



Vol. 2 Núm. 1 2026- ISSN: 3119-7132 (En línea)

Recibido: 25 de abril de 2026

Aceptado: 27 de junio de 2026

ARTÍCULO ORIGINAL

<https://doi.org/10.58719/e2yfv03>

EVALUACIÓN COMPARATIVA DE CAPTACIONES TIPO BARRAJE Y TIROLESA A NIVEL DE PROTOTIPO EN TUYU RURI, ÁNCASH, PERÚ

COMPARATIVE EVALUATION OF WEIR AND TYROLEAN INTAKES AT PROTOTYPE SCALE IN TUYU RURI, ÁNCASH, PERU

Yony Rodríguez Minaya¹ , Rosario Polo Salazar¹ , Diana Broncano Minaya¹ , Wilmer Mejia Huerta¹ 
 Lourdes Puma Trejo¹ 

¹ Universidad Nacional Santiago Antunez de Mayolo, Huaraz, Perú.

Autor de Correspondencia:

Dr. Yony Rodríguez Minaya

yrodriguez@unasam.edu.pe

Cómo citar este artículo: Rodríguez Y., Polo R., Broncano D., Mejia W. & Puma L. (2026). Evaluación comparativa de capacitaciones tipo barraje y tirolesa a nivel de prototipo en tuyu Ruri, Ancash, Perú. *Revista de Investigación Intercultural Asampitakoyete*, 2(1), 29 – 40. <https://doi.org/10.58719/e2yfv03>

RESUMEN

En las cuencas altoandinas, la variación del caudal y el transporte de sedimentos condicionan continuidad, calidad y requerimientos de mantenimiento de las captaciones de agua superficial. El objetivo fue evaluar comparativamente la eficiencia de captaciones tipo barraje y tirolesa a nivel de prototipo en el Centro Experimental Tuyu Ruri, Marcará, Áncash, Perú. Fue una investigación descriptiva-comparativa, con diseño no experimental y seguimiento longitudinal. Las unidades de análisis fueron dos prototipos sometidos a condiciones hidráulicas similares durante ocho días, con ocho pares de observaciones. Mediante formatos de medición hidráulica, fichas de campo, registro fotográfico y análisis de muestras se registraron caudal de ingreso, caudal captado, rebose, eficiencia, pérdida de carga, turbiedad inicial y final, sólidos sedimentables, obstrucciones, tiempo y costo de mantenimiento. Se realizaron estadísticos descriptivos y se compararon con pruebas pareadas, intervalos de confianza y tamaños del efecto. La tirolesa alcanzó mayor caudal captado medio (0,6717 L/s) y eficiencia hidráulica (87,73 %) que el barraje (0,6294 L/s y 82,22 %); la diferencia de eficiencia fue -5,51 puntos porcentuales para barraje menos tirolesa, $t(7) = -3,804$, $p = 0,0067$, $d_z = -1,34$. El barraje presentó menor pérdida de carga media (7,389 vs 8,324 m.c.a.). La reducción porcentual de turbidez fue similar (21,74 % y 21,06 %; $p = 0,655$), al igual que los sólidos sedimentables ($p = 0,844$). La tirolesa acumuló menos obstrucciones, menor tiempo de limpieza y costo de mantenimiento; además, mostró mejor desempeño integral en las condiciones evaluadas; mientras que, el barraje conservó la ventaja específica de una menor pérdida de carga.

Palabras clave: Captación de agua, eficiencia hidráulica, captación tipo barraje, captación tipo tirolesa, sedimentos, mantenimiento.



ABSTRACT

In high Andean basins, variations in flow rate and sediment transport influence the continuity, quality, and maintenance requirements of surface water intakes. The aim was to comparatively evaluate the efficiency of weir and sluice gate intakes at the prototype level at the Tuyu Ruri Experimental Center, Marcará, Áncash, Peru. This was a descriptive-comparative study with a non-experimental design and longitudinal follow-up. The units of analysis were two prototypes subjected to similar hydraulic conditions for eight days, with eight pairs of observations. Using hydraulic measurement forms, field data sheets, photographic records, and sample analysis, the following parameters were recorded: inflow rate, captured flow rate, overflow, efficiency, head loss, initial and final turbidity, settleable solids, obstructions, maintenance time, and cost. Descriptive statistics were performed and compared using paired tests, confidence intervals, and effect sizes. The zip line achieved a higher average captured flow rate (0.6717 L/s) and hydraulic efficiency (87.73 %) than the weir (0.6294 L/s and 82.22 %); the efficiency difference was -5.51 percentage points for the weir without the zip line, $t(7) = -3.804$, $p = 0.0067$, $d_z = -1.34$. The weir exhibited a lower average head loss (7.389 vs. 8.324 m.w.c.). The percentage reduction in turbidity was similar (21.74 % and 21.06 %; $p = 0.655$), as were the settleable solids ($p = 0.844$). The zip line accumulated fewer obstructions required less cleaning time and had lower maintenance costs; furthermore, it showed better overall performance under the evaluated conditions; while the weir retained the specific advantage of a lower head loss. **Keywords:** water intake, hydraulic efficiency, weir intake, Tyrolean intake, sediments, maintenance

