

DOI: 10.24850/j-tyca-18-03-07

Artículos

Regionalización ecohidrológica basada en SIG para definir el espaciamiento de zanjas de infiltración en Lagunas de Tajzara, Tarija, Bolivia

GIS-based ecohydrological regionalization to define infiltration trench spacing in Lagunas de Tajzara, Tarija, Bolivia

Armando Schmidt-Gómez¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9433-126X>

¹Universidad Privada Domingo Savio-Facultad de Ingeniería, Tarija, Bolivia, armando.schmidt@doctorado.unini.edu.mx

Autor para correspondencia: Armando Schmidt Gómez,
armando.schmidt@doctorado.unini.edu.mx

Resumen

Se presenta una metodología de regionalización ecohidrológica basada en SIG para definir el espaciamiento diferenciado de zanjas de infiltración en doce Unidades Ecohidrológicas Homogéneas (UEH) de la cuenca endorreica de Lagunas de Tajzara, Tarija, Bolivia. El procedimiento integró variables topográficas, edáficas, de cobertura vegetal e



hidrológicas; la estimación de lluvia de diseño mediante distribución de Gumbel modificada y curvas intensidad-duración-frecuencia; el cálculo de escorrentía directa mediante el método CN-SCS; y un balance volumétrico almacenamiento-infiltración corregido por pendiente. Para $T = 10$ años y $t = 1$ h se obtuvo una intensidad de 23.1 mm/h, expresada como lámina de precipitación de 23.1 mm. Los resultados diferenciaron respuestas contrastantes: Patanca y La Banda presentaron baja infiltración básica (10.5 y 14.19 mm/h) y mayor escorrentía de diseño (8.45 y 9.97 mm), mientras que Arenales y Muñayo-Pasajes mostraron mayor infiltración (24.87 y 26.9 mm/h) y menor escorrentía relativa. La verificación interna, entendida como comprobación de consistencia del procedimiento y no como validación externa de campo, mostró alta correspondencia entre espaciamientos calculados y regionalizados ($D = 0.992D_{III} - 0.425$; $R^2 = 0.9995$). La metodología aporta un criterio territorial para evitar diseños uniformes en ecosistemas altoandinos semiáridos con heterogeneidad marcada de suelo, pendiente, cobertura e infiltración.

Palabras clave: conservación del agua, sistema de información geográfica, SIG, precipitación, cuenca, vegetación, Tarija, Bolivia.

Abstract

This study presents a GIS-based ecohydrological regionalization methodology to define differentiated infiltration trench spacing in twelve Homogeneous Ecohydrological Units (HEUs) of the endorheic basin of Lagunas de Tajzara, Tarija, Bolivia. The procedure integrated topographic, edaphic, vegetation-cover and hydrological variables; design rainfall estimation using the modified Gumbel distribution and intensity-duration-frequency curves; direct runoff calculation using the CN-SCS

method; and a storage-infiltration volumetric balance corrected for slope. For $T = 10$ years and $t = 1$ h, a rainfall intensity of 23.1 mm/h was obtained and expressed as a precipitation depth of 23.1 mm. The results distinguished contrasting responses: Patanca and La Banda showed low basic infiltration rates (10.5 and 14.19 mm/h) and higher design runoff (8.45 and 9.97 mm), whereas Arenales and Muñayo-Pasajes showed higher infiltration rates (24.87 and 26.9 mm/h) and lower relative runoff. Internal verification, understood as a consistency check of the procedure and not as external field validation, showed high agreement between calculated and regionalized spacings ($D = 0.992D_{III} - 0.425$; $R^2 = 0.9995$). The methodology provides a territorial criterion to avoid uniform designs in semi-arid high Andean ecosystems with marked heterogeneity in soil, slope, vegetation cover and infiltration.

Keywords: water conservation, geographical information systems, GIS, precipitation, basins, vegetation, Tarija, Bolivia.

Recibido: 22/05/2026

Aceptado: 29/07/2026

Publicado *ahead of print*: 24/09/2026

1. Introducción

Los ecosistemas altoandinos semiáridos son altamente sensibles a cambios en cobertura vegetal, estructura del suelo y régimen de disturbio, porque pequeñas modificaciones en rugosidad, agregación y porosidad alteran la partición entre precipitación, escorrentía e infiltración. En ambientes áridos y semiáridos, la infiltración regula la disponibilidad de

humedad del suelo, la generación de escorrentía y la resiliencia ecosistémica frente al estrés hídrico (González-Zamora et al., 2021; Xue & Yang, 2025).

En la cuenca endorreica Lagunas de Tajzara, Tarija, la degradación de la cobertura vegetal y el uso pastoril intensivo condicionan la respuesta ecohidrológica. Los pastizales altoandinos regionales, dominados por especies como paja amarilla (*Stipa ichu*), thola (*Baccharis* sp.), tolilla (*Parastrephia lepidophylla*) y kanlli (*Tetraglochin cristatum*), se desarrollan bajo presión antrópica sostenida; por ello, los cambios de uso y cobertura del suelo modifican la escorrentía y la regulación hídrica a escala de cuenca (Beck et al., 2001; Mejía-Veintimilla et al., 2024).

El sobrepastoreo y el pisoteo ganadero favorecen la compactación, reducen la infiltración e incrementan la escorrentía superficial y la erosión. En pastizales áridos, semiáridos y altoandinos, la reducción del disturbio y la conservación de la cobertura vegetal mejoran la infiltración y la retención de agua en el suelo (Centeri, 2022; Chávez-Collantes et al., 2025; Fan et al., 2024).

La funcionalidad hidrológica de los pastizales altoandinos depende del estado del suelo y la vegetación; cuando ambos se degradan, aumenta la conectividad superficial, se intensifican flujos concentrados y disminuye la capacidad de regulación ecohidrológica del paisaje (Mosquera et al., 2022).

En este contexto, las zanjas de infiltración constituyen una práctica de conservación de suelo y agua orientada a interceptar escorrentía somera, aumentar el tiempo de residencia del agua, promover su infiltración y reducir la energía erosiva. Su eficacia aumenta cuando el

diseño se ajusta a pendiente, suelo, cobertura y lluvia de diseño (Gutiérrez-Benítez et al., 2019; Pizarro et al., 2024).

La eficiencia de estas medidas depende de su ajuste a las condiciones locales. El método Curve Number del SCS, mantenido por el United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service (2025), permite estimar escorrentía directa a partir de precipitación, suelo, cobertura y condición hidrológica; integrado con SIG, facilita representar heterogeneidad espacial en cuencas con información limitada (Bawa et al., 2025).

El vacío metodológico que aborda este trabajo radica en que el diseño de zanjas de infiltración suele aplicarse con espaciamientos uniformes o criterios generales, aun cuando las cuencas altoandinas semiáridas presentan fuerte variabilidad espacial en pendiente, suelos, cobertura vegetal, infiltración y generación de escorrentía. En Tajzara, esta heterogeneidad hace necesario pasar de un criterio uniforme de diseño a un criterio regionalizado, capaz de diferenciar unidades funcionales y traducirlas en parámetros de espaciamiento técnicamente comparables.

Bajo esta premisa, la regionalización ecohidrológica se entiende como la integración espacial de variables topográficas, edáficas, de cobertura e hidrológicas para delimitar unidades con comportamiento funcional semejante frente a la infiltración, la escorrentía y el almacenamiento temporal del agua. El objetivo del estudio fue desarrollar y verificar internamente una metodología de regionalización ecohidrológica basada en SIG para definir el espaciamiento diferenciado de zanjas de infiltración por UEH en la cuenca endorreica de Lagunas de Tajzara, Tarija, Bolivia. La verificación interna se asumió como la evaluación de coherencia entre variables de entrada, respuesta

hidrológica y espaciamientos resultantes; por tanto, no constituye una validación externa de campo posterior a la construcción de zanjas, sino una comprobación de consistencia del procedimiento aplicado.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

La cuenca endorreica Lagunas de Tajzara se localiza en la zona alta de Tarija, Bolivia, dentro de la Reserva Biológica Cordillera de Sama. El sitio Ramsar Cuenca de Tajzara, número 1030, fue designado el 13 de junio de 2000 y comprende 5 500 ha de humedales altoandinos; la cuenca total alcanza 47 233 ha, equivalentes al 43.5 % de la reserva. Su relieve combina valles, piedemontes, laderas, colinas y superficies onduladas, lo que condiciona la redistribución de escorrentía, la conectividad superficial y el almacenamiento temporal de agua (Beck et al., 2001; Ramsar Sites Information Service, 2000).

Las condiciones ambientales de Tajzara y la presión antrópica prolongada han favorecido degradación edáfica y vegetal. Esta situación justifica intervenciones de restauración ecohidrológica basadas en variables edáficas, geomorfológicas, de cobertura e hidrológicas espacialmente explícitas (Centeri, 2022; Chávez-Collantes et al., 2025; Mosquera et al., 2022).

El área presenta un mosaico de superficies receptoras, zonas de transporte, áreas de concentración de escorrentía, laderas de impluvio, humedales, arenales y sectores intervenidos. Los suelos evaluados muestran predominio de texturas franco arenosas, arena franca, franco arcilloso-arenosas y franco, con espesores superficiales variables, bajo

contenido de materia orgánica en varias UEH y susceptibilidad a compactación, formación de costras y erosión. El uso del suelo está dominado por pastizales y matorrales con presión pastoril, por lo que la cobertura vegetal y la condición superficial se incorporaron como variables relevantes para la asignación de CN y para la interpretación de la respuesta ecohidrológica.

