

Environmental, Financial, and Social Drivers of Circular Water Management: A Quantile Regression Study in High-Andean Ecosystems

Luis Ricardo Flores-Vilcapoma¹; Augusto Aliaga-Miranda²; Julio César Mariños-Alfaro³; José Vladimir Ponce-de-León-Berrios³; Anieval Cirilo Peña-Rojas⁴; Paulo César Callupe-Cueva⁵; Wilmar Salvador Chavarry-Becerra⁶

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, C28305@utp.edu.pe

²Universidad Científica del Sur, Perú, aaliagami@ucsur.edu.pe

³Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa, Perú, jmarinos@uniscjsa.edu.pe, jponce@uniscjsa.edu.pe

⁴Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú, acpenia@uncp.edu.pe

⁵Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma, Perú, pcallupe@unaat.edu.pe

⁶Universidad Continental, Perú, wchavarry@continental.edu.pe

Abstract– This study analyzes the factors influencing the implementation of circular economy practices in the sustainable management of water in Lake Chinchaycocha, located in the central highlands of Peru and exposed to industrial, mining, and agricultural pressures. The analysis focuses on two operational outcomes: water use efficiency (EWU) and compliance with environmental regulations (CER). Data were obtained through a structured questionnaire administered to 50 local stakeholders involved in water governance. Methodologically, quantile regression with bootstrap estimation ($\tau = 0.25, 0.50$, and 0.75) was used to capture the heterogeneity of performance, modeling both outcomes based on environmental impact and conservation (EIC), financial sustainability (FS), and benefits for the local community (BLC). The results show moderate average levels and significant dispersion among units. Quantile estimates reveal asymmetric patterns: financial sustainability is a determining factor at medium efficiency levels, while environmental conservation capacity predominates at high levels. Regarding regulatory compliance, environmental impact and community benefits show positive effects at the extreme quantiles. It is concluded that strengthening the circular economy requires differentiated strategies according to the performance level, integrating environmental, financial, and social dimensions in high-Andean ecosystems.

Keywords– Circular economy, sustainable water management, environmental governance, Chinchaycocha lagoon, water resource.

Factores ambientales, financieros y sociales de la gestión circular del agua: Un estudio de regresión cuantil en ecosistemas altoandinos

Luis Ricardo Flores-Vilcapoma¹; Augusto Aliaga-Miranda²; Julio César Mariños-Alfaro³; José Vladimir Ponce-de-León-Berrios³; Anieval Cirilo Peña-Rojas⁴; Paulo César Callupe-Cueva⁵; Wilmar Salvador Chavarry-Becerra⁶

¹Universidad Tecnológica del Perú, Perú, C28305@utp.edu.pe

²Universidad Científica del Sur, Perú, aaliagami@ucsur.edu.pe

³Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa, Perú, jmarinos@uniscjsa.edu.pe, jponce@uniscjsa.edu.pe

⁴Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú, acpenia@uncp.edu.pe

⁵Universidad Nacional Autónoma Altoandina de Tarma, Perú, pcallupe@unaat.edu.pe

⁶Universidad Continental, Perú, wchavarry@continental.edu.pe

Resumen– Este estudio analiza los factores que influyen en la implementación de prácticas de economía circular en la gestión sostenible del agua en la Laguna de Chinchaycocha, ubicada en la sierra central del Perú y expuesta a presiones industriales, mineras y agropecuarias. El análisis se centra en dos resultados operativos: la eficiencia en el uso del agua (EWU) y el cumplimiento de las normativas ambientales (CER). Los datos se obtuvieron mediante un cuestionario estructurado aplicado a 50 actores locales vinculados a la gobernanza hídrica. Metodológicamente, se emplea regresión cuantil con estimación Bootstrap ($\tau = 0.25, 0.50$ y 0.75) para capturar la heterogeneidad del desempeño, modelando ambos resultados en función del impacto ambiental y la conservación (EIC), la sostenibilidad financiera (FS) y los beneficios para la comunidad local (BLC). Los resultados muestran niveles promedio moderados y una dispersión significativa entre unidades. Las estimaciones cuantílicas revelan patrones asimétricos: la sostenibilidad financiera es determinante en los niveles medios de eficiencia, mientras que la capacidad de conservación ambiental predomina en los niveles altos. En el cumplimiento normativo, el impacto ambiental y los beneficios comunitarios presentan efectos positivos en los cuantiles extremos. Se concluye que el fortalecimiento de la economía circular requiere estrategias diferenciadas según el nivel de desempeño, integrando dimensiones ambientales, financieras y sociales en ecosistemas altoandinos.

Palabras clave– Economía circular, gestión sostenible del agua, gobernanza ambiental, laguna de Chinchaycocha, recurso hídrico.

I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el interés por la gestión sostenible del agua ha ido en aumento; sin embargo, la evidencia empírica que respalde estas iniciativas aún resulta escasa, sobre todo cuando se analizan contextos de altura como los

Andes peruanos [1]. En estas áreas, la presencia simultánea de actividades mineras, industriales y agrícolas ejerce una presión constante sobre los recursos hídricos, intensificando los problemas ambientales y dificultando la adopción de decisiones orientadas a la sostenibilidad [2], [3]. Dentro de este marco, la Laguna de Chinchaycocha destaca como un espacio especialmente vulnerable, donde los retos relacionados con la conservación del agua reflejan una situación más amplia que afecta a gran parte de la región andina [4].