INTRODUCCIÓN

Las estructuras de captación constituyen el primer componente de los sistemas de abastecimiento y condicionan tanto el volumen derivado como la calidad inicial del agua que ingresa a conducción y tratamiento (Mays, 2010). Su desempeño adquiere especial relevancia en cauces de montaña, donde las pendientes pronunciadas, la variación temporal del caudal y la movilización de sólidos pueden reducir la continuidad del servicio, incrementar las pérdidas hidráulicas y elevar la frecuencia de limpieza. La selección de una estructura no debe basarse únicamente en el caudal nominal, sino también en la estabilidad del flujo, la pérdida de carga, la respuesta frente a sedimentos y las exigencias de operación y mantenimiento (Chanson, 2004; Righetti & Lanzoni, 2008; Subramanya, 2013).

En términos funcionales, el barraje es una obra transversal que eleva el nivel del agua para facilitar su derivación. La carga generada favorece la captación continua, aunque la

reducción de velocidad aguas arriba puede promover depósitos y requerir estructuras de limpieza o desarenación (Mays, 2010). La captación tirolesa, en cambio, deriva el agua mediante una rejilla instalada en el lecho y una galería colectora. En estas tomas de fondo, la capacidad de captación depende de la pendiente, la forma y separación de las barras, la relación de vacíos y las condiciones de aproximación del flujo (Carrillo et al., 2018; Krochin, 1968). Además, la selección del perfil de las barras es relevante porque la oclusión por gravas puede disminuir el caudal derivado y aumentar las labores de mantenimiento (García et al., 2018).

La evidencia experimental no establece una superioridad universal entre alternativas. Righetti y Lanzoni, (2008) demostraron que el flujo sobre rejillas de fondo es tridimensional y que el coeficiente de descarga varía con las condiciones hidráulicas. Carrión et al. (2022) corroboraron, mediante experimentación y

dinámica de fluidos computacional, que la inclinación, la geometría y la ubicación de la rejilla modifican la captación y la remoción de sedimentos. En aplicaciones recientes, Ali y Morocho, (2024) propusieron una rejilla de fondo para sostener la captación bajo cargas elevadas de residuos; Masson et al. (2025) observaron discrepancias entre el caudal derivado medido y las ecuaciones empíricas; y Shen et al. (2024) identificaron la influencia del número de Froude y de la relación entre longitud y espaciamiento de barras. Esta evidencia empírica, respaldan el uso de prototipos para comprobar el desempeño bajo condiciones equivalentes.

En el Perú, Cabello y Vallejos, (2018) encontraron que la toma tirolesa puede requerir menor inversión y generar menor impacto ambiental; mientras que, el barrage ofrece mayor control del nivel. Así mismo, Julon, (2019) destacó la importancia del diseño hidráulico y del revestimiento para asegurar el caudal derivado en una bocatoma convencional. En Áncash, Pereda y Quintana, (2017) concluyeron que la captación tirolesa resulta favorable en cauces altoandinos variables por su filtración de sólidos, aunque el barrage puede captar volúmenes importantes en regímenes estables. Por su parte, Beltrán y Peralta, (2025) comprobaron mediante modelación que un barrage mixto puede incrementar sustancialmente el caudal derivado. En conjunto, estos antecedentes muestran que la decisión depende de la topografía, la oferta hídrica, la carga sedimentaria, los costos y la finalidad del sistema.

El Centro Experimental Tuyu Ruri, ubicado en el distrito de Marcará, región Áncash, Perú, presenta condiciones representativas de un entorno altoandino con variación de caudal y presencia de material sólido. En este espacio no se disponía de una comparación técnica de captaciones tipo barrage y tirolesa sometidas al mismo caudal de ingreso y observadas durante un periodo común. Esta brecha limitaba la

selección de alternativas para proyectos hidráulicos y sanitarios en contextos semejantes, donde una decisión basada solo en el caudal captado puede ocultar diferencias de calidad, pérdidas de energía y requerimientos de mantenimiento.

En la investigación base, la eficiencia se entendió como la capacidad de derivar el caudal disponible con pérdidas limitadas y condiciones operativas favorables. Se operacionalizó mediante caudal captado, rebose, porcentaje de eficiencia, estabilidad, velocidad, pérdida de carga, turbiedad, sólidos sedimentables, obstrucciones, intervenciones, tiempo y costo de limpieza. La turbiedad se consideró un indicador físico de partículas suspendidas y de aceptabilidad del agua, sin asumir que por sí sola demostrara inocuidad sanitaria (World Health Organization [WHO], 2022). Asimismo, la operación continua exige prever limpieza, inspección y control de componentes, especialmente en sistemas rurales (Organización Panamericana de la Salud [OPS], 2005). Esta aproximación multidimensional evita que un único indicador defina de forma aislada la alternativa más conveniente.