2.2. Delimitación de Unidades Ecohidrológicas Homogéneas

La delimitación de las UEH se efectuó en entorno SIG mediante la integración de variables topográficas, edáficas, de cobertura vegetal e hidrológicas. Para la base espacial se empleó cartografía del Instituto Geográfico Militar de Bolivia a escala 1:50 000, registros de campo georreferenciados, medición de pendientes con eclímetro y un Modelo Digital de Elevación (MDE) corregido hidrológicamente y ajustado a la escala cartográfica de trabajo. A partir del MDE se derivaron pendiente, dirección de flujo, acumulación de flujo y curvatura. Las capas edáficas incorporaron textura, espesor, materia orgánica, limo, arcilla, arena estimada y estabilidad estructural; las capas de cobertura/uso del suelo diferenciaron pastizales, matorrales, áreas agrícolas, cuerpos de agua, arenales y paisajes eólicos. La capa hidrológica integró posición funcional en la ladera, grupo hidrológico de suelo, infiltración básica determinada por el método de Porchet, número de curva y escorrentía de diseño.

Los insumos edáficos procedieron de la caracterización de las UEH y de análisis de suelo empleados en el estudio; la arena se incorporó como porcentaje estimado mediante la relación $100 - (\text{limo} + \text{arcilla})$ cuando no existió medición directa independiente, lo que permitió contrastar la

textura con el triángulo textural. La cobertura y la vegetación dominante se obtuvieron mediante cartografía temática, verificación de campo y reclasificación hidrológica. La infiltración básica se integró como variable de capacidad infiltrativa por UEH, mientras que los datos meteorológicos provinieron de las estaciones Campanario, Copacabana Tajzara, El Molino Tomayapo, Iscayachi San Antonio, Sama Cumbre, Sama Iscayachi, Tojo, Tomayapo Pueblo y Yunchará, con series de lluvia máxima diaria de longitud variable según disponibilidad de registros.

El procedimiento SIG siguió cinco etapas:

- i. preparación y corrección hidrológica del MDE
- ii. derivación de variables morfométricas
- iii. reclasificación de capas edáficas, cobertura/uso, pendiente y respuesta hidrológica
- iv. superposición espacial de variables para generar unidades preliminares
- v. depuración cartográfica mediante criterios de continuidad espacial, coherencia geomorfológica y homogeneidad interna de variables dominantes.

Las UEH resultantes no se definieron solo por proximidad espacial, sino por comportamiento ecohidrológico comparable frente a infiltración, escorrentía, almacenamiento temporal y susceptibilidad a degradación física.

La regionalización consideró doce UEH de diseño: Patanca, Muñayo-Pasajes, Copacabana Valle, Cruce camino a Pujzara, Pujzara, La Banda, Vizcarra-Cobre, Corralcancha, Chorcoya, Copacabana Pie Monte, Arenales y Faldeo Chorcoya. Los cuerpos de agua, paisajes eólicos y áreas agrícolas

se delimitaron cartográficamente, pero no fueron considerados como unidades de diseño de zanjas por su condición funcional diferenciada o por no corresponder al objetivo de restauración hidrológica mediante zanjas. La trazabilidad de las variables, sus fuentes y su uso metodológico se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Trazabilidad de variables, fuentes y uso de la información para la regionalización ecohidrológica mediante SIG.

Variable	Fuente/obtención	Procesamiento SIG o cálculo	Uso en la metodología
Pendiente y morfometría	MDE corregido hidrológicamente	Derivación de pendiente, flujo acumulado, dirección de flujo y curvatura	Corrección de espaciamiento y posición funcional
Textura, limo, arcilla, arena, MO y espesor	Información edáfica de las UEH y análisis de suelo empleados en el estudio	Clasificación textural, estabilidad estructural e interpretación de susceptibilidad física	Grupo hidrológico, IEs/PIER e infiltración potencial
Cobertura/uso del suelo	Cartografía temática, verificación de campo y reclasificación de cobertura	Agrupación en clases hidrológicas: pastizal, matorral, agrícola, agua, arenales y paisaje eólico	Asignación de condición hidrológica y CNII
Infiltración básica (fc)	Mediciones o estimaciones por UEH utilizadas en el estudio	Clasificación de capacidad infiltrativa y contraste con QIII	Diseño de sección y espaciamiento de zanjas
CNII y QIII	Cruce suelo-cobertura bajo criterio NRCS con apoyo de SIG/SWAT	Estimación de S, Ia y escorrentía directa para condición II y III	Cálculo de escorrentía de diseño
UEH	Integración multifactorial	Superposición, reclasificación y depuración cartográfica	Unidad final de análisis y diseño

2.3. Diseño de zanjas de infiltración

Las zanjas de infiltración son estructuras de conservación de agua y suelo construidas sobre curvas de nivel, cuya función principal es interceptar la escorrentía superficial, almacenarla temporalmente y favorecer su infiltración en el perfil del suelo. Su funcionamiento se basa en la captura del flujo proveniente del área de impluvio, la acumulación temporal del agua dentro de la sección de la zanja y la posterior infiltración hacia el suelo, reduciendo la velocidad del escurrimiento superficial y la energía erosiva del flujo. Este proceso contribuye a la recuperación de humedad edáfica, la disminución de la erosión laminar y la mejora progresiva de la cobertura vegetal en laderas degradadas (Flores-Villanelo, 2012; Gutiérrez-Benítez et al., 2019; Pizarro et al., 2024).

La Figura 1 representa los componentes principales del funcionamiento hidrológico de una zanja de infiltración: zona de impluvio, escorrentía superficial, zona de captura, almacenamiento temporal, infiltración y camellón. Estos elementos permiten comprender el criterio de diseño adoptado en el estudio, en el cual el espaciamiento entre zanjas depende del volumen de escorrentía aportante, la capacidad de almacenamiento de la sección y la pendiente del terreno.

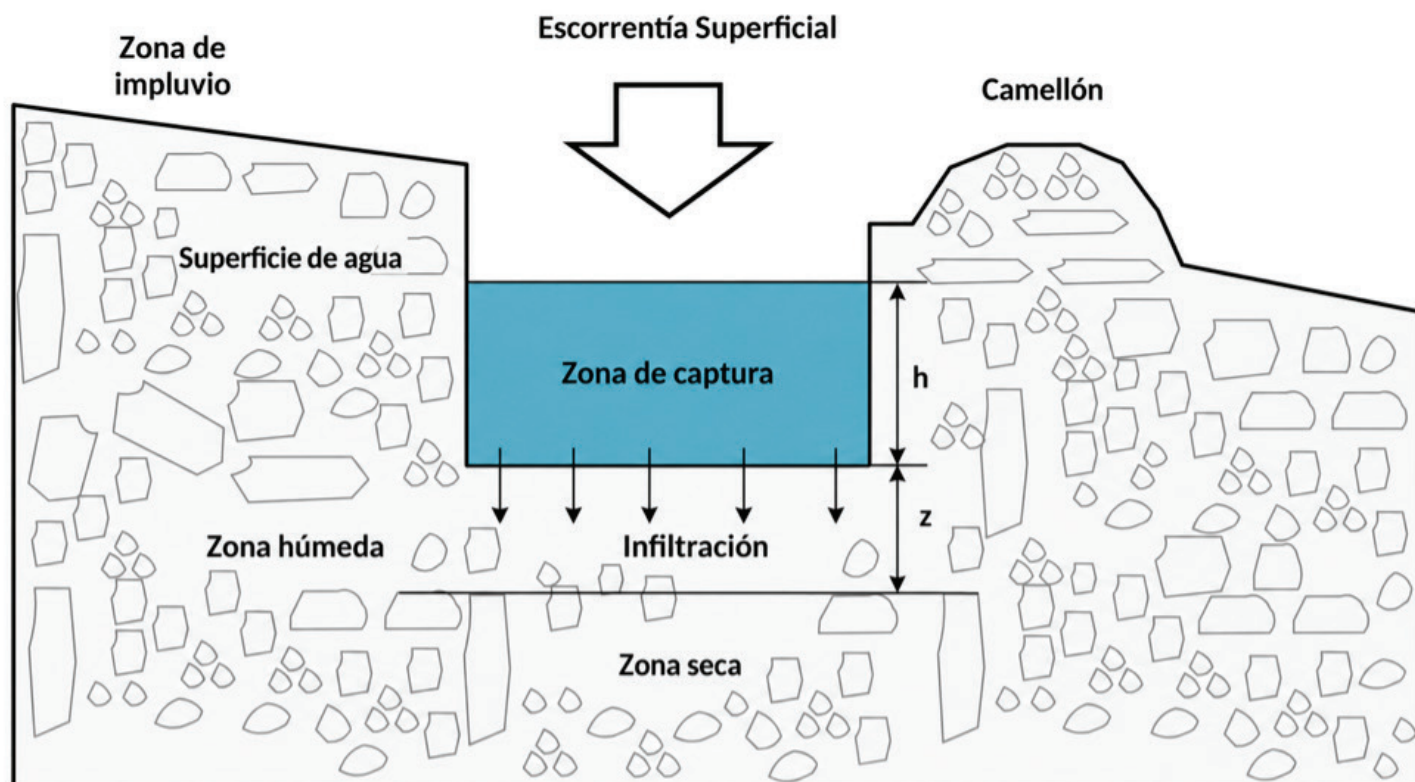


Figura 1. Funcionamiento básico de una zanja de infiltración en ladera: interceptación de escorrentía, almacenamiento temporal e infiltración en el suelo. Adaptado de Flores-Villanelo (2012), Gutiérrez-Benítez et al. (2019) y Pizarro et al. (2024).