En diversas investigaciones se logran evidenciar como la economía circular puede ser una gran alternativa para poder hacer frente a estos retos tan importantes, entre las alternativas podemos ubicar a las plantas de tratamiento y de aguas residuales, la adquisición de tecnologías para la optimización más eficiente del agua [5]. Sin embargo, muchos de estos esfuerzos, logran ser insuficientes debido a las limitaciones en la gestión y articulación de políticas y sobre todo porque no se encuentran articuladas [6], [7]. Existen múltiples iniciativas que fueron desarrolladas pero que carecieron de continuidad y más aún algunos poseen inadecuados mecanismos de coordinación y evaluación, lo cual finalmente tiene impacto limitado y efectivo en la gestión del agua.

Ante este panorama, el presente estudio tiene como objetivo analizar empíricamente la relación entre las estrategias de economía circular y la gestión sostenible del agua en la Laguna de Chinchaycocha. Por ello, se toman en consideración diversos aspectos relevantes como la eficiencia en el uso del agua, el cumplimiento de la normativa ambiental, la sostenibilidad financiera de las acciones aplicadas y la percepción de los beneficios por parte de la comunidad local [8].

Desde este contexto, se logra establecer la siguiente pregunta de investigación: ¿qué factores influyen en la aplicación efectiva de prácticas de economía circular en la

gestión del agua en contextos altoandinos sometidos a una fuerte presión ambiental?, de manera más concreta, se busca identificar el impacto de la conservación ambiental, la sostenibilidad financiera y los beneficios comunitarios sobre la eficiencia en el uso del recurso hídrico y el cumplimiento de la normativa ambiental en la Laguna de Chinchaycocha.

En consecuencia, nuestro objetivo consiste en evaluar, mediante modelos de regresión cuantil con estimación Bootstrap, el grado de influencia de las distintas dimensiones de la economía circular sobre dos indicadores fundamentales de la gestión hídrica sostenible: la eficiencia en el uso del agua y el cumplimiento de las regulaciones ambientales. En coherencia con ello, se plantea como hipótesis que las estrategias orientadas a la conservación ambiental y a la participación activa de la comunidad tienen un efecto positivo y significativo sobre dichos indicadores, mientras que la sostenibilidad financiera presenta una relación menos determinante.

II. REVISIÓN LITERARIA

A. Economía circular

Puede entenderse como una manera diferente de producir y consumir, teniendo como propósito es poder hacer un uso responsable y racional de los recursos. Este enfoque se basa en acciones como reducir el consumo, reutilizar materiales y reciclar, buscando con ello el poder evitar el desperdicio innecesario. A diferencia del modelo de economía lineal, que su objetivo está orientado en extraer recursos, transformarlos y finalmente desecharlos, la economía circular propone alargar la vida útil de los productos y favorecer la recuperación de los sistemas naturales [9]. En lo que respecta a la gestión del agua, este modelo plantea el uso de tecnologías que permitan el tratamiento y la reutilización del recurso hídrico, con el fin de disminuir las pérdidas, optimizar su uso y reducir los impactos ambientales asociados [10].

B. Optimización del uso de recursos

Dentro del enfoque de economía circular, la optimización del uso de los recursos busca mejorar la eficiencia en el consumo de agua tanto en procesos industriales como en el ámbito municipal. Esto se logra mediante la adopción de tecnologías avanzadas que facilitan la reducción del consumo, el aprovechamiento de aguas residuales y la implementación de sistemas cerrados de reutilización [11]. La aplicación de estas estrategias no solo favorece la sostenibilidad ambiental, sino que también genera beneficios económicos, ya que permite reducir costos operativos y asegurar una mayor disponibilidad del recurso hídrico a largo plazo [12].

C. Normativa sobre gestión de residuos

Está sustentada en un conjunto de normas las cuales están orientadas a la correcta disposición y reutilización del agua tratada. Estas regulaciones establecen, entre sus alcances, límites permitidos para la presencia de contaminantes en las descargas, así como también estímulos para la adopción de sistemas de tratamiento y también sanciones ante la vulneración de los estándares ambientales [13]. Contar con

una normativa sólida es muy importante ya que permite asegurar que las prácticas de economía circular se desenvuelvan de forma responsable y a su vez generen un impacto real en la sostenibilidad del agua [14].

D. Gestión sostenible del agua

La gestión sostenible del agua representa un enfoque integral que busca equilibrar el uso y la disponibilidad del recurso hídrico, asegurando su conservación para las generaciones futuras [15], [16]. Este modelo considera de forma conjunta los aspectos ambientales, económicos y sociales, promoviendo un uso responsable del agua y la protección de los ecosistemas acuáticos. En el caso de la Laguna de Chinchaycocha, la gestión sostenible del agua adquiere especial relevancia, ya que constituye una herramienta clave para enfrentar los problemas de contaminación y preservar el equilibrio del ecosistema hídrico [17].

E. Dimensión ambiental

Desde la dimensión ambiental, la gestión sostenible del agua se orienta a la aplicación de políticas y tecnologías destinadas a disminuir el impacto de las actividades humanas sobre los cuerpos de agua. Esto incluye acciones como la conservación de los ecosistemas acuáticos, la restauración de hábitats naturales y la reducción de la contaminación mediante sistemas eficientes de tratamiento de aguas residuales. La protección de la biodiversidad y la regulación del uso del recurso hídrico son elementos esenciales dentro de esta dimensión [18].

F. Dimensión económica

Esta dimensión está orientada en poder impulsar aquellas formas de uso del recurso que logren ser eficientes, pero que a la vez resulten económicamente viable. Para ello, se consideran medidas como el establecimiento de tarifas según el nivel de consumo por familia, el aprovechamiento económico del reciclaje de aguas residuales y la promoción de inversiones en tecnologías innovadoras para su tratamiento [19]. En este sentido, un sistema hídrico sostenible debe establecer un punto de equilibrio entre los costos operativos y los beneficios económicos que se generan al optimizar el uso óptimo del agua.