La brecha empírica consistió, por tanto, en determinar si las ventajas atribuidas a cada estructura se mantenían al evaluar prototipos bajo condiciones hidráulicas similares. El objetivo del presente estudio fue evaluar comparativamente la eficiencia de las captaciones tipo barrage y tipo tirolesa a nivel de prototipo en el Centro Experimental Tuyu Ruri, región Áncash, Perú.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en el Centro Experimental Tuyu Ruri, distrito de Marcará, región Áncash, Perú, durante 2026. El contexto corresponde a una zona altoandina en la que el comportamiento de las captaciones está condicionado por pendientes, variación del caudal y transporte de sedimentos. La unidad

física de estudio estuvo constituida por dos prototipos instalados en el centro: una captación tipo barraje y una captación tipo tirolesa. El seguimiento comprendió ocho días consecutivos de evaluación bajo condiciones hidráulicas comparables.

Diseño de la investigación

Se adoptó un enfoque cuantitativo, aplicada y alcance descriptivo-comparativo. El diseño fue no experimental.

Población, muestra, participantes o unidades de análisis

La población conceptual comprendió las alternativas de captación de agua superficial aplicables a un sistema de abastecimiento en Tuyu Ruri. La muestra fue intencional y estuvo integrada por los dos prototipos disponibles. Para el análisis se consideraron ocho pares completos de mediciones, equivalentes a 16 registros sistema-día.

Variables, categorías e indicadores

El factor comparativo fue el tipo de captación. Los indicadores hidráulicos fueron caudales de ingreso, captado y de salida o rebose, expresados en L/s; eficiencia de captación, en porcentaje; velocidad (m/s); y pérdida de carga (m de columna de agua). Los indicadores de calidad y sedimentos fueron turbidez inicial y final, en unidades nefelométricas; reducción absoluta y porcentual de turbidez; y sólidos sedimentables (mL/L). La operación se caracterizó mediante continuidad, número de obstrucciones, intervenciones de mantenimiento, intervalo entre intervenciones, tiempo de limpieza y costo.

La comparación se estructuró por pares diarios: cada jornada aportó una observación del barraje y otra de la tirolesa bajo un caudal de ingreso común.

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se emplearon formatos de medición hidráulica y fichas de campo para registrar dimensiones,

estado físico, caudal, velocidad, niveles, pérdidas y observaciones operativas; además, revisión documental y registro fotográfico. Las muestras de sólidos sedimentables se evaluaron con cono Imhoff.

Procedimiento

Primero se levantaron las dimensiones y características geométricas de ambas estructuras y se prepararon sus representaciones técnicas. Luego se instalaron los prototipos y se efectuó el monitoreo diario durante ocho jornadas. En cada sistema se registraron el caudal de ingreso, el caudal captado, el rebose, la velocidad y la pérdida de carga; se tomaron muestras para turbidez y sólidos sedimentables; y se documentaron obstrucciones, intervenciones, minutos de limpieza y costos. Los registros fueron revisados, organizados en formato ancho y largo y contrastados para asegurar que cada día tuviera un par completo.

La eficiencia hidráulica se calculó como la razón entre caudal captado y caudal de ingreso multiplicada por 100

$$\eta = (Q_c / Q_i) \times 100$$

Donde: η = eficiencia hidráulica (%)

Q_c = caudal captado (L/s)

Q_i = caudal de ingreso (L/s)

Análisis de datos

Microsoft Excel se utilizó para organizar datos y elaborar cuadros; AutoCAD y Revit, para planos y representación de los prototipos; y R/RStudio, mediante el código incluido en los anexos del informe, para el análisis estadístico y los gráficos. Se obtuvieron media, mediana, desviación estándar, rango, rango intercuartílico, coeficiente de variación e intervalo de confianza del 95 %. Para diferencias pareadas se verificó normalidad con Shapiro-Wilk; se aplicó t de Student pareada cuando correspondió y Wilcoxon pareado para conteos o diferencias no

normales. Se fijó $\alpha = 0,05$ y se informaron d_z o correlación biserial de rangos. También se analizaron correlaciones Pearson o Spearman entre turbidez inicial y final y entre caudales. La pérdida de carga se modeló de forma lineal y cuadrática, evaluando R^2 ajustado, AICc, RMSE por validación cruzada dejando uno fuera, Breusch-Pagan y distancia de Cook.

Los resultados se interpretaron de acuerdo con la dirección, magnitud, intervalo de confianza, significancia estadística y relevancia técnica de cada indicador. La base analizada estuvo completa y no requirió imputación de datos.

RESULTADOS

Eficiencia hidráulica y estabilidad de captación

La tirolesa presentó el mejor aprovechamiento del caudal de ingreso. Con un ingreso medio común de 0,7656 L/s, captó 0,6717 L/s vs. 0,6294 L/s del barraje y redujo el rebose medio a 0,0940 L/s, comparado con 0,1362 L/s. La eficiencia media fue 87,73 % en la tirolesa y 82,22 % en el barraje. Además, la tirolesa mostró mayor estabilidad: su desviación estándar fue 0,46 puntos porcentuales y su coeficiente de variación 0,52 %; mientras que, el barraje alcanzó 3,78 puntos y 4,60 %, respectivamente.

