62-71. <https://pdfs.semanticscholar.org/d728/da46218e49c01a49d58069e8d23f804bf8ac.pdf>
- 24.** Chapman D, Sullivan T. The role of water quality monitoring in the sustainable use of ambient waters. *One Earth*. 2022;5(2):132-7. [https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322\(22\)00046-X](https://www.cell.com/one-earth/fulltext/S2590-3322(22)00046-X)
- 25.** Villena J. Calidad del agua y desarrollo sostenible. *Revista peruana de medicina experimental y salud pública*. 2018;35:304-8. <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3719>.
- 26.** Pino E, Espinoza J, Chávarri E, Quille J, Ingol E. Impacts of groundwater management policies in the Caplina aquifer, Atacama Desert. *Water*. 2023;15(14):2610. <https://doi.org/10.3390/w15142610>.
- 27.** Hancco C. Evaluación de la influencia de la Ptar en la parte baja de la Intercuenca del río Moquegua [Tesis para optar el grado de maestro]. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria la Molina; 2020.
- 28.** Hairunnisa N, Ern K. Reconciling and contextualising multi-dimensional aspects for consolidated water security index: A synthesis. *Journal of Environmental Management*. 2024;359. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121067>.
- 29.** Gerlak A, Karambelkar S, Ferguson D. Knowledge governance and learning: Examining challenges and opportunities in the Colorado River basin. *Environmental Science Policy*. 2021;125:219-30. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.08.026>.