Para el diseño de las zanjas de infiltración, se determinó el espaciamiento entre zanjas como variable principal de control hidrológico y conservación de suelo, integrando la escorrentía aportante, la capacidad de almacenamiento de la zanja y la corrección por pendiente.

En el cálculo hidrológico de zanjas de infiltración, se consideran los siguientes criterios metodológicos:

El periodo de retorno (T) expresa el intervalo medio entre eventos hidrometeorológicos de una magnitud igualada o excedida, con base

probabilística $T = 1/p$, donde p es la probabilidad anual de excedencia (Federal Highway Administration, 2024; National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service, s. f.).

El periodo de retorno (T) se expresó en función de la probabilidad acumulada de no excedencia mediante la Ecuación (1):

$$T = \frac{1}{1-F(x)} \quad (1)$$

donde:

T = el periodo de retorno, expresado en años

$F(x)$ = la probabilidad de no excedencia

$1 - F(x)$ = la probabilidad anual de excedencia del evento

Para una probabilidad de no excedencia de 90 %, $F(x) = 0.9$, el periodo de retorno asociado es de 10 años.

Las curvas intensidad-duración-frecuencia (IDF) relacionan intensidad máxima, duración y periodo de retorno; por tanto, son la base para estimar la lluvia de diseño y la escorrentía que deben captar las zanjas de infiltración (Alsumaiti et al., 2024; Giudicianni et al., 2026).

La altura de lluvia máxima diaria para un periodo de retorno (T) se estimó mediante la Ecuación (2).

$$h_{d,T} = E_d \cdot (1 + K \log T) \quad (2)$$

La altura de lluvia para una duración específica t y un periodo de retorno T se calculó mediante la Ecuación (3).

$$h_{t,T} = E_d \left(\frac{t}{t_d} \right)^\beta \cdot (1 + K \log T) \quad (3)$$

La intensidad máxima de lluvia para una duración t y un periodo de retorno T , correspondiente a la relación intensidad-duración-frecuencia, se obtuvo con la Ecuación (4).

$$I_{t,T} = \frac{E_d}{t} \left(\frac{t}{t_d} \right)^\beta \cdot (1 + K \log T) \quad (4)$$

donde:

E_d = Valor modal de la altura de lluvia máxima diaria (mm)

$$E_d = \bar{h}_{d,T} - 0.4506 \cdot S_d$$

$\bar{h}_{d,T}$ = Promedio de la altura de lluvia máxima diaria (mm)

S_d = Desviación estándar de la altura de lluvia máxima diaria (mm)

t = Tiempo de duración de la lluvia (h)

t_d = Tiempo máximo de duración de la lluvia (h); para la región de estudio se adoptó $t_d = 3$ h.

β = Coeficiente de pendiente de la curva de reducción temporal; $\beta = 0.2m$ para $t > 2$ h y $\beta = 0.7m$ para $t < 2$ h.

K = Factor de frecuencia asociado a la distribución de Gumbel modificada:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n C_t \cdot n_i}{N}$$

$$C_t = \frac{S_t}{0.557 \cdot E_d}$$

n_i = Número de años con registros de lluvia máxima diaria en cada estación considerada

N = Número total de años con registros de lluvia máxima diaria en el conjunto de estaciones analizadas

T = Periodo de retorno expresado en años

Se adoptó la intensidad de lluvia de una hora por ser una escala usual en eventos intensos y en curvas IDF. Como el método CN-SCS requiere lámina total de precipitación, la intensidad $I_{tT} = 23.1$ mm/h para $t = 1$ h se expresó como $P = 23.1$ mm.

La información meteorológica se organizó a partir de las estaciones consideradas en el análisis de lluvia máxima diaria: Campanario, Copacabana Tajzara, El Molino Tomayapo, Iscayachi San Antonio, Sama Cumbre, Sama Iscayachi, Tojo, Tomayapo Pueblo y Yunchará. Para cada estación se calculó la media, desviación estándar, coeficiente de variación, número de registros disponibles y parámetros de la distribución de Gumbel modificada; el número de registros por estación varió entre 7 y 32 años, según la disponibilidad de la serie. Esta información permitió regionalizar la lluvia de diseño y expresar la intensidad de una hora como lámina de precipitación compatible con el método CN-SCS.

La escorrentía del área de impluvio se estimó con el método CN-SCS del NRCS. Aunque la formulación tradicional adopta $I_a = 0.20S$, se utilizó $I_a = 0.05S$ como criterio conservador de diseño, debido a que evaluaciones posteriores del método han mostrado que una relación de abstracción inicial cercana a 0.05 puede ajustar mejor datos lluvia-escorrentía y evita subestimar el aporte superficial en cuencas pequeñas o con respuesta hidrológica rápida (Woodward et al., 2003; United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2025). En este estudio, la modificación no altera la estimación de la retención potencial S ; únicamente ajusta la abstracción inicial para dimensionar las zanjas bajo un escenario precautorio frente a desbordes.

Bajo esta formulación, cuando $P > 0.05S$, la escorrentía directa se calculó mediante la Ecuación (5); cuando $P \leq 0.05S$, se consideró que la precipitación no supera la abstracción inicial, por lo que no se genera escorrentía directa y se asumió $Q = 0$. El parámetro S corresponde a la retención potencial máxima del suelo y se estimó mediante la Ecuación (6) en función del valor de CNII, que representa la condición antecedente de humedad II, equivalente a una condición media de humedad del suelo. De este modo, la modificación introducida en el procedimiento no afecta la estimación de S , sino únicamente la relación adoptada para la abstracción inicial (United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2025).

$$Q = \frac{(P - 0.05 \cdot S)^2}{P + 0.95 \cdot S} \quad (5)$$

La retención potencial máxima del suelo (S) se estimó mediante la Ecuación (9).

$$S = \frac{25400}{CN_{II}} - 254 \quad (6)$$

donde:

Q = Lámina de escorrentía directa del impluvio de la zanja de infiltración (mm)

P = Lámina de precipitación de diseño del evento de una hora (mm)

CNII = Valor del número de curva para la condición de humedad antecedente II

Los valores de CN se obtuvieron de la combinación cobertura/uso del suelo y grupo hidrológico de suelo, con apoyo operativo de SIG y SWAT, manteniendo la base conceptual del método NRCS (Espinales Cedeño et al., 2021; United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, 2025).

El criterio de diseño asumió que el volumen de escorrentía aportante debe ser compatible con la capacidad de almacenamiento e infiltración de la zanja para evitar desbordes (Pizarro et al., 2024; Wang & Guo, 2020). El balance hídrico simplificado utilizado se presenta en la Figura 2.

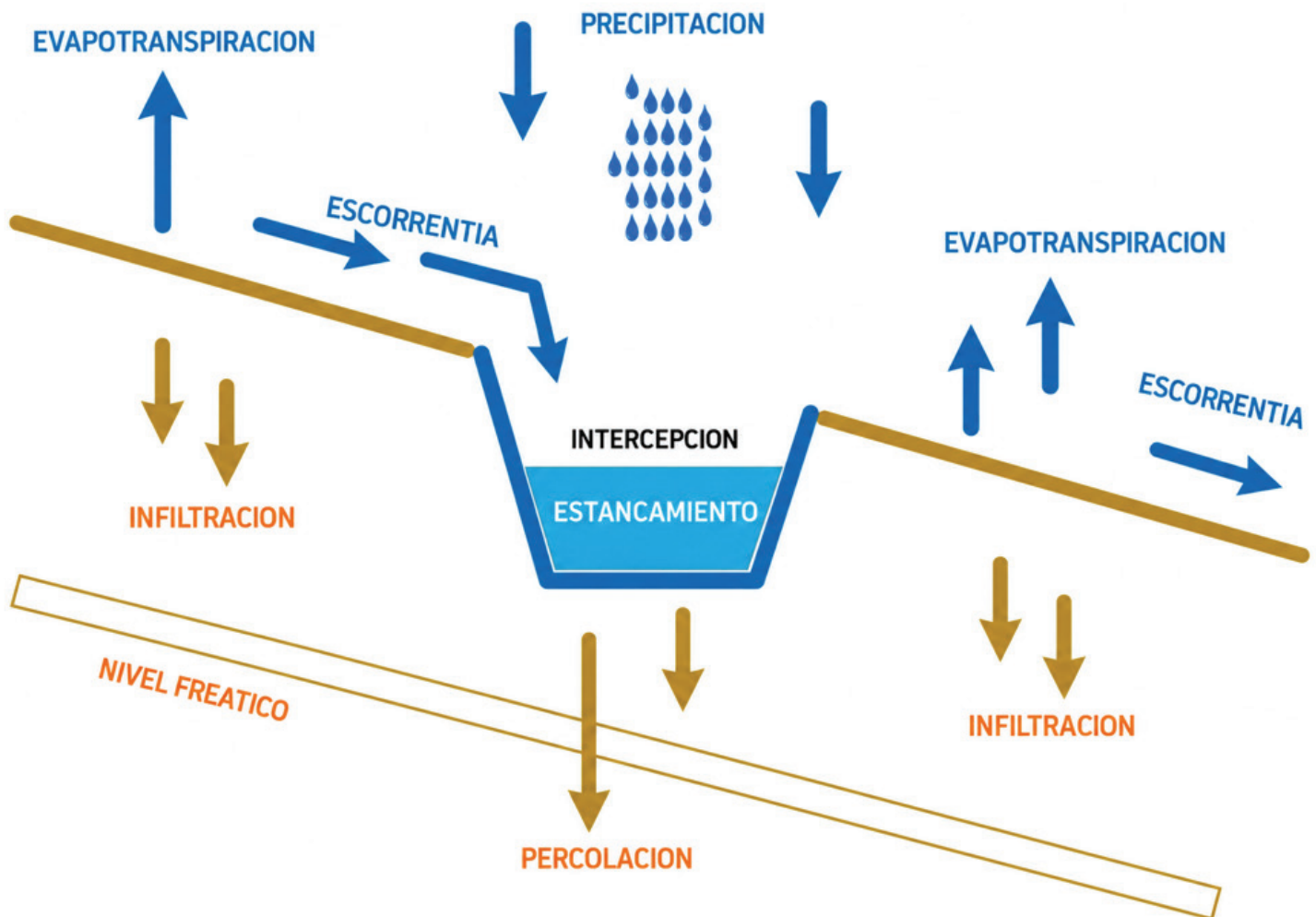


Figura 2. Balance hídrico simplificado en ladera para el funcionamiento hidrológico de zanjas de infiltración. Elaboración propia con base en Chow et al. (1988) y Dingman (2015).