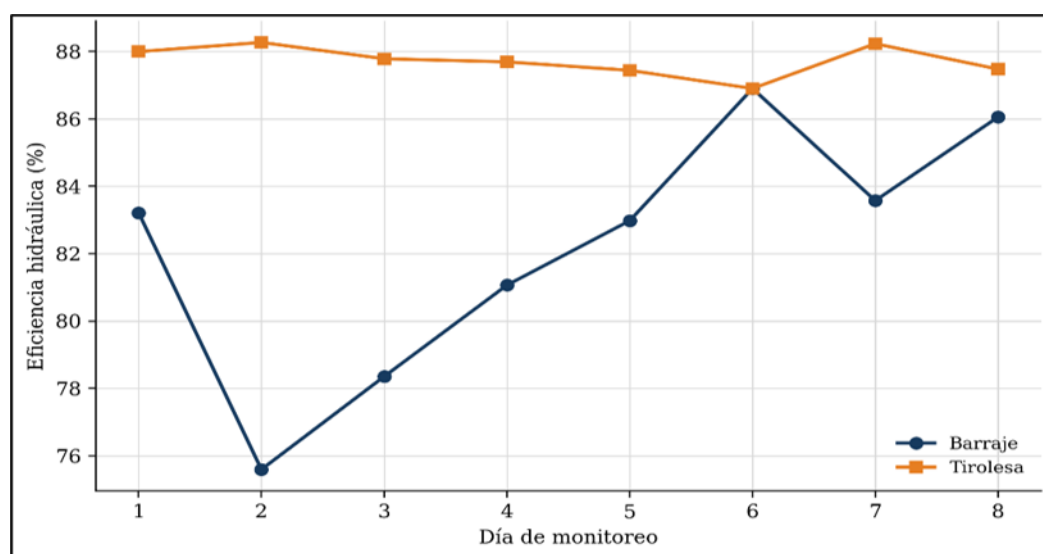
La ventaja ocurrió en siete jornadas y hubo un empate.

La Figura 1 confirma que la eficiencia tirolesa permaneció entre 86,90 % y 88,27 %; el barraje osciló entre 75,59 % y 86,90 %. La mayor separación se observó en el segundo día y ambas estructuras coincidieron en el sexto. La comparación pareada produjo una diferencia barraje menos tirolesa de -5.51 puntos porcentuales, IC 95 % [-8,93 -2,08]; $t(7) = -3,804$, $p = 0,0067$, $d_z = -1,34$. El caudal captado también favoreció a la tirolesa: diferencia media -0.042 L/s, IC 95 % [-0,068 -0,016], $t(7) = -3,831$, $p = 0,006$, $d_z = -1,35$. Los resultados evidenciaron una ventaja hidráulica amplia y consistente de la captación tirolesa.

Los modelos de eficiencia en función del caudal captado reforzaron la diferencia de estabilidad. En el barraje, la relación fue intensa, $R^2 = 0,867$, con pendiente significativa ($p < 0,001$); en la tirolesa, el R^2 fue 0,339 y la pendiente no fue significativa ($p=0,130$). La eficiencia de la tirolesa permaneció concentrada cerca de 88 % pese a la variación del caudal; mientras que, la del barraje mostró una respuesta más variable. En conjunto, los modelos describieron una mayor estabilidad hidráulica de la captación tirolesa durante el monitoreo.

Figura 1

Eficiencia hidráulica diaria de las captaciones



Nota. La eficiencia corresponde a $Q_c/Q_i \times 100$; $n = 8$ jornadas por sistema. Datos del informe de investigación.

Comportamiento de la turbiedad y sólidos sedimentables

El comportamiento sedimentológico fue semejante entre estructuras. Como muestra la Tabla 1, la tirolesa alcanzó menor turbidez final media (55,25 NTU) que el barraje (57,38 NTU) y menor variabilidad, aunque recibió una turbidez inicial media ligeramente menor. La reducción absoluta fue 17,50 NTU para el barraje y 16,75 NTU para la tirolesa; al ajustar por el valor inicial,

los porcentajes fueron 21,74 % y 21,06 %. La diferencia de 0,67 puntos porcentuales no fue estadísticamente significativa, $t(7) = 0,466$, $p = 0,655$, $d_z = 0,16$. Los sólidos sedimentables promediaron 0,169 mL/L en el barraje y 0,200 mL/L en la tirolesa, y la prueba de Wilcoxon mostró un comportamiento estadísticamente semejante, $W = 12,5$, $p = 0,844$, $r_b = -0,11$.