G. Dimensión social

Finalmente, esta dimensión destaca la necesidad de poder garantizar el acceso objetivo del agua para todas las comunidades. Esto involucra generar la participación de la comunidad local en una correcta y toma de decisiones, para de esta manera poder generar programas educativos orientados al uso responsable del agua y establecer mecanismos participativos para su gestión [20]. La sensibilización y el compromiso ciudadano se convierten, así, en factores clave para el éxito de las estrategias de gestión sostenible del agua.

III. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población de este estudio está conformada por los actores clave involucrados en la gestión del agua en la cuenca de la Laguna de Chinchaycocha. Esto incluye a funcionarios

de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), representantes de municipalidades, empresas mineras, agroindustriales y comunidades locales que dependen directamente del recurso hídrico de la laguna para su subsistencia y actividades económicas. La selección de esta población responde a la necesidad de analizar la aplicación de principios de economía circular en la gestión sostenible del agua en la región.

Para determinar la muestra, se ha optado por un diseño de muestreo no probabilístico por conveniencia, debido a la naturaleza específica de los sujetos de estudio y la disponibilidad de información de los actores involucrados. La muestra estará compuesta por 50 encuestados, asegurando una distribución equitativa entre los diferentes grupos de interés. Esta distribución incluirá a funcionarios de PTAR, representantes de municipalidades, directivos de empresas mineras y agroindustriales, así como miembros de comunidades locales que interactúan con la gestión del recurso hídrico.

El tamaño de la muestra se ha determinado con base en la posibilidad de obtener información representativa sobre la percepción y aplicación de la economía circular en la gestión del agua, garantizando que los datos obtenidos sean suficientes para el análisis de correlación entre las variables en estudio. La recolección de datos se realizará a través de encuestas estructuradas con preguntas en escala de Likert, lo que permitirá cuantificar las percepciones y evaluar la relación entre la economía circular y la gestión sostenible del agua en la Laguna de Chinchaycocha.

Sin embargo, el uso de encuestas estructuradas puede generar ciertos sesgos asociados a la percepción subjetiva de los participantes, así como posibles respuestas influenciadas por deseabilidad social o interpretación individual de los ítems. Para reducir estas limitaciones, se empleó una estructura clara de preguntas y se garantizó la confidencialidad de la información proporcionada por los participantes.

En cuanto a la justificación del tamaño muestral, se tomó como referencia el criterio de [21], ampliamente utilizado en estudios con modelos de regresión múltiple. Según esta regla empírica, el tamaño mínimo de muestra recomendado es $N \geq 50 + 8m$, donde m representa el número de predictores incluidos en el modelo. En este estudio se consideraron tres variables predictoras (impacto ambiental, sostenibilidad financiera y beneficios comunitarios), lo cual sugiere un mínimo requerido de 74 observaciones. No obstante, se reconoce como limitación el hecho de trabajar con 50 casos, justificado por la disponibilidad restringida de actores estratégicos en el ecosistema de la laguna y por la aplicación de un muestreo no probabilístico por conveniencia. A pesar de ello, los modelos superan las pruebas de validez estadística (heterocedasticidad, autocorrelación, especificación) y mantienen niveles adecuados de significancia, lo cual respalda la consistencia empírica del análisis.

IV. METODOLOGÍA

A. Operalización de las variables

La Tabla I aclara el marco de medición del estudio al traducir dos constructos amplios en dimensiones observables e indicadores concretos. El primer constructo —economía circular en la gestión del agua— se operacionaliza a través de la eficiencia en el uso del agua, capturada mediante indicadores que reflejan el control operativo y la reutilización (por ejemplo, cumplimiento de estándares de calidad del agua, frecuencia de monitoreo y prácticas de reutilización/eficiencia), así como el cumplimiento de las normativas ambientales, representado por mecanismos de gobernanza y fiscalización (por ejemplo, cumplimiento regulatorio, auditorías y coordinación, y planificación e incentivos alineados con los ODS).

TABLA I
 PRINCIPALES VARIABLES

Variable	Dimensión	Indicador
Economía circular en la gestión del agua	Eficiencia en el uso del agua	Control de calidad en plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), reducción de residuos, adopción de tecnologías modernas.
	Cumplimiento de la normativa ambiental	Auditorías ambientales, coordinación entre empresas y autoridades, alineación con los ODS.
Gestión sostenible del agua	Impacto ambiental y conservación	Reutilización del agua tratada, incentivos para prácticas sostenibles.
	Sostenibilidad financiera	Fuentes de financiación, reducción de costos en el tratamiento del agua, generación de ingresos a partir del agua tratada.
	Beneficios para la comunidad local	Mejoras en la calidad del agua, monitoreo de contaminantes, restauración de ecosistemas.

En términos sustantivos, la tabla posiciona el desempeño de la economía circular como la capacidad de utilizar el agua de manera más productiva manteniendo el cumplimiento institucional, combinando prácticas técnicas (monitoreo, reutilización) con disciplina regulatoria (auditorías, coordinación y planificación).

El segundo constructo —gestión sostenible del agua— se especifica como un conjunto complementario y multidimensional de factores impulsores y resultados que amplían el análisis más allá de la eficiencia operativa. Sus dimensiones abarcan: impacto ambiental y conservación (tendencias en la calidad ambiental, monitoreo de metales pesados, acciones de restauración y contingencia), sostenibilidad financiera (sostenibilidad de costos, disponibilidad de financiamiento y valorización de recursos como el reaprovechamiento de biogás y lodos), y beneficios para la comunidad local (acceso al agua potable, reducción de enfermedades relacionadas con el agua, generación de empleo y alianzas, y educación ambiental).