El aporte hacia la zanja se estimó considerando la escorrentía superficial del impluvio y la precipitación directa sobre la zanja, según la Ecuación (7):

$$A_q = \frac{(Q \cdot L + P \cdot W_u)}{1000} \quad (7)$$

donde:

A_q = Área de escorrentía (m^2)

Q = Escorrentía generada aguas arriba (mm)

P = Altura de precipitación de diseño (mm)

W_u = Ancho superior de la zanja (m)

El área de almacenamiento de la zanja A_z , expresada en m^2 , se estimó a partir de una sección transversal rectangular, considerando el producto entre la profundidad efectiva de la zanja H y el ancho efectivo W . Este valor fue utilizado posteriormente en el balance volumétrico para definir la separación entre zanjas.

A partir del balance entre el aporte de escorrentía del área de impluvio, la precipitación directa sobre la zanja y la capacidad de almacenamiento de una sección rectangular, se determinó la separación horizontal entre zanjas considerando un margen de seguridad de 30 %. La separación en superficie horizontal L , expresada en metros, se calculó mediante la Ecuación (8):

$$L = \frac{W \cdot (1000H - P)}{Q} \quad (8)$$

donde:

L = separación horizontal entre zanjas, expresada en m

W = ancho efectivo de la zanja, expresado en m

H = profundidad efectiva de la zanja, expresada en m

P = lámina de precipitación de diseño, expresada en mm

Q = lámina de escorrentía directa del área de impluvio, expresada en mm

1000H = conversión de la profundidad de la zanja de metros a milímetros

La longitud obtenida corresponde a condiciones ideales de superficie horizontal; por tanto, para considerar el efecto de la pendiente del terreno, se aplicó una corrección en función del ángulo de inclinación (θ), expresada mediante la Ecuación (9):

$$L_i = \frac{L}{\cos(\theta)} \quad (9)$$

Las separaciones se calcularon por UEH y por configuración geométrica, ajustando el diseño según infiltración, suelo, cobertura y CN.

Finalmente, se asignó una sección geométrica única por UEH, expresada como $A_{zanja} = b \times h$, donde b representa el ancho efectivo de la zanja y h su profundidad. Las UEH con menor infiltración y mayor escorrentía se asociaron con secciones mayores, mientras que las unidades con mayor infiltración se vincularon con secciones menores o intermedias; así, la variación del espaciamiento respondió a diferencias ecohidrológicas y no a múltiples geometrías simultáneas (Pizarro et al., 2024; Wang & Guo, 2020).

3. Resultados

Los resultados se organizan en cuatro bloques: i) delimitación y caracterización de las UEH; ii) estimación de lluvia de diseño y escorrentía mediante CN-SCS; iii) definición de secciones y espaciamientos de zanjas; y iv) verificación interna del procedimiento regionalizado. Esta secuencia permite demostrar que la regionalización no corresponde únicamente a una representación cartográfica, sino a una integración funcional de suelo, cobertura, pendiente, infiltración y escorrentía. La localización de las UEH se muestra en la Figura 3 y sus atributos se sintetizan en la Tabla 2.

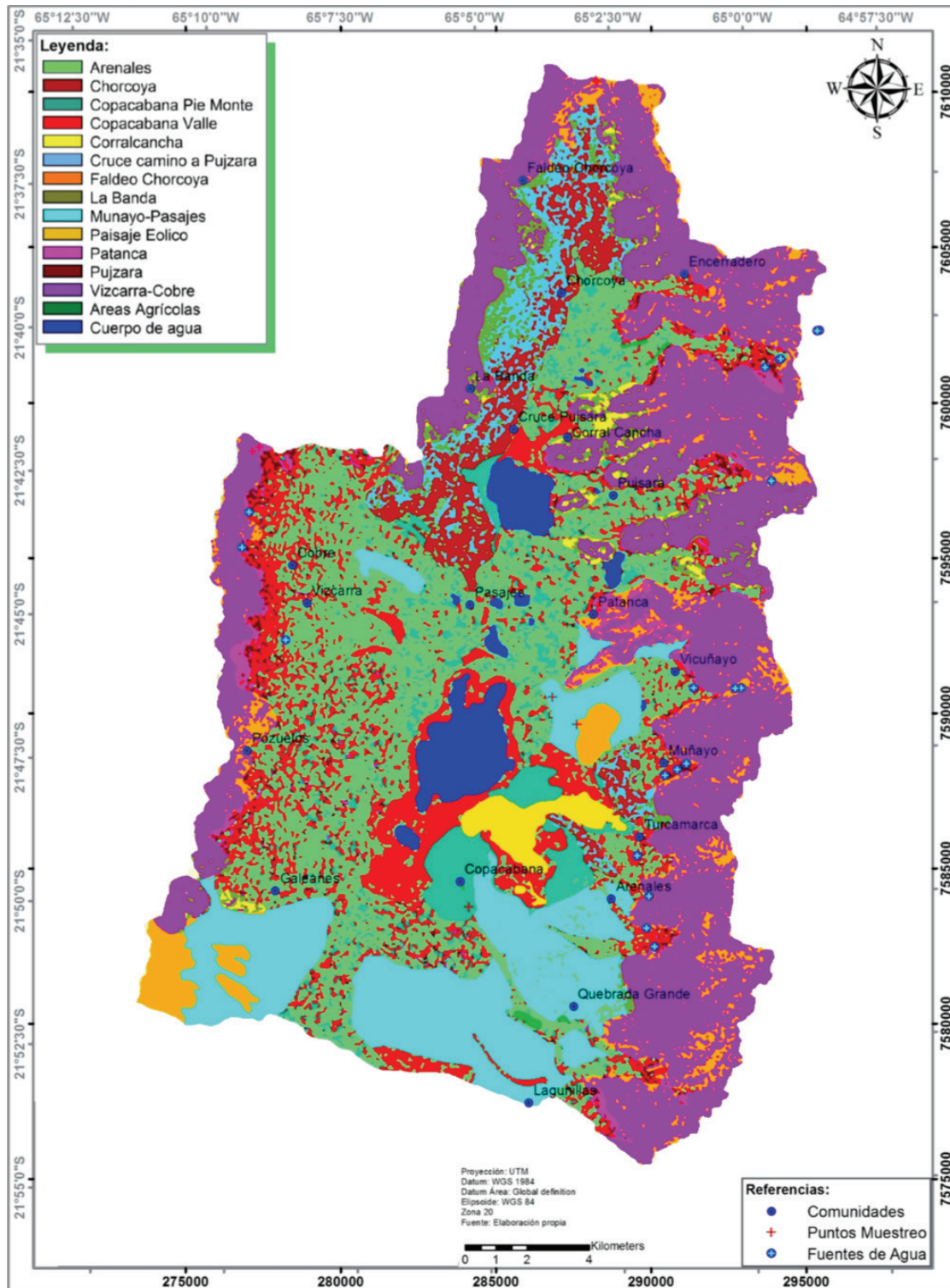


Figura 3. Localización y delimitación espacial de las Unidades Ecohidrológicas Homogéneas en la cuenca de Lagunas de Tajzara.

Tabla 2. Síntesis de atributos de las UEH, incluyendo la textura del suelo.

N°	UEH	Superficie (ha)	%	Posición hidrológica	Pendiente (%)	Textura	Espesor (cm)	MO (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	IEs/PIER	Arena Estimada (%)	Estado de degradación	fc (mm/h)	Clase
1	Patanca	584.48	1.24	Receptora de escorrentía	7	Franco arenoso	0-25	1.01	27.7	9.8	2.69	62.50	Alta susceptibilidad a erosión y degradación física	10.5	Lenta
2	Muñayo-Pasajes	5 382.06	11.39	Concentración de escorrentía	2	Arena franca	0-37	1.95	8.5	12.5	9.29	79.00	Suelos relativamente estables	26.9	Moderada
3	Copacabana Valle	5 579.47	11.81	Concentración de escorrentía	2	Franco arenoso	0-37	0.84	25.94	11.56	2.24	62.50	Alta susceptibilidad a erosión y degradación física	33.03	Moderada
4	Cruce camino a Pujzara	1 394.36	2.95	Concentración de escorrentía	2	Franco arenoso	0-35	1.54	32	7.8	3.87	60.20	Alta susceptibilidad a erosión y degradación física	21.43	Moderada
5	Pujzara	731.94	1.55	Concentración de escorrentía	2	Franco arenoso	0-25	1.41	20	7.8	5.07	72.20	Alta susceptibilidad a erosión y degradación física	28.67	Moderada
6	La Banda	1 183.16	2.50	Transporte de escorrentía	16	Franco arcilloso arenoso	0-25	1.51	19.25	24.25	3.47	56.50	Alta susceptibilidad a erosión y degradación física	14.19	Lenta