Tabla 1

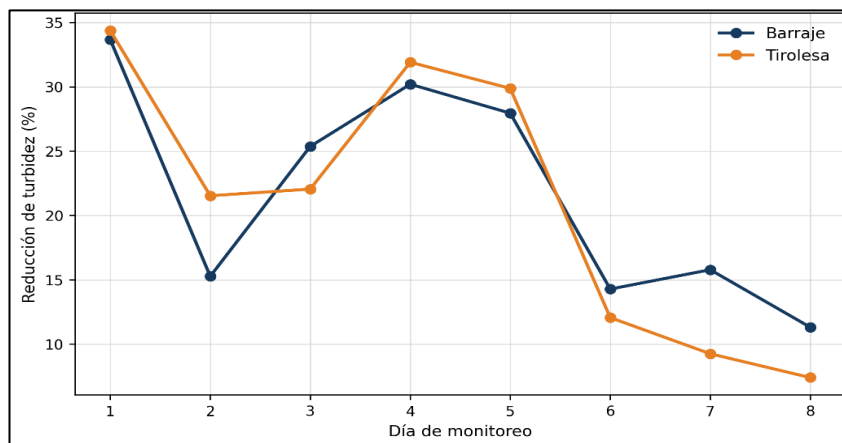
Indicadores de turbidez y sólidos sedimentables por tipo de captación

Indicador	Barraje M (DE)	Tirolesa M (DE)	Diferencia B-T	Prueba	Hallazgo
Turbiedad inicial (NTU)	74,88 (18,20)	72 (17,70)	2,875 NTU	Descriptiva	Cargas de entrada próximas
Turbiedad final (NTU)	57,38 (8,60)	55,25 (6,30)	2,125 NTU	Descriptiva	Menor media en tirolesa
Reducción absoluta (NTU)	17,50 (10,45)	16,75 (11,54)	0,750 NTU	Descriptiva	Ligera ventaja del barraje
Reducción porcentual (%)	21,74 (8,51)	21,06 (10,56)	0,67 pp	$t(7)=0,466$; $p=0,655$	Similar
Sólidos sedimentables (mL/L)	0,169 (0,096)	0,200 (0,135)	Md=0,005	$W=12,5$; $p=0,844$	Similar
CV de turbidez final (%)	14,99	11,40	-3,59 pp	Descriptiva	Mayor estabilidad tirolesa

Nota: **M** = media; **DE** = desviación estándar; Md = mediana de las diferencias; **CV** = coeficiente de variación; **pp** = puntos porcentuales; **B-T** = barraje menos tirolesa; **n** = 8 por sistema.

La Figura 2 evidencia oscilaciones diarias amplias en la reducción porcentual de turbidez. El barraje superó a la tirolesa en cuatro jornadas, la tirolesa fue mayor en tres y una observación fue próxima. Los intervalos de confianza descriptivos se superpusieron y los coeficientes de variación fueron 39,16 % y 50,14 %. La turbidez inicial se asoció fuertemente con la final, tanto en el

barraje, $r = 0,946$, $p < 0,001$ como en la tirolesa, $p = -0,964$, $p < 0,001$. Estos resultados muestran que la calidad final siguió de cerca la carga de entrada en ambos sistemas. En términos comparativos, la reducción de turbidez y los sólidos sedimentables presentaron un desempeño equivalente bajo las condiciones hidráulicas evaluadas.

Figura 2*Reducción porcentual diaria de turbidez*

Nota: La reducción porcentual se calculó respecto de la turbidez inicial; n = 8 jornadas por sistema.
 Datos del informe de investigación.

Integración hidráulica, operativa y de mantenimiento

La comparación funcional integró desempeño hidráulico y mantenimiento. Ambos prototipos mantuvieron continuidad durante el 100 % de las jornadas. La tirolesa acumuló seis obstrucciones frente a diez del barraje, requirió tres intervenciones frente a cuatro y presentó tres días sin obstrucción frente a uno. El tiempo total de limpieza fue 63 min en la tirolesa y 175 min en el barraje; el costo acumulado fue S/ 49.20 y S/ 110.00, respectivamente. La diferencia descriptiva fue operativamente favorable a la tirolesa.

La Tabla 2 resume los principales contrastes y muestra el intercambio técnico: la tirolesa favoreció caudal y eficiencia; mientras que, el barraje presentó menor pérdida de carga. La diferencia mediana de obstrucciones fue una unidad diaria a favor de la tirolesa, con IC bootstrap 95 % [0, 1], W = 3,5; p = 0,219 y correlación biserial de rangos de 0,67. Los totales, la magnitud del efecto y la frecuencia de intervenciones evidenciaron una menor carga operativa para la captación tirolesa. El intervalo medio entre intervenciones fue 2,67 días en la tirolesa y dos días en el barraje.

Tabla 2*Contrastes pareados de desempeño hidráulico y operativo*

Contraste	Estimación B-T	IC 95 %	Prueba	p	Efecto	Interpretación
Eficiencia	-5,51 pp	[-8,93 -2,08]	t (7) =-3,804	0.0067	dz=-1,34	Favorece tirolesa
Caudal captado	-0,042 L/s	[-0,068 - 0,016]	t (7) =-3,831	0,006	dz=-1,35	Favorece tirolesa
Pérdida de carga	-0,935 m.c.a.	[-1,496 - 0,373]	t (7) =-3,934	0,006	dz=-1,39	Favorece barraje
Reducción de turbidez	0,67 pp	[-2,74- 4,08]	t (7) =0,466	0,655	dz=0,16	Similar
Obstrucciones	Md=1,0	[0- 1]	W=3,5	0,2188	rb=0,67	Favorece tirolesa
Tiempo de limpieza	14 min/d	[-6,32- 34,32]	t (7) =1,629	0,1473	dz=0,58	Favorece tirolesa