En conjunto, estos indicadores garantizan que el modelo capture la tríada ambiental–económica–social que sustenta la sostenibilidad, permitiendo distinguir empíricamente si las mejoras en eficiencia y cumplimiento se asocian principalmente con la gestión ambiental, la viabilidad financiera o los beneficios comunitarios, en lugar de tratar la “mejor gestión del agua” como un concepto único e indiferenciado.

B. Modelos de regresión

Sea Y_i el resultado de interés para la unidad observacional i . En nuestra aplicación, Y_i se define alternativamente como EWU (eficiencia en el uso del agua) o CER (cumplimiento de las normativas ambientales).

Defínase el vector de covariables como:

$$X_i = (1, EIC_i, FS_i, BLC_i)' \quad (1)$$

Donde EIC capta el impacto ambiental y la conservación, FS_i denota la sostenibilidad financiera, y BLC_i representa los beneficios para la comunidad local.

Para un nivel de cuantil dado $\tau \in (0,1)$ (se consideran $\tau \in \{0.25, 0.50, 0.75\}$), el cuantil condicional τ de Y_i dado X_i se especifica como:

$$Q_{Y_i}(\tau|X_i) = X_i' \beta(\tau) + \beta_1(\tau)EIC_i + \beta_2(\tau)FS_i + \beta_3(\tau)BLC_i \quad (2)$$

El estimador de regresión cuantifica $\beta(\tau)$ se obtiene resolviendo:

$$\hat{\beta}(\tau) = \arg \min_{\beta} \sum_{i=1}^N \rho_{\tau}(Y_i - X_i' \beta) \quad (3)$$

Donde $\rho_{\tau}(\cdot)$ es la función de pérdida absoluta asimétrica (función “check”):

$$\rho_{\tau}(u) = u[\tau - \mathbb{I}(u < 0)] \quad (4)$$

Dado el tamaño relativamente pequeño de la muestra ($N = 50$), la inferencia estadística se realiza utilizando errores estándar obtenidos mediante Bootstrap (y sus correspondientes intervalos de confianza), lo que proporciona una cuantificación más fiable de la incertidumbre ante una posible heterocedasticidad y un comportamiento no normal de los residuos.

A lo largo de las 50 observaciones, la Tabla II muestra niveles promedio moderados en todas las dimensiones, siendo el cumplimiento de las normativas ambientales el que presenta la media más alta (3.057), seguido por la eficiencia en el uso del agua (2.964). Los pilares restantes se agrupan estrechamente en torno a valores entre 2.46 y 2.50 (impacto ambiental y conservación = 2.497; sostenibilidad financiera = 2.460; beneficios para la comunidad local = 2.490). Los rangos observados sugieren una heterogeneidad significativa, especialmente en las dimensiones de la economía circular: la eficiencia varía entre 1.6 y 4.4, y el cumplimiento entre 1.714 y 4.429, lo que indica que, si bien muchas unidades se desempeñan en un nivel “medio a bueno”, un segmento no despreciable permanece en niveles comparativamente bajos.

Los patrones de dispersión refuerzan esta interpretación. La eficiencia en el uso del agua presenta la mayor desviación estándar (0.651), seguida por el cumplimiento (0.569), lo que implica una mayor variabilidad transversal en el desempeño

operativo y en la alineación regulatoria que en los pilares de sostenibilidad. En contraste, los beneficios para la comunidad local muestran la menor desviación estándar (0.308) y un rango más estrecho (de 2.0 a 3.167), lo que señala percepciones o resultados más homogéneos en la dimensión social. Los cuartiles son coherentes con ello: en eficiencia, el 50% central se sitúa entre 2.4 y 3.4 (mediana = 3.0), mientras que en beneficios se ubica entre 2.333 y 2.667 (mediana = 2.5), lo que indica una mayor concentración en torno a la tendencia central.

TABLA II
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS

Estadísticos	Eficiencia en el uso del agua	Cumplimiento de las normativas ambientales	Impacto ambiental y conservación	Sostenibilidad financiera	Beneficios para la comunidad local
N	50	50	50	50	50
Max	4.4	4.429	3.5	3.5	3.167
Min	1.6	1.714	1.5	1.667	2
Media	2.964	3.057	2.497	2.46	2.49
DS	0.651	0.569	0.444	0.454	0.308
Varianza	0.424	0.323	0.197	0.206	0.095
P ₂₅	2.4	2.714	2.167	2.167	2.333
P ₅₀	3	3	2.5	2.417	2.5
P ₇₅	3.4	3.429	2.833	2.833	2.667
Asimetría	0.055	0.199	0.002	0.299	0.305
Curtosis	2.501	3.284	2.661	2.459	2.209

Las estadísticas de forma de la distribución sugieren que las variables son aproximadamente simétricas y no presentan colas pronunciadas. La asimetría es pequeña y positiva en todas las dimensiones (de 0.002 a 0.305), lo que implica solo una ligera inclinación hacia la derecha (es decir, un número limitado de casos con puntuaciones altas que elevan ligeramente la distribución). Los valores de curtosis son, en general, cercanos al referente gaussiano de 3: el cumplimiento es ligeramente más apuntado (3.284), mientras que los beneficios parecen más planos (2.209). En conjunto, estos indicadores muestran que el conjunto de datos no está dominado por valores extremos, pero sí contiene suficiente dispersión —especialmente en eficiencia y cumplimiento— como para justificar el análisis de efectos heterogéneos a lo largo de la distribución condicional (por ejemplo, mediante regresión cuantil, en lugar de basarse únicamente en inferencias centradas en la media).