Nº	UEH	Superficie (ha)	%	Posición hidrológica	Pendiente (%)	Textura	Espesor (cm)	MO (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	IEs/PIER	Arena Estimada (%)	Estado de degradación	fc (mm/h)	Clase
7	Vizcarra-Cobre	13 209.54	27.97	Transporte de escorrentía	15	Franco arcilloso arenoso	0-25	3.10	24.25	26.75	6.08	49.00	Suelos con alto riesgo de degradación física, formación de costras, compactación y erosión	18.27	Lenta
8	Corralcancha	314.03	0.66	Transporte de escorrentía	15	Arena franca	0-25	1.09	7.5	14.5	4.95	78.00	Alta susceptibilidad a erosión y degradación física	20.77	Moderada
9	Chorcuya	1 797.43	3.81	Receptora de escorrentía	8	Franco arenoso	0-25	2.23	7.5	18.5	8.58	74.00	Suelos con leve riesgo de degradación física	24.23	Moderada
10	Copacabana Pie Monte	2 398.07	5.08	Receptora de escorrentía	10	Franco arenoso	0-25	1.44	21.94	9.56	4.57	68.50	Alta susceptibilidad a erosión y degradación física	18.37	Lenta
11	Arenales	10 093.53	21.37	Receptora de escorrentía	11	Franco arcilloso arenoso	0-25	4.25	23.25	26.75	8.50	50.00	Suelos con leve riesgo de degradación física	24.87	Moderada
12	Faldeo Chorcuya	2 493.04	5.28	Impluvio	15	Franco	0-25	1.90	28.25	24.25	3.62	47.50	Alta susceptibilidad a erosión y degradación física	14.47	Lenta
13	Cuerpo de Agua	1 416.97	3.00	No considerado									No considerado		
14	Paisaje Eólico	592.26	1.25	No considerado									No considerado		
15	Área Agrícola	62.86	0.13	No considerado									No considerado		

N°	UEH	Superficie (ha)	%	Posición hidrológica	Pendiente (%)	Textura	Espesor (cm)	MO (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	IEs/PIER	Arena Estimada (%)	Estado de degradación	fc (mm/h)	Clase
Total	Cuenca	47 233.20	100.00												
Total	UEH	45 161.11	95.61												

La delimitación de UEH, representada en la Figura 3 y sintetizada en la Tabla 2, evidenció que Tajzara no es un sistema hidrológicamente uniforme, sino un mosaico de unidades con funciones diferenciadas de impluvio, transporte, concentración y recepción de escorrentía. La variabilidad multifactorial se expresa, por ejemplo, en Copacabana Valle, que combina posición de concentración de escorrentía, pendiente baja, textura franco arenoso, baja materia orgánica y una infiltración relativamente alta; esta combinación explica por qué la respuesta de diseño no puede inferirse a partir de una sola variable.

Las UEH receptoras de escorrentía (Patanca, Chorcoya, Copacabana Pie Monte y Arenales) concentraron respuestas contrastantes según su infiltración y condición superficial; las unidades de transporte (La Banda, Vizcarra-Cobre y Corralcancha) presentaron pendientes más altas y mayor sensibilidad a conectividad superficial; las unidades de concentración (Muñayo-Pasajes, Copacabana Valle, Cruce camino a Pujzara y Pujzara) mostraron una función hidrológica asociada al aporte acumulado; y Faldeo Chorcoya se comportó como unidad de impluvio. Esta diferenciación justifica el diseño por UEH.

Las propiedades del suelo y el estado de degradación por sobrepastoreo refuerzan dicha diferenciación. Predominan texturas franco arenosas, arena franca, franco arcilloso-arenosas y franco, con susceptibilidad a erosión y degradación física. Patanca, La Banda y Faldeo

Chorcoya muestran infiltración lenta y mayor vulnerabilidad a escorrentía; Muñayo-Pasajes, Copacabana Valle, Pujzara y Arenales presentan mejor respuesta infiltrativa relativa.

La textura fue interpretada junto con la estructura, la materia orgánica, la condición superficial, la posición hidrológica y la infiltración básica. Por ello, una textura con alta proporción de arena no se asumió automáticamente como indicador de alta infiltración efectiva, ya que la compactación por pisoteo, el encostramiento, la baja materia orgánica y la pérdida de cobertura pueden reducir la porosidad funcional e incrementar la escorrentía superficial.

En conjunto, la variabilidad de infiltración, degradación física y posición hidrológica confirma que las intervenciones de restauración requieren criterios regionalizados por UEH.

Con los datos de lluvia máxima diaria de las estaciones consideradas se calcularon los parámetros de la Ley de Gumbel modificada, que se presentan en la Tabla 3. El número de registros disponibles varió entre estaciones, por lo que el tratamiento se realizó con base en los máximos diarios útiles para cada serie y posteriormente se integró en un valor regional de diseño. Estos estadísticos permitieron obtener la lluvia de diseño para $T = 10$ años y $t = 1$ h, utilizada como entrada común para comparar la respuesta hidrológica de las UEH.

Tabla 3. Alturas máximas de lluvia en 24 horas y parámetros de la distribución de Gumbel modificada para la cuenca endorreica de Tajzara.

Parámetro	Campanario	Copacabana Tajzara	El Molino Tomayapo	Iscayachi San Antonio	Sama Cumbre	Sama Iscayachi	Tojo	Tomayapo Pueblo	Yunchara
Media	31.94	29.36	35.99	26.03	52.13	30.30	26.53	32.84	44.00
Desviación	10.47	13.88	10.55	8.14	12.35	9.56	7.54	16.37	18.18
CV (%)	32.78	47.29	29.30	31.26	23.69	31.55	28.43	49.87	41.31
n	23.00	7.00	19.00	18.00	18.00	13.00	24.00	32.00	7.00
alfa	0.12	0.09	0.12	0.16	0.10	0.13	0.17	0.08	0.07
Ed	27.23	23.11	31.25	22.37	46.57	26.00	23.13	25.47	35.82
Cd	0.69	1.08	0.61	0.65	0.48	0.66	0.59	1.15	0.91
Altura (m)	3460	3800	3410	3450	3820	3440	2643	2720	3580
K	0.75								
Ed regional	28.46								

A partir de los parámetros regionalizados de la distribución de Gumbel modificada, se estimaron tres magnitudes hidrológicas: la altura máxima diaria de lluvia para un periodo de retorno determinado (h_{dT}), la altura de lluvia para una duración específica (h_{tT}) y la intensidad de lluvia asociada a la relación intensidad-duración-frecuencia (i_{tT}). Para duraciones menores a 2 h, se empleó el exponente de reducción temporal igual a 0.7, obteniéndose las siguientes expresiones:

$$h_{dT} = 28.46 \cdot (1 + 0.75 \cdot \log_{10} T)$$



$$h_{tT} = 28.46 \cdot \left(\frac{t}{3}\right)^{0.7} \cdot (1 + 0.75 \cdot \log_{10} T)$$

$$i_{tT} = \left(\frac{28.46}{t}\right) \cdot \left(\frac{t}{3}\right)^{0.7} \cdot (1 + 0.75 \cdot \log_{10} T)$$

donde:

T = periodo de retorno, expresado en años

t = duración de la lluvia, expresada en horas

$\log_{10}$ = logaritmo en base 10

Para el escenario de diseño adoptado, con T=10 años y t=1 h, se obtuvo una intensidad de lluvia de $i_{tT}=23.1$ mm/h, equivalente a una lámina de precipitación de 23.1 mm para el cálculo posterior de escorrentía mediante el método CN-SCS.

La expresión gráfica de las curvas intensidad-duración-frecuencia se presenta en la Figura 4.