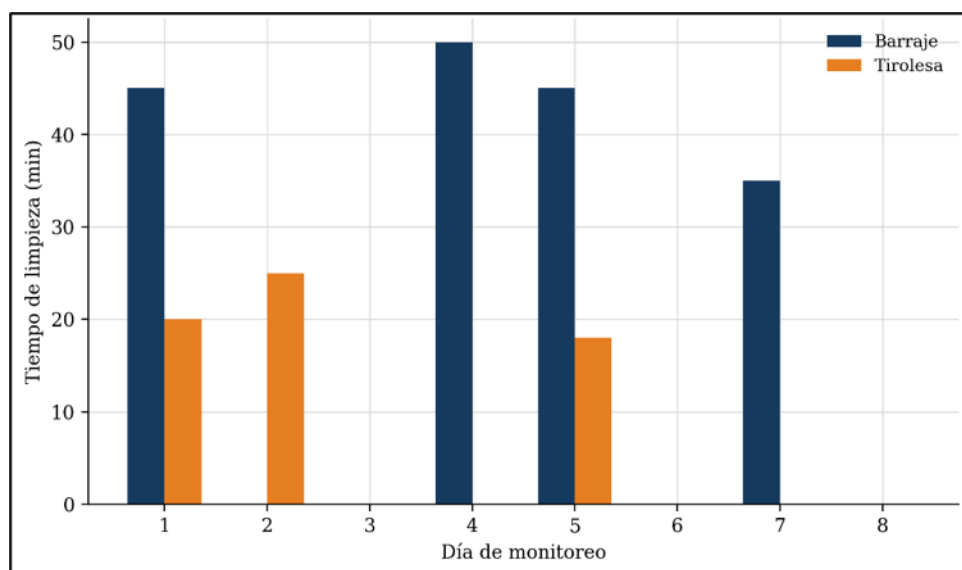
Nota. IC = intervalo de confianza; Md = mediana; pp = puntos porcentuales; dz = tamaño del efecto para diferencias pareadas; rb = correlación biserial de rangos; B-T = barraje menos tirolesa.

La pérdida de carga media fue 7,389 m.c.a. en el barraje y 8,324 m.c.a. en la tirolesa. La diferencia barraje menos tirolesa fue -0,935 m.c.a., IC 95 % [-1,496 - -0,373]; $t(7) = -3,934$, $p = 0,006$, $d_z = -1,39$; por este criterio específico, el barraje fue favorable. El modelo lineal de pérdida en función del caudal alcanzó R^2 ajustado = 0,9994 y RMSE de validación cruzada de 0,0216 m.c.a. El modelo

cuadrático redujo el error y representó con mayor precisión la curvatura de la relación hidráulica observada. En conjunto, ambos modelos describieron el incremento de la pérdida de carga con el caudal y confirmaron que el barraje mantuvo valores menores que la tirolesa en las jornadas evaluadas.

Figura 3

Tiempo de limpieza registrado por día



Nota. Los días sin barra indican ausencia de intervención. El total fue 175 min para el barraje y 63 min para la tirolesa. Datos del informe de investigación.

La Figura 3 muestra que las tareas de limpieza se concentraron en cuatro jornadas del barraje, con intervenciones de 45, 50, 45 y 35 min y en tres jornadas de la tirolesa, con 20, 25 y 18 min. El contraste pareado del tiempo diario obtuvo $t(7) = 1,629$, $p = 0,147$, $d_z = 0,58$. La diferencia acumulada, el tamaño del efecto y el menor costo evidenciaron una ventaja operativa de la

tirolesa. En conjunto, los resultados respondieron al objetivo general: la tirolesa ofreció mayor eficiencia, caudal y estabilidad, con menor carga de mantenimiento; el barraje conservó ventaja en pérdida de carga y una media ligeramente menor de sólidos sedimentables.

Tabla 3

Resumen de los resultados

Objetivo	Hallazgo	Evidencia	Magnitud	Criterio	Síntesis
1. Eficiencia hidráulica	Mayor eficiencia y estabilidad de la tirolesa	(Fig. 1; Tabla 2)	+5,51 pp	Hidráulico	Tirolesa favorable
2. Sedimentos	Reducción de turbidez y sólidos semejantes	(Tabla 1; Fig. 2)	$\Delta=0,67$ pp; $p=0,655$	Calidad	Similar

Objetivo	Hallazgo	Evidencia	Magnitud	Criterio	Síntesis
3. Operación	Menor mantenimiento en tirolesa; menor pérdida en barraje	(Tabla 2; Fig. 3)	63 vs 175 min	Operativo y energético	Balance integral favorable a tirolesa

Nota: El resumen integra los resultados descriptivos, inferenciales y operativos del monitoreo de ocho jornadas.