La Fig. 1 muestra el mapa de calor de correlaciones de Spearman, nuestros resultados indican una correlación positiva entre las variables de estudio, lo que indica que rangos más altos en una dimensión tienden a estar acompañados por rangos más altos en las demás. La asociación monótona más fuerte se observa entre CER y EIC ($\rho = 0.57$), lo que sugiere que un mejor cumplimiento de la normativa ambiental está

estrechamente alineado con prácticas más sólidas de impacto ambiental y conservación. Una relación igualmente alta aparece entre CER y BLC ($\rho = 0.54$), lo que implica que los contextos con mayor cumplimiento también tienden a reportar mayores beneficios para la comunidad local, en consonancia con el papel de la fiscalización, la coordinación y la planificación alineada con los ODS en la traducción de la gobernanza ambiental en resultados sociales tangibles.



Fig. 1 Mapa de calor de correlaciones (Spearman).

En cuanto a las relaciones del lado de los resultados, EWU presenta correlaciones moderadas con las tres dimensiones de sostenibilidad: EIC ($\rho = 0.44$), FS ($\rho = 0.44$) y BLC ($\rho = 0.36$), mientras que su asociación con CER es más débil ($\rho = 0.23$). Este patrón sugiere que la eficiencia en el uso del agua está más estrechamente vinculada con el ecosistema más amplio de la sostenibilidad —en particular con la gestión ambiental y la viabilidad financiera— que con el cumplimiento normativo por sí solo. Es importante destacar que ningún coeficiente se aproxima a niveles típicamente asociados con redundancia (todos $\rho \leq 0.57$), lo que respalda el tratamiento de los constructos como relacionados, pero empíricamente distintos; al mismo tiempo, la dependencia positiva generalizada motiva el uso de modelos sensibles a la distribución (por ejemplo, métodos cuantílicos) para evaluar si estas asociaciones se traducen en efectos heterogéneos entre unidades de bajo, medio y alto desempeño.

La Tabla III documenta una clara heterogeneidad distributiva en los determinantes de los dos resultados analizados. En el caso de la eficiencia en el uso del agua (EWU), los efectos estimados varían según los cuantiles. En el extremo inferior ($\tau = 0.25$), el impacto ambiental y la conservación (EIC) es positivo y débilmente significativo ($\beta = 0.5126$; $p = 0.0512$), mientras que la sostenibilidad financiera (FS) y los beneficios para la comunidad local (BLC) no se diferencian estadísticamente de cero. En la mediana ($\tau = 0.50$),

el patrón cambia: la FS se convierte en el principal correlato de la EWU ($\beta = 0.6805$; $p = 0.0086$), mientras que el EIC pierde respaldo estadístico ($p = 0.1346$) y el BLC sigue siendo irrelevante. En el extremo superior ($\tau = 0.75$), el EIC se fortalece y se vuelve significativo ($\beta = 0.7247$; $p = 0.0231$), mientras que la FS se atenúa ($p = 0.3165$). Esta progresión sugiere que las condiciones financieras son más relevantes para los desempeños “típicos”, mientras que la capacidad de conservación ambiental diferencia a los casos de mayor eficiencia. Asimismo, el pseudo R^2 aumenta hacia el cuantil superior (0.1645 hacia 0.2380), lo que es consistente con una mayor capacidad explicativa entre las observaciones con mayor EWU.

TABLA III
RESULTADOS POR CUANTILES

V_i	τ	Termino	Coefficientes	z	p-valor	Pseudo R^2
EWU	0.25	Constante	0.3456	0.2052	0.8374	0.1645
		EIC	0.5126	1.9496	0.0512*	
		FS	0.2913	0.7639	0.4449	
		BLC	0.0932	0.1820	0.8556	
	0.5	Constante	0.0687	0.0688	0.9451	0.1745
		EIC	0.4300	1.4962	0.1346	
		FS	0.6805	2.6278	0.0086***	
		BLC	0.0716	0.1765	0.8599	
	0.75	Constante	0.5260	0.4808	0.6307	0.2380
		EIC	0.7247	2.2715	0.0231**	
		FS	0.2571	1.0017	0.3165	
		BLC	0.1558	0.2890	0.7726	
CER	0.25	Constante	0.3333	0.4041	0.6862	0.2841
		EIC	0.3810	1.6807	0.0928*	
		FS	0.1905	1.2434	0.2137	
		BLC	0.4286	1.8001	0.0718*	
	0.5	Constante	0.7896	1.0740	0.2828	0.2434
		EIC	0.2805	1.2675	0.2050	
		FS	0.1091	0.4888	0.6250	
		BLC	0.4831	1.5700	0.1164	
	0.75	Constante	0.5018	0.5619	0.5742	0.2040
		EIC	0.5275	1.8763	0.0606*	
		FS	0.0440	0.1026	0.9183	
		BLC	0.5934	1.4762	0.1399	

Nota: * $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$.