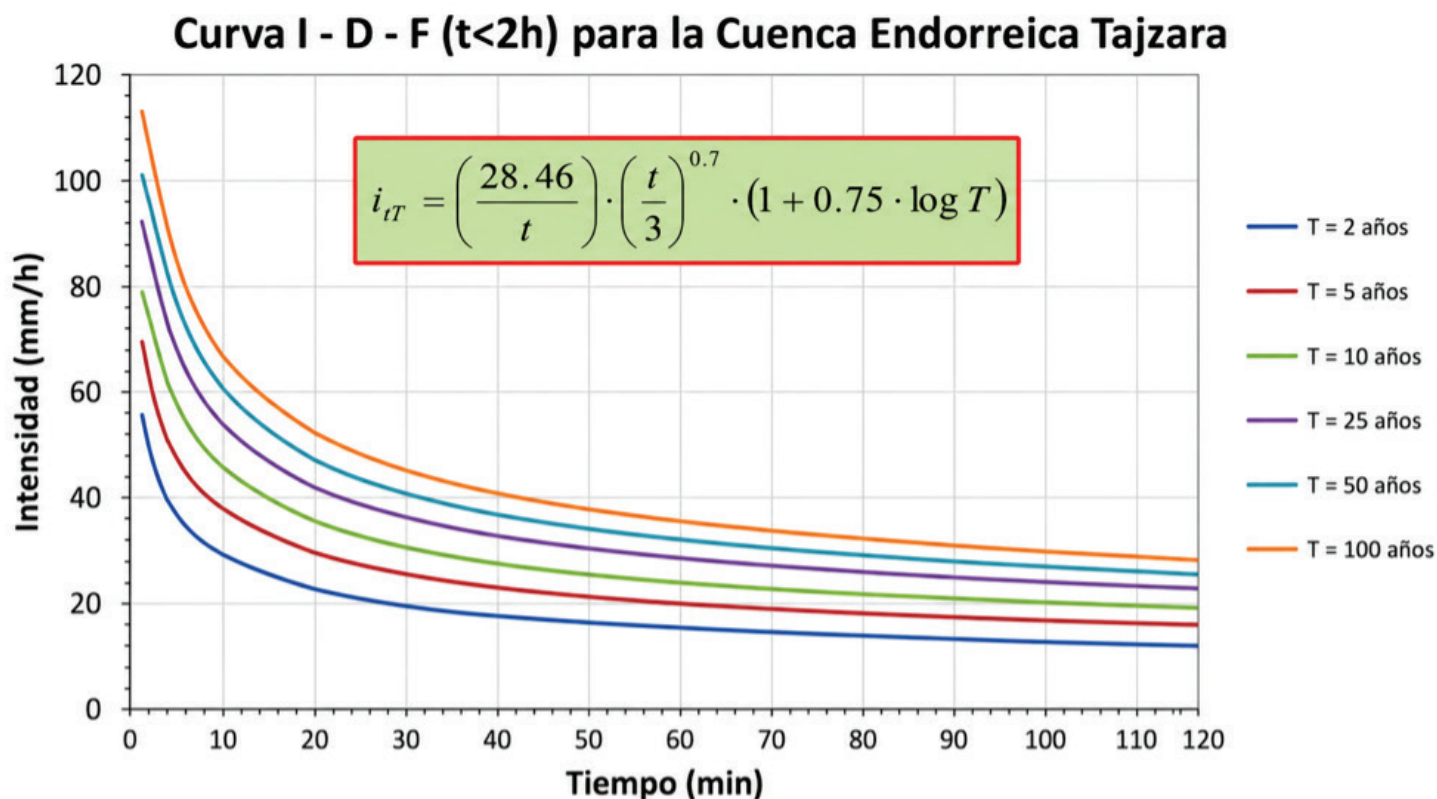


Figura 4. Curvas intensidad-duración-frecuencia utilizadas para estimar la lluvia de diseño.

Los valores de CN se obtuvieron mediante el cruce entre cobertura/uso del suelo, grupo hidrológico de suelo, condición hidrológica e infiltración básica, con apoyo operativo de SIG y SWAT. El uso de SWAT se limitó a organizar y automatizar la asignación espacial de CN; la base conceptual correspondió al método NRCS. En consecuencia, el énfasis del manuscrito no se encuentra en repetir el procedimiento convencional del número de curva, sino en mostrar cómo ese parámetro fue integrado con pendiente, infiltración, escorrentía y geometría de zanja dentro de la regionalización ecohidrológica. Los valores del número de curva para las condiciones de humedad antecedente se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores del número de curva para diferentes condiciones de humedad antecedente del suelo.

UEH	Vegetación	fc (mm/h)	CNI	CNII	CNIII
Patanca	Matorral pobre	10.5	58	77	89
Muñayo-Pasajes	Matorral pobre	26.9	46	67	82
Copacabana Valle	Pastizal pobre	33.03	46	67	82
Camino Pujzara	Pastizal pobre	21.43	46	67	82
Pujzara	Matorral pobre	28.67	46	67	82
La Banda	Pastizal pobre	14.19	64	81	91
Vizcarra-Cobre	Matorral pobre	18.27	46	67	82
Corralcancha	Pastizal pobre	20.77	46	67	82
Chorcuya	Pastizal pobre	24.23	46	67	82
Copacabana Pie Monte	Pastizal pobre	18.37	46	67	82
Arenales	Matorral pobre	24.87	28	48	68
Faldeo Chorcuya	Matorral pobre	14.47	46	67	82

Los valores de CN permitieron calcular S mediante la Ecuación (6) y Q mediante la Ecuación (5). La separación D se estimó con la Ecuación (9), integrando dimensiones de zanja, lluvia de diseño y escorrentía del impluvio.

La Tabla 5 resume los criterios de asignación de CNII según cobertura vegetal, condición hidrológica e intervalos de infiltración básica. Con estos valores se calcularon S, Ia, Q y los espaciamientos de diseño;

la Tabla 6 presenta los parámetros principales por UEH bajo las condiciones hidrológicas analizadas.

Tabla 5. Criterios de asignación de CNII según cobertura vegetal, condición hidrológica e infiltración básica.

Vegetación	Condición hidrológica	≤ 1	1 a 20	20 a 50	≥ 50
Pastizal	Pobre	89	86	79	68
Pastizal	Media	84	79	69	49
Pastizal	Buena	80	74	61	39
Matorral	Pobre	83	77	67	48
Matorral	Media	77	70	56	35
Matorral	Buena	73	65	48	30

Tabla 6. Verificación interna del modelo regionalizado para el cálculo de la separación (D) entre zanjas de infiltración.

UEH	Área (ha)	fc (mm/h)	CNI	CNII	CNIII	ItT (mm/h)	Pend. (%)	Pend. (°)	SI	SII	SIII	QI	QII	QIII	b (m)	h (m)	Azanja (m²)	Clase inf.	Respuesta hidrológica	DI	DII	DIII	D regionalizado
Patanca	584.48	10.5	58	77	89	23.1	7	4.00	180.64	75.87	32.99	1.02	3.92	8.45	0.4	0.40	0.16	Baja	Alta escorrentía	148.33	38.50	17.84	17.41
Muñayo-Pasajes	5 382.06	26.9	46	67	82	23.1	2	1.15	297.87	125.10	54.39	0.22	2.00	5.55	0.4	0.25	0.10	Muy alta	Muy baja escorrentía	412.47	45.40	16.34	15.88
Copacabana Valle	5 579.47	33.03	46	67	82	23.1	2	1.15	297.87	125.10	54.39	0.22	2.00	5.55	0.4	0.25	0.10	Muy alta	Muy baja escorrentía	412.47	45.40	16.34	15.88
Camino a Pujzara	1 394.36	21.43	46	67	82	23.1	2	1.15	297.87	125.10	54.39	0.22	2.00	5.55	0.4	0.30	0.12	Alta	Baja escorrentía	503.36	55.41	19.94	19.27
Pujzara	731.94	28.67	46	67	82	23.1	2	1.15	297.87	125.10	54.39	0.22	2.00	5.55	0.4	0.25	0.10	Muy alta	Muy baja escorrentía	412.47	45.40	16.34	15.88
La Banda	1 183.16	14.19	64	81	91	23.1	16	9.09	141.86	59.58	25.90	1.62	5.08	9.97	0.4	0.40	0.16	Baja	Alta escorrentía	92.88	29.68	15.13	15.02
Vizcarra-Cobre	13 209.54	18.27	46	67	82	23.1	15	8.53	297.87	125.10	54.39	0.22	2.00	5.55	0.4	0.35	0.14	Media	Escorrentía moderada	594.26	65.42	23.54	22.70
Corralcancha	314.03	20.77	46	67	82	23.1	15	8.53	297.87	125.10	54.39	0.22	2.00	5.55	0.4	0.30	0.12	Alta	Baja escorrentía	503.36	55.41	19.94	19.27
Chorcuya	1 7 97.43	24.23	46	67	82	23.1	8	4.57	297.87	125.10	54.39	0.22	2.00	5.55	0.4	0.30	0.12	Alta	Baja escorrentía	503.36	55.41	19.94	19.27
Copacabana Pie Monte	2 398.07	18.37	46	67	82	23.1	10	5.71	297.87	125.10	54.39	0.22	2.00	5.55	0.4	0.35	0.14	Media	Escorrentía moderada	594.26	65.42	23.54	22.70
Arenales	10 093.53	24.87	28	48	68	23.1	11	6.28	655.16	275.10	119.64	0.14	0.31	2.14	0.4	0.30	0.12	Alta	Baja escorrentía	766.50	361.10	51.69	51.10
Faldeo Chorcuya	2 493.04	14.47	46	67	82	23.1	15	8.53	297.87	125.10	54.39	0.22	2.00	5.55	0.4	0.40	0.16	Baja	Alta escorrentía	685.15	75.42	27.14	26.15

La Tabla 6 muestra que Patanca y La Banda concentran las condiciones más restrictivas, con fc bajas (10.5 y 14.19 mm/h) y QIII mayores (8.45 y 9.97 mm). En contraste, Arenales y Muñayo-Pasajes presentan mayor infiltración (24.87 y 26.9 mm/h) y menor escorrentía relativa (2.14 y 5.55 mm), lo que permite orientar de forma diferenciada las estrategias de control hidrológico y conservación del suelo.

4. Discusión

Los resultados confirman que la respuesta hidrológica de Tajzara no puede explicarse mediante una sola variable, sino a partir de la interacción entre infiltración, condición del suelo, cobertura vegetal, pendiente, CNII y posición funcional en la ladera. Esta interpretación coincide con estudios que muestran que el pastoreo, la compactación y la pérdida de cobertura modifican la infiltración y aumentan la conectividad superficial en pastizales y ambientes semiáridos (Centeri, 2022; Fan et al., 2024), así como con evidencias recientes sobre el papel de la vegetación y las propiedades del suelo en la infiltración de ecosistemas altoandinos (Chávez-Collantes et al., 2025; Mosquera et al., 2022).

En este contexto, la contribución del estudio no radica en el uso aislado del método CN-SCS ni en el concepto convencional de zanja de infiltración, sino en la articulación espacial de estos insumos mediante SIG para definir criterios de diseño por UEH. La literatura reciente destaca la utilidad de la regionalización en cuencas no aforadas y de la integración de información espacial para mejorar la modelación hidrológica (Bawa et al., 2025), mientras que los estudios sobre zanjas de infiltración subrayan la necesidad de ajustar su diseño a pendiente, suelo y lluvia de diseño (Pizarro et al., 2024; Wang & Guo, 2020). La propuesta desarrollada traslada esos principios a un esquema territorializado para Tajzara. La verificación interna del espaciamiento se muestra en la Figura 5.