DISCUSIÓN

La evaluación comparativa mostró que la captación tirolesa tuvo el mejor desempeño integral en los prototipos y durante el periodo estudiado. Su eficiencia fue 5,51 puntos porcentuales mayor, captó más caudal con menor variabilidad y demandó menos tiempo y costo de limpieza. El barraje presentó la ventaja específica de una menor pérdida de carga. La reducción de turbidez y los sólidos sedimentables mostraron un comportamiento equivalente; por lo que, la diferenciación principal entre ambas estructuras se concentró en el rendimiento hidráulico y operativo.

La ventaja hidráulica de la tirolesa es coherente con estudios que relacionan el caudal derivado con la geometría de la rejilla y las condiciones de aproximación (Carrillo et al., 2018; Righetti & Lanzoni, 2008). También coincide con Masson et al. (2025), quienes mostraron que el rendimiento observado puede separarse de las predicciones empíricas y con Shen et al. (2024), quienes identificaron al número de Froude y a la relación entre longitud y espaciamiento de barras como variables influyentes. En el ámbito andino, Pereda y Quintana, (2017) y Cabello y Vallejos, (2018) señalaron ventajas de la toma tirolesa en topografía accidentada. A su vez, Beltrán y Peralta, (2025) demostraron la utilidad del barraje para regular el nivel e incrementar el caudal derivado. Los resultados de Tuyu Ruri confirman que, bajo condiciones altoandinas semejantes, la tirolesa combina mayor captación y estabilidad; mientras que, el barraje conserva un comportamiento energético favorable.

La menor pérdida de carga del barraje constituye una ventaja energética relevante. La hidráulica

de canales y estructuras establece que la geometría, la velocidad y las restricciones de paso determinan la disipación de energía (Chanson, 2004). En la tirolesa, el mayor caudal captado estuvo acompañado por una pérdida media superior; en el barraje, la menor captación coincidió con una pérdida de carga más baja. Los modelos lineal y cuadrático representaron con alta precisión esta relación dentro del rango evaluado. Por ello, el análisis integral muestra un intercambio técnico claro, la tirolesa maximiza el aprovechamiento del caudal y el barraje reduce el requerimiento energético asociado a la conducción.

La similitud en reducción de turbidez y sedimentación muestra que ambas estructuras manejaron de manera equivalente la carga sólida bajo las condiciones hidráulicas ensayadas. Los experimentos de Elçi, (2019) señalan que el desempeño sedimentológico depende de las características del sedimento, la rejilla y el flujo; asimismo, García et al. (2018) comprobaron que partículas cercanas al espaciamiento de las barras pueden producir oclusión y reducir el caudal derivado. Ali y Morocho, (2024) reportaron beneficios al optimizar la evacuación de materiales mediante una rejilla de fondo. En el presente estudio, las correlaciones altas entre turbidez inicial y final y la reducción porcentual, prácticamente igual, evidenciaron que la carga de entrada tuvo una influencia decisiva en la calidad final. Por ello, el barraje y la tirolesa presentaron un desempeño sedimentológico equivalente durante el monitoreo.

La menor cantidad de obstrucciones, el menor tiempo acumulado y el menor costo de mantenimiento de la tirolesa son compatibles con la búsqueda de soluciones rurales de operación accesible. La normativa peruana exige que las captaciones consideren protección, limpieza y mantenimiento; mientras que, la guía de la OPS, (2005) resalta la necesidad de procedimientos sistemáticos para conservar la continuidad operativa (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2006). En Tuyu Ruri, los totales registrados y los tamaños del efecto mostraron una ventaja práctica de la tirolesa, asociada con menos intervenciones y menores tiempos muertos por limpieza.

El estudio comparó ambas captaciones mediante ocho pares de mediciones obtenidos bajo condiciones hidráulicas similares en una misma localización experimental. Esta estructura de observación permitió valorar de forma integrada: caudal, eficiencia, pérdida de carga, la turbidez, sólidos sedimentables y mantenimiento.

La consistencia de los registros diarios mostró patrones definidos: superioridad hidráulica y operativa de la tirolesa, menor pérdida de carga en el barraje y equivalencia sedimentológica entre ambos sistemas. Estos resultados constituyen criterios técnicos directamente aplicables a la selección de captaciones en contextos altoandinos con características semejantes.

El aporte diferencial del artículo radica en integrar caudal, estabilidad, pérdida de carga, calidad, sedimentos y mantenimiento en una comparación pareada. La evidencia respalda a la tirolesa como alternativa técnicamente favorable para condiciones semejantes a Tuyu Ruri, debido a su mayor aprovechamiento del caudal, estabilidad operativa y menor demanda de mantenimiento. El barraje mantiene una ventaja específica cuando se prioriza una menor pérdida de carga. Esta lectura conjunta permite seleccionar la estructura según el balance entre

rendimiento hidráulico, comportamiento energético y exigencias operativas.