En cuanto al cumplimiento de las normativas ambientales (CER), los resultados indican un papel más selectivo de las covariables. En $\tau = 0.25$, tanto el EIC ($\beta = 0.3810$; $p = 0.0928$) como el BLC ($\beta = 0.4286$; $p = 0.0718$) son positivos y

marginalmente significativos, lo que implica que, entre las unidades con bajo cumplimiento, prácticas de conservación más sólidas y mayores beneficios comunitarios se asocian con una mejor adherencia normativa. En la mediana ($\tau = 0.50$), ninguno de los predictores alcanza niveles convencionales de significancia (todos $p > 0.10$), lo que apunta a una zona media relativamente “plana” de la distribución, donde las diferencias en el cumplimiento pueden estar impulsadas por factores no capturados por EIC/FS/BLC (por ejemplo, capacidad institucional de fiscalización, intensidad de auditorías o mecanismos de coordinación). En $\tau = 0.75$, el EIC reaparece como predictor marginal ($\beta = 0.5275$; $p = 0.0606$), mientras que la FS permanece prácticamente nula en todo el rango ($p = 0.2137\text{--}0.9183$). Cabe destacar que el pseudo R^2 es mayor en el cuantil inferior (0.2841) y disminuye hacia el extremo superior (0.2040), lo que indica que el modelo ajusta mejor los déficits de cumplimiento que las variaciones entre los casos con alto cumplimiento.

En conjunto, los perfiles cuantílicos respaldan una interpretación sustantiva alineada con la lógica de la economía circular: la capacidad de conservación ambiental (EIC) es la dimensión más consistentemente relevante, especialmente en los segmentos de alta eficiencia y alto cumplimiento, mientras que la sostenibilidad financiera (FS) resulta clave principalmente para el grupo medio de EWU, lo que sugiere que las restricciones de costos y financiamiento constituyen un cuello de botella central para el desempeño operativo “promedio”, pero no son el principal factor diferenciador en los extremos. Los beneficios comunitarios (BLC) adquieren mayor importancia donde el cumplimiento es más débil, lo que sugiere que los co-beneficios sociales y el arraigo con los actores locales pueden acompañar las primeras mejoras en la adherencia normativa.

Desde el punto de vista metodológico, estos hallazgos justifican el uso de la regresión cuantil con Bootstrap: las estimaciones basadas en la media probablemente ocultarían el hecho de que los determinantes del desempeño difieren entre unidades de bajo, medio y alto rendimiento, que es precisamente el tipo de heterogeneidad que el enfoque cuantílico está diseñado para revelar.

La Fig. 2 visualiza cómo los efectos estimados sobre la EWU evolucionan a lo largo de la distribución condicional ($\tau = 0.25, 0.50, 0.75$) y destaca el grado de incertidumbre mediante intervalos de confianza Bootstrap al 95%. El coeficiente de EIC se mantiene positivo en todo el rango y se vuelve más pronunciado hacia el cuantil superior, lo que es consistente con la idea de que las prácticas de impacto ambiental y conservación diferencian cada vez más a las unidades de mayor eficiencia; en contraste, la FS alcanza su máximo en el cuantil mediano, lo que indica que la sostenibilidad financiera está más fuertemente asociada con niveles “típicos” de eficiencia que con los desempeños más bajos o más altos.

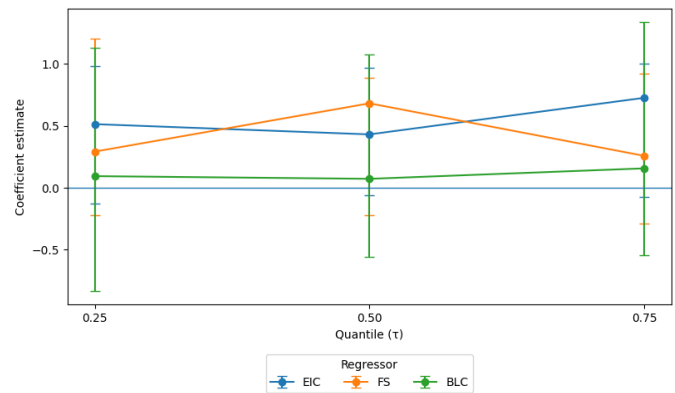


Fig. 2 Coeficientes de regresión cuantil con intervalos de confianza Bootstrap al 95% (EWU).

El coeficiente de BLC se mantiene cercano a cero a lo largo de los cuantiles, lo que sugiere una asociación directa comparativamente débil con la eficiencia una vez que se consideran el EIC y la FS; es importante señalar que los amplios intervalos de confianza —especialmente en los extremos— indican que las estimaciones para cuantiles extremos son menos precisas, por lo que la inferencia debe enfatizar el patrón de heterogeneidad (EIC en aumento en $\tau = 0.75$ y FS con pico en $\tau = 0.50$) más que los cambios marginales en $\tau = 0.25$.

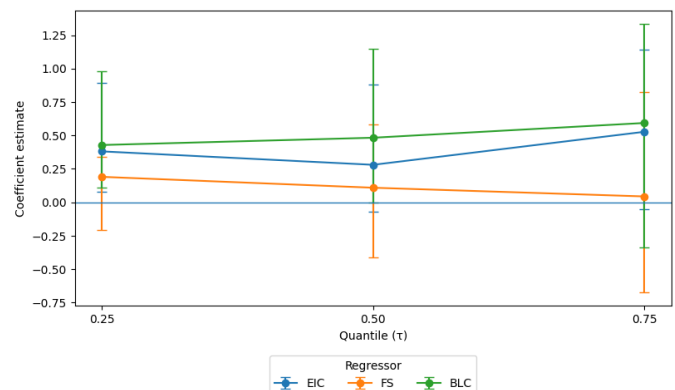


Fig. 3 Coeficientes de regresión cuantil con intervalos de confianza Bootstrap al 95% (CER).