Verificación interna del modelo regionalizado de espaciamiento Lagunas de Tajzara Tarija-Bolivia

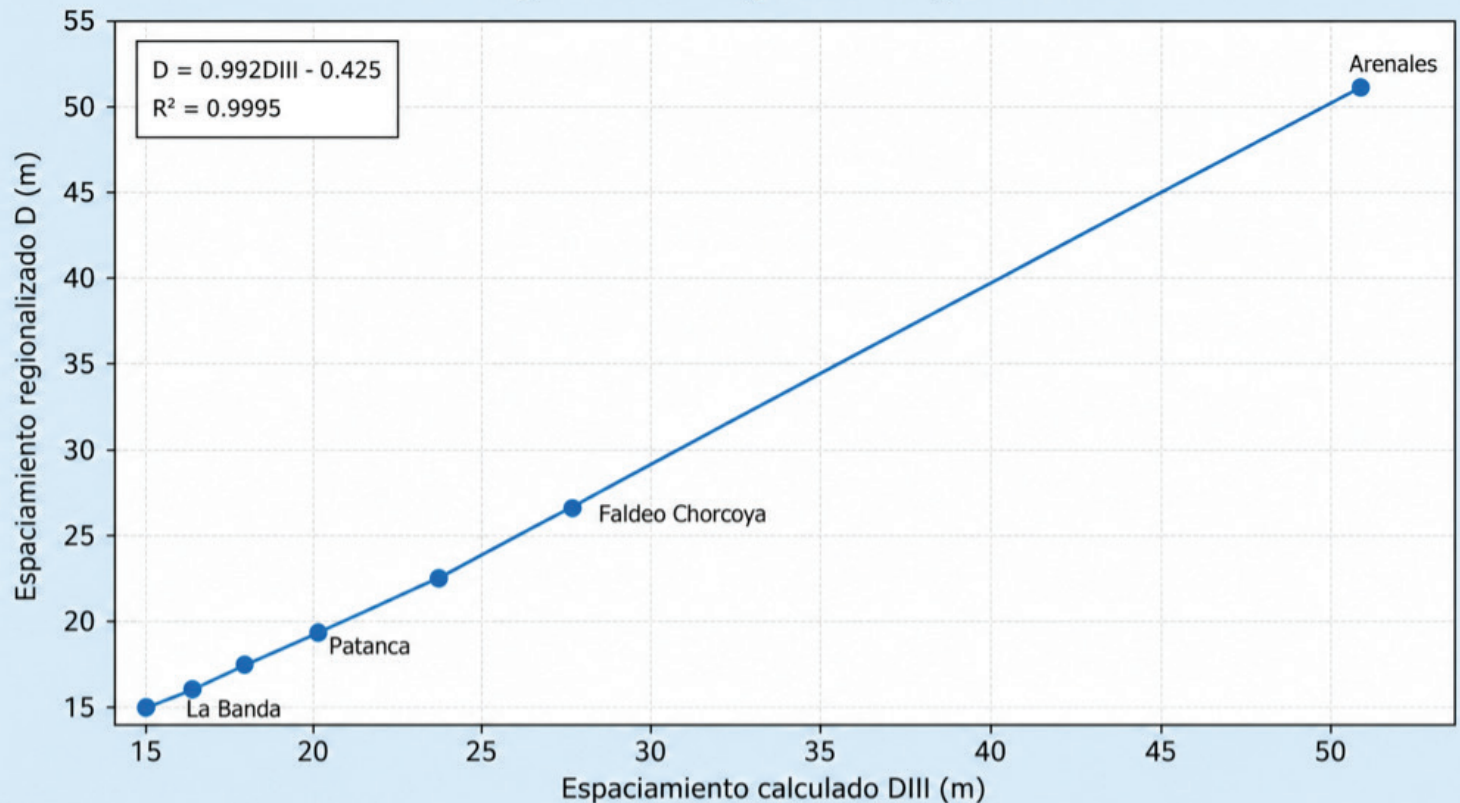


Figura 5. Verificación interna del modelo regionalizado de espaciamiento, con inclusión de las doce UEH.

La Figura 5 muestra una coherencia interna muy alta entre los espaciamientos calculados (DIII) y los regionalizados (D), con $D = 0.992D_{III} - 0.425$ y $R^2 = 0.9995$. Esta relación no se interpreta como validación hidráulica de campo, sino como comprobación de consistencia interna del procedimiento: el espaciamiento regionalizado conserva la estructura del cálculo y, al mismo tiempo, incorpora la diferenciación espacial por pendiente, sección de zanja, infiltración y escorrentía. Por

ello, la verificación interna respalda la trazabilidad del método, pero no sustituye el monitoreo posterior de zanjas construidas.

La relación entre infiltración básica y escorrentía de diseño no se utilizó como modelo lineal de explicación, debido a que la generación de escorrentía en las UEH responde a la interacción de varios factores físicos e hidrológicos. Aunque la infiltración básica (f_c) influye en la capacidad del suelo para absorber agua, su efecto actúa conjuntamente con CNII, pendiente, cobertura vegetal, condición superficial del suelo y posición hidrológica de cada unidad.

Por esta razón, el análisis se abordó desde un enfoque multivariable. Patanca y La Banda presentan condiciones más restrictivas por combinar baja infiltración básica, mayor escorrentía de diseño, alta susceptibilidad a degradación física y, en el caso de La Banda, la mayor pendiente y el mayor CNII. En contraste, Arenales y Muñayo-Pasajes muestran respuestas relativamente menos críticas por sus menores valores de escorrentía y mayor capacidad infiltrativa relativa.

Esta lectura integrada evita una interpretación simplificada de la relación infiltración-escorrentía y sustenta la necesidad de definir espaciamientos diferenciados. La regionalización ecohidrológica, por tanto, no se fundamenta en una sola relación bivariada, sino en la combinación funcional de infiltración, CNII, pendiente, escorrentía de diseño, posición hidrológica y geometría de zanja. La síntesis multivariable se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Matriz multivariable de la regionalización ecohidrológica por UEH.

UEH	fc (mm/h)	CNII	Pendiente (%)	QIII (mm)	D regionalizado (m)	Lectura funcional
Patanca	10.50	77	7	8.45	17.41	Alta escorrentía / diseño restrictivo
Muñayo- Pasajes	26.90	67	2	5.55	15.88	Respuesta intermedia regionalizada
Copacabana Valle	33.03	67	2	5.55	15.88	Respuesta intermedia regionalizada
Camino a Pujzara	21.43	67	2	5.55	19.27	Respuesta intermedia regionalizada
Pujzara	28.67	67	2	5.55	15.88	Respuesta intermedia regionalizada
La Banda	14.19	81	16	9.97	15.02	Alta escorrentía / diseño restrictivo
Vizcarra-Cobre	18.27	67	15	5.55	22.70	Respuesta intermedia regionalizada
Corralcancha	20.77	67	15	5.55	19.27	Respuesta intermedia regionalizada
Chorcuya	24.23	67	8	5.55	19.27	Respuesta intermedia regionalizada
Copacabana Pie Monte	18.37	67	10	5.55	22.70	Respuesta intermedia regionalizada
Arenales	24.87	48	11	2.14	51.10	Mayor espaciamiento por baja escorrentía
Faldeo Chorcuya	14.47	67	15	5.55	26.15	Respuesta intermedia regionalizada

La Tabla 7 sintetiza la estructura multivariable de la regionalización ecohidrológica. La Banda presenta la condición de diseño más restrictiva, asociada a los mayores valores de CNII (81), pendiente (16 %) y escorrentía de diseño (9.97 mm), lo que justifica un espaciamiento más conservador entre zanjas. En contraste, Arenales registra el menor CNII (48), la menor escorrentía de diseño (2.14 mm) y el mayor espaciamiento regionalizado (51.10 m), reflejando una respuesta hidrológica comparativamente menos crítica.

En conjunto, la matriz evidencia que el espaciamiento de zanjas no depende únicamente de la infiltración básica, sino de la interacción entre capacidad infiltrativa, potencial de generación de escorrentía, pendiente y sección geométrica de diseño. Por ello, las UEH constituyen unidades funcionales adecuadas para definir criterios diferenciados de intervención hidrológica.

4.1. Aporte metodológico y limitaciones

El aporte metodológico del estudio consiste en transformar información topográfica, edáfica, de cobertura vegetal e hidrológica en UEH con criterios diferenciados para el diseño de zanjas de infiltración. La novedad no se plantea como creación de nuevas variables hidrológicas, sino como su integración espacial y funcional para convertir la heterogeneidad biofísica de Tajzara en parámetros de espaciamiento aplicables al diseño.

Este enfoque permite superar criterios uniformes de espaciamiento, que pueden ser insuficientes en cuencas altoandinas semiáridas con alta heterogeneidad de suelo, cobertura y relieve. La matriz multivariable muestra que unidades como La Banda y Patanca requieren diseños más restrictivos por su mayor escorrentía y menor capacidad infiltrativa,

mientras que Arenales admite mayor espaciamiento debido a su menor escurrentía relativa. En ese sentido, las UEH operan como unidades técnicas de decisión y no solo como categorías cartográficas.

La aplicabilidad del modelo está condicionada por los supuestos adoptados: evento de diseño de una hora con periodo de retorno de 10 años, uso del método CN-SCS, adopción de $I_a = 0.05S$, estimación de parámetros por UEH y asignación de una sección geométrica única por unidad. En consecuencia, los resultados deben entenderse como una propuesta de diseño preliminar y verificación interna, no como una validación hidráulica de campo. Futuras investigaciones deberán incorporar monitoreo de zanjas construidas, medición de infiltración posterior a la intervención, evaluación de desbordes, sedimentación, mantenimiento y análisis de sensibilidad de CNII, f_c , pendiente y geometría de diseño.