CONCLUSIONES

- La captación tipo tirolesa presentó el mejor desempeño integral en los prototipos evaluados en Tuyu Ruri. Captó mayor caudal, alcanzó una eficiencia media y mantuvo una variabilidad menor durante las ocho jornadas.
- La turbidez final siguió estrechamente la carga inicial, por lo que el desempeño sedimentológico estuvo condicionado principalmente por las características del agua de entrada. En operación, la tirolesa acumuló menos obstrucciones, tiempo de limpieza y costo; mientras que, el barraje conservó la ventaja de una menor pérdida de carga.
- El estudio aporta una comparación multidimensional para orientar decisiones en sistemas altoandinos. En contextos hidráulicos similares, la captación tirolesa constituye la alternativa prioritaria cuando se busca maximizar caudal, eficiencia, estabilidad y continuidad operativa. El barraje representa una opción favorable cuando la menor pérdida de carga es el criterio predominante.
- Los resultados sustentan una selección técnica basada en el balance entre aprovechamiento hidráulico, energía y mantenimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ali, J., & Morocho, G. (2024). *Optimización de la evacuación de sedimentos en una captación tipo convencional por medio del diseño de una rejilla de fondo en el río Mazar [Tesis de Pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]*. <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/27239>

- Beltrán, F., & Peralta, J. (2025). *Análisis hidráulico del barraje en el río Nepeña para incrementar el caudal del canal Quillhuay Alto-Cáceres del Perú-Santa, Áncash-2024* [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Santa]. <https://hdl.handle.net/20.500.14278/5290>
- Cabello, F., & Vallejos, O. (2018). *Análisis comparativo del diseño de una toma tipo tirolesa con el de una toma convencional: Caso de estudio, subcuenca del río Tulumayo* [Tesis de Pregrado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <https://doi.org/10.19083/tesis/624475>
- Carrillo, J., García, J., & Castillo, L. (2018). Experimental and numerical modelling of bottom intake racks with circular bars. *Water*, 10(5), Article 605. <https://doi.org/10.3390/w10050605>
- Carrión, E., Ortiz, P., & Nanía, L. (2022). Physical experimentation and 2D-CFD parametric study of flow through transverse bottom racks. *Water*, 14(6), Article 955. <https://doi.org/10.3390/w14060955>
- Chanson, H. (2004). *The hydraulics of open channel flow: An introduction; basic principles, sediment motion, hydraulic modelling, design of hydraulic structures* (2nd ed.). Elsevier Butterworth-Heinemann. <https://www.sciencedirect.com/book/9780750659789/hydraulics-of-open-channel-flow>
- Elçi, Ş. (2019). Assessment of sediment capture performances of Coanda and World Congress. International Association for Hydro-Environment Engineering and Research. <https://doi.org/10.3850/38WC092019-0499>
- García, J., Castillo, L., Haro, P., & Carrillo, J. (2018). Occlusion in bottom intakes with circular bars by flow with gravel-sized sediment: An experimental study. *Water*, 10(11), Article 1699. <https://doi.org/10.3390/w10111699>
- Julon, J. (2019). *Diseño de la bocatoma y canal de derivación de Pueblo Escondido, sector Marripón, distrito de Motupe, provincia y departamento de Lambayeque, 2017* [Tesis de Pregrado, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12423/2040>
- Krochin, S. (1968). *Diseño hidráulico*. Editorial Universitaria. <https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=13722>
- Masson, J., Barros, L., Varvasino, J., Lacunza, E., Consoli, P., & Liscia, S. (2025). Modelación física de toma tirolesa. En *Libro de trabajos de las VIII Jornadas de Investigación, Transferencia, Extensión y Enseñanza* (pp. 385-390). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/186469>
- Mays, L. (2010). *Water resources engineering* (2nd ed.). Wiley. <https://www.wiley.com/engb/Water%2BResources%2BEngineering%2C%2B2nd%2BEdition-p-9780470574164>

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2006). *Reglamento Nacional de Edificaciones: Norma OS.010, captación y conducción de agua para consumo humano*. <https://www.digesa.minsa.gob.pe/NormasLegales/Normas/OS.010.pdf>
- OPS. (2005). *Guía de operación y mantenimiento de captaciones especiales* (OPS/CEPIS/06.173). <https://iris.paho.org/handle/10665.2/55271>
- Pereda, C., & Quintana, G. (2017). *Análisis funcional y económico de la captación de agua de la quebrada Maku mediante una bocatoma de barraje mixto y bocatoma tipo tirolesa en el distrito de Pira-Huaraz* [Tesis de Pregrado, Universidad Privada Antenor Orrego]. <https://hdl.handle.net/20.500.12759/3599>
- Righetti, M., & Lanzoni, S. (2008). Experimental study of the flow field over bottom intake racks. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 15-22. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:1\(15\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:1(15))
- Shen, G., Liang, Y., Parsaie, A., Wan, W., Wu, Y., & Mehmood, Z. (2024). Integrated learning model for water intake capacity of Tyrolean weirs under supercritical flow. *Journal of Hydroinformatics*, 26(9), 2443-2455. <https://doi.org/10.2166/hydro.2024.192>
- Subramanya, K. (2013). *Engineering hydrology* (4th ed.). McGraw-Hill Education (India). <https://books.google.com/books?id=nRVJzweACAAJ>
- WHO. (2022). *Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>