La Fig. 3 muestra un claro perfil dependiente de cuantiles para CER: tanto EIC como BLC exhiben coeficientes consistentemente positivos en $\tau = 0.25, 0.50$ y 0.75 , con un fortalecimiento notable hacia la cola superior, particularmente en $\tau = 0.75$, lo que sugiere que la capacidad de conservación ambiental y los beneficios relacionados con la comunidad se vuelven más consecuentes entre las unidades de mayor cumplimiento. En contraste, FS permanece comparativamente débil y tiende a la baja a medida que τ aumenta, lo que indica que la sostenibilidad financiera no parece ser un diferenciador primario del cumplimiento regulatorio una vez que se

consideran EIC y BLC. Los intervalos de confianza Bootstrap del 95% son más amplios en las colas (especialmente $\tau = 0,75$), lo que indica una menor precisión para las estimaciones de cuantiles extremos; sin embargo, la forma general es coherente: el cumplimiento está más estrechamente alineado con la gestión ambiental y el anclaje comunitario que con las condiciones de financiamiento, y esta alineación se intensifica entre las observaciones de mejor desempeño.

V. CONCLUSIONES

El estudio tuvo como finalidad el poder conocer qué factores pueden favorecer o dificultar la aplicación de prácticas de economía circular en la gestión sostenible del agua. Para ello, fueron considerados dos aspectos: la eficiencia en el uso del agua (EWU) y el cumplimiento de las normativas ambientales (CER). El análisis fue realizado mediante regresión cuantil con Bootstrap en los niveles 0.25, 0.50 y 0.75, tomando en cuenta el impacto ambiental y conservación (EIC), la sostenibilidad financiera (FS) y los beneficios para la comunidad local (BLC). Debido a que la muestra fue de 50 participantes, el uso de Bootstrap ayudó a obtener resultados más estables para cada nivel evaluado.

Los resultados deben tomarse con cierta prudencia, ya que la muestra fue reducida y se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia. Aun así, el estudio brinda información útil para comprender mejor cómo se desarrolla la gestión circular del agua en ecosistemas altoandinos. También puede servir como punto de partida para futuras investigaciones con mayor cantidad de participantes y métodos más completos.

En cuanto a los resultados descriptivos, se observó que la mayoría de dimensiones presentó niveles medios. La eficiencia en el uso del agua alcanzó una media de 2.964, mientras que el cumplimiento de las normativas ambientales obtuvo una media de 3.057. También se evidenció una variación importante en ambas variables, lo que muestra que no todas las unidades analizadas presentan el mismo nivel de desempeño. Finalmente, las correlaciones fueron positivas y moderadas, destacando la relación entre el cumplimiento normativo y la conservación ambiental.

En cuanto a la EWU, los resultados muestran diferencias según el nivel de desempeño. En el cuantil inferior ($\tau = 0.25$), el impacto ambiental y conservación presentó una relación positiva y marginalmente significativa, mientras que la sostenibilidad financiera y los beneficios comunitarios no mostraron influencia estadística relevante. En el cuantil medio ($\tau = 0.50$), la sostenibilidad financiera se convirtió en el principal factor asociado a la eficiencia, lo que evidencia la importancia del financiamiento y la sostenibilidad de costos en niveles promedio de desempeño. Finalmente, en el cuantil superior ($\tau = 0.75$), el impacto ambiental y conservación volvió a ser significativo, indicando que las unidades con mayor eficiencia presentan mejores capacidades de monitoreo y conservación ambiental.

Respecto al cumplimiento de las normativas ambientales (CER), los resultados también mostraron comportamientos diferenciados. En el cuantil inferior, tanto el impacto ambiental y conservación como los beneficios para la comunidad local presentaron efectos positivos y marginalmente significativos. En el cuantil medio no se encontraron relaciones estadísticamente significativas, lo que podría estar relacionado con factores institucionales o de fiscalización no incluidos en el modelo. En el cuantil superior, el impacto ambiental y conservación volvió a presentar significancia, mientras que la sostenibilidad financiera no mostró influencia importante en ninguno de los cuantiles analizados.

En general, los hallazgos indican que el fortalecimiento de la economía circular en la gestión del agua requiere estrategias diferenciadas según el nivel de desempeño. Para mejorar los niveles promedio de eficiencia, resulta importante fortalecer aspectos financieros y mecanismos de recuperación de costos. Por otro lado, alcanzar niveles altos de eficiencia y cumplimiento ambiental depende más de acciones relacionadas con monitoreo, conservación y restauración ambiental. Asimismo, en contextos de bajo cumplimiento, los beneficios dirigidos a la comunidad pueden contribuir a mejorar la participación y la legitimidad de las políticas ambientales.

Finalmente, futuras investigaciones deberían ampliar el tamaño de la muestra e incorporar variables relacionadas con gobernanza, capacidad institucional y fiscalización ambiental. De igual manera, sería importante utilizar diseños metodológicos más avanzados que permitan fortalecer la interpretación de los resultados. En términos generales, el estudio resalta la necesidad de desarrollar políticas adaptadas a los ecosistemas altoandinos, considerando factores ambientales, sociales e institucionales que favorezcan una gestión sostenible del recurso hídrico.

REFERENCES

- [1] L. Nagy *et al.*, « South American mountain ecosystems and global change – a case study for integrating theory and field observations for land surface modelling and ecosystem management », *Plant Ecol. Divers.*, vol. 16, n° 1-2, p. 1-27, mars 2023, doi: 10.1080/17550874.2023.2196966.
- [2] R. Yaulilahua-Huacho *et al.*, « Using Water Footprint Indicators to Support Biodiversity Conservation and Rights-Based Water Governance in the Andean High Andes: A Scoping Review and Framework », *Conservation*, vol. 5, n° 4, p. 71, nov. 2025, doi: 10.3390/conservation5040071.
- [3] V. E. Quispe-Mejía *et al.*, « Impact of Leachates from the Chupaca Landfill on Agricultural Soil Quality », *International Journal of Environmental Impacts*, vol. 8, n° 2, p. 381-391, avr. 2025, doi: 10.18280/ije.080217.
- [4] E. Espinoza, A. Baltodano, et N. Requena, « Spatiotemporal Analysis of Water Quality and Optical Changes Induced by Contaminants in Lake Chinchaycocha Using Sentinel-2 and in Situ Data », *Water (Basel)*, vol. 17, n° 15, p. 2195, juill. 2025, doi: 10.3390/w17152195.
- [5] V. Hernández-Chover, L. Castellet-Viciano, R. Fuentes, et F. Hernández-Sancho, « Circular economy and efficiency to ensure the sustainability in the wastewater treatment plants », *J. Clean. Prod.*, vol. 384, p. 135563, janv. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135563.

- [6] G. L. Kyriakopoulos, « Circular economy and sustainable strategies: Theoretical framework, policies and regulation challenges, barriers, and enablers for water management », dans *Water Management and Circular Economy*, Elsevier, 2023, p. 197-230. doi: 10.1016/B978-0-323-95280-4.00014-X.
- [7] L. R. Flores-Vilcapoma *et al.*, « Analysis of Artificial Intelligence on Warehouse Management in the Peruvian Pharmaceutical Sector: A Quantitative Study », dans *Proceedings of the 23rd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI): « Engineering, Artificial Intelligence, and Sustainable Technologies in service of society »*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2025. doi: 10.18687/LACCEI2025.1.1.1937.
- [8] L. A. Bunclark et G. J. Scott, « Benchmarking corporate water reporting in emerging economies: the case of Peru », *Sustainability Accounting, Management and Policy Journal*, vol. 13, n° 1, p. 114-151, janv. 2022, doi: 10.1108/SAMPJ-02-2020-0031.
- [9] V. Kandpal, A. Jaswal, E. D. R. Santibanez Gonzalez, et N. Agarwal, « Circular Economy Principles: Shifting Towards Sustainable Prosperity », 2024, p. 125-165. doi: 10.1007/978-3-031-52943-6_4.
- [10] A. K. Pandey, « Sustainable water management through integrated technologies and circular resource recovery », *Environ. Sci. (Camb)*, vol. 11, n° 8, p. 1822-1846, 2025, doi: 10.1039/D5EW00103J.
- [11] K. Sharma *et al.*, « Design and implementation of closed-loop water reuse systems in urban and industrial settings for maximizing resource recovery and minimizing waste », *Desalination Water Treat.*, vol. 320, p. 100850, oct. 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100850.
- [12] V. A. Tzanakakis, A. G. Capodaglio, et A. N. Angelakis, « Insights into Global Water Reuse Opportunities », *Sustainability*, vol. 15, n° 17, p. 13007, août 2023, doi: 10.3390/su151713007.
- [13] P. M. Rodrigues, F. S. Pinto, et R. C. Marques, « A framework for enabling conditions for wastewater reuse », *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 46, p. 355-366, mai 2024, doi: 10.1016/j.spc.2024.02.022.
- [14] A. Delgado, D. J. Rodriguez, C. A. Amadei, et M. Makino, « Water in Circular Economy and Resilience (WICER) Framework », *Util. Policy*, vol. 87, p. 101604, avr. 2024, doi: 10.1016/j.jup.2023.101604.
- [15] J. Fraser et N. C. Kunz, « Water Stewardship: Attributes of Collaborative Partnerships between Mining Companies and Communities », *Water (Basel)*, vol. 10, n° 8, p. 1081, août 2018, doi: 10.3390/w10081081.
- [16] J. A. Quiroz *et al.*, « Water Resources Evaluation and Sustainability Considering Climate Change and Future Anthropic Demands in the Arequipa Region of Southern Peru », *Sustainability*, vol. 15, n° 23, p. 16270, nov. 2023, doi: 10.3390/su152316270.
- [17] L. F. Cifuentes-Herrera, L. P. Romero-Duque, O. E. A. Núñez, et J. M. Trilleras, « Integrated Water Resource Management under Ecosystem Services Approach—The Chimulala Micro-watershed, Peru », *Environ. Manage.*, vol. 75, n° 4, p. 945-960, avr. 2025, doi: 10.1007/s00267-024-02092-z.
- [18] Z. Khanam, F. M. Sultana, et F. Mushtaq, « Environmental Pollution Control Measures and Strategies: An Overview of Recent Developments », dans *Geospatial Analytics for Environmental Pollution Modeling*, Cham: Springer Nature Switzerland, 2023, p. 385-414. doi: 10.1007/978-3-031-45300-7_15.
- [19] G. Mannina, H. Gulhan, et B.-J. Ni, « Water reuse from wastewater treatment: The transition towards circular economy in the water sector », *Bioresour. Technol.*, vol. 363, p. 127951, nov. 2022, doi: 10.1016/j.biortech.2022.127951.
- [20] M. A. Ali et M. Kamraju, « The Role of Community Participation in Sustainable Integrated Water Resources Management: Challenges, Opportunities, and Current Perspectives », 2024, p. 325-344. doi: 10.1007/978-3-031-62079-9_18.
- [21] S. B. Green, « How Many Subjects Does It Take To Do A Regression Analysis », *Multivariate Behav. Res.*, vol. 26, n° 3, p. 499-510, juill. 1991, doi: 10.1207/s15327906mbr2603_7.