5. Conclusiones

La metodología de regionalización ecohidrológica basada en SIG permitió organizar la heterogeneidad biofísica de la cuenca endorreica de Lagunas de Tajzara en doce Unidades Ecohidrológicas Homogéneas con comportamiento hidrológico diferenciable. La integración de variables topográficas, edáficas, de cobertura vegetal e hidrológicas permitió establecer criterios de diseño más ajustados a las condiciones territoriales de cada UEH, evitando asumir un espaciamiento uniforme de zanjas en una cuenca con alta variabilidad espacial.

La condición de diseño adoptada, correspondiente a una intensidad de lluvia de 23.1 mm/h para un periodo de retorno de 10 años y una duración de una hora, permitió comparar las UEH bajo un mismo

escenario hidrológico. Bajo esta condición, Patanca y La Banda presentaron respuestas más restrictivas, asociadas a menor infiltración básica y mayor escorrentía de diseño, mientras que Arenales mostró menor escorrentía relativa y mayor espaciamiento regionalizado.

El análisis evidenció que la respuesta hidrológica no depende únicamente de la infiltración básica, sino de la interacción entre f_c , CNII, pendiente, escorrentía de diseño, condición superficial del suelo, posición hidrológica y geometría de zanja. En este sentido, la matriz multivariable de regionalización constituye el principal soporte técnico para diferenciar los espaciamientos entre UEH y evita interpretar el diseño a partir de una sola relación lineal.

La comparación entre el espaciamiento calculado y el espaciamiento regionalizado mostró coherencia interna dentro del procedimiento aplicado. Sin embargo, este resultado debe entenderse como una verificación interna del modelo de cálculo y no como una validación hidráulica de campo. Por tanto, la aplicación operativa del método requiere monitoreo posterior de zanjas construidas, incluyendo infiltración, escorrentía, sedimentación, estabilidad de la sección y evolución de la cobertura vegetal.

El principal aporte científico-aplicado del estudio consiste en proponer un criterio territorial para convertir información SIG, edáfica e hidrológica en parámetros diferenciados de diseño de zanjas de infiltración. Este enfoque resulta útil para orientar intervenciones de restauración hidrológica en ecosistemas altoandinos semiáridos y cuencas no aforadas, siempre que sea complementado con calibración local y seguimiento de campo.

6. Financiamiento

No se declara financiamiento externo para el desarrollo del estudio.

7. Declaración de conflicto de interés

El autor declara no tener conflicto de interés vinculado con el contenido del manuscrito.

8. Declaración de uso de IA

Se utilizó ChatGPT (OpenAI) como apoyo para la revisión lingüística, la adecuación del formato editorial y la organización del manuscrito. Armando Schmidt Gómez revisó, verificó y autorizó los elementos generados o asistidos por IA antes de integrarlos al artículo. Los datos, cálculos, fórmulas, mapas, tablas, resultados y conclusiones fueron verificados por el autor responsable.

9. Referencias

Alsumaiti, T. S., Hussein, K. A., Ghebreyesus, D. T., Petchprayoon, P., Sharif, H. O., & Abdalati, W. (2024). Development of intensity-duration-frequency (IDF) curves over the United Arab Emirates (UAE) using CHIRPS satellite-based precipitation products. *Remote Sensing*, 16(1), 27. <https://doi.org/10.3390/rs16010027>

- Bawa, A., Mendoza, K., Srinivasan, R., O'Donchha, F., Smith, D., Wolfe, K., Parmar, R., Johnston, J. M., & Corona, J. (2025). Enhancing hydrological modeling of ungauged watersheds through machine learning and physical similarity-based regionalization of calibration parameters. *Environmental Modelling & Software*, 186, 106335. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106335>
- Beck, S., Paniagua-Zambrana, N., Yevara Gárate, M., & Libermann, M. (2001). La vegetación y uso de la tierra en el altiplano y los valles en el oeste del departamento de Tarija, Bolivia. En S. Beck, N. Paniagua-Zambrana, & D. Preston (Eds.), *Historia, ambiente y sociedad en Tarija, Bolivia* (pp. 47–93). Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés; Escuela de Geografía, Universidad de Leeds.
- Centeri, C. (2022). Effects of grazing on water erosion, compaction and infiltration on grasslands. *Hydrology*, 9(2), 34. <https://doi.org/10.3390/hydrology9020034>
- Chávez-Collantes, A., Vásquez Lozano, D. J., Velarde-Apaza, L. D., Cuevas, J.-P., Solórzano, R., & Flores-Marquez, R. (2025). Influence of vegetation cover and soil properties on water infiltration: A study in high-Andean ecosystems of Peru. *Water*, 17(15), 2280. <https://doi.org/10.3390/w17152280>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill.
https://ponce.sdsu.edu/Applied_Hydrology_Chow_1988.pdf
- Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology* (3rd ed.). Waveland Press.

- Espinales Cedeño, F. R., Alulema del Salto, R. A., & Caicedo Toro, M. D. (2021). Determinación del número de curva (CN) de la cuenca del río Portoviejo. *Dilemas Contemporáneos: Educación, Política y Valores*, 8(spe2). <https://doi.org/10.46377/dilemas.v8i.2600>
- Fan, C., Guo, J., Li, X., Zhang, C., & Wang, T. (2024). Effects of enclosure measures on soil water infiltration and evaporation in arid and semi-arid grassland in northern China. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1410037. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1410037>
- Federal Highway Administration. (2024). *Urban drainage design manual* (4th ed.; Hydraulic Engineering Circular No. 22, FHWA-HIF-24-006). U.S. Department of Transportation. <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/hif24006.pdf>
- Flores-Villanelo, J. P. (2012). Diseño de zanjas de infiltración en zonas no aforadas usando SIG. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(2), 27–39. <https://revistatyca.org.mx/index.php/tyca/article/view/270>
- Giudicianni, C., Di Nunno, F., Granata, F., & Creaco, E. (2026). Pseudo multi-scaling model of intensity-duration-frequency (IDF) curves. *Journal of Hydrology*, 664, 134370. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134370>
- González-Zamora, Á., Almendra-Martín, L., de Luis, M. & Martínez-Fernández, J. (2021). Influence of soil moisture vs. climatic factors in *Pinus halepensis* growth variability in Spain: A study with remote sensing and modeled data. *Remote Sensing*, 13(4), 757. <https://doi.org/10.3390/rs13040757>

- Gutiérrez-Benítez, O., Castro-Rodríguez, D. J., & Barcia-Sardiñas, S. (2019). Zanjás de infiltración: Opción para mitigar la erosión hídrica en la playa Rancho Luna. *Revista Científica de Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 40(1), 58–72. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10076746>
- Mejía-Veintimilla, D., Ochoa-Cueva, P., & Arteaga-Marín, J. (2024). Evaluation of the hydrological response to land use change scenarios in urban and non-urban mountain basins in Ecuador. *Land*, 13(11), 1907. <https://doi.org/10.3390/land13111907>
- Mosquera, G. M., Marín, F., Stern, M., Bonnesoeur, V., Ochoa-Tocachi, B. F., Román-Dañobeytia, F., & Crespo, P. (2022). Progress in understanding the hydrology of high-elevation Andean grasslands under changing land use. *Science of the Total Environment*, 804, 150112. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150112>
- National Oceanic and Atmospheric Administration, National Weather Service. (s. f.). *NOAA Atlas 14 precipitation frequency estimates*. Hydrometeorological Design Studies Center, Precipitation Frequency Data Server. <https://hdsc.nws.noaa.gov/pfds/>
- Palominos-Rizzo, T., Villatoro-Sánchez, M., Paguada-Pérez, D., Alvarado-Hernández, A., Cortés-Granados, V., & Marín-Araya, S. (2024). Effect of staggered contour trenches and hillside ditches on surface runoff and soil loss on steep slopes in shaded coffee (*Coffea arabica*), Costa Rica. *Soil Security*, 14, 100128. <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2024.100128>

- Pizarro, R., Vidal-Silva, C., Jaque, D., Ibáñez Córdova, A., Sangüesa, C., Toledo, C., & Garcia-Chevesich, P. A. (2024). Open-source design of infiltration trenches for sustainable soil and water conservation in rural areas of central Chile. *Sustainability*, 16(13), 5645. <https://doi.org/10.3390/su16135645>
- Ramsar Sites Information Service. (2000). *Cuenca de Tajzara* (Sitio Ramsar No. 1030). Ramsar Convention Secretariat. <https://rsis Ramsar.org/ris/1030>
- United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service. (2025). *National engineering handbook, Part 630—Hydrology, Subpart H: Estimation of direct runoff from storm rainfall*. <https://directives.nrcs.usda.gov/sites/default/files2/1754923466/Subpart%20H%20%E2%80%93%20Estimation%20of%20Direct%20Runoff%20from%20Storm%20Rainfall.pdf>
- Wang, J., & Guo, Y. (2020). Proper sizing of infiltration trenches using closed-form analytical equations. *Water Resources Management*, 34(12), 3809–3821. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02645-x>
- Woodward, D. E., Hawkins, R. H., Jiang, R., Hjelmfelt, A. T., Van Mullem, J. A., & Quan, Q. D. (2003). Runoff curve number method: Examination of the initial abstraction ratio. En *World Water & Environmental Resources Congress 2003* (pp. 1–10). American Society of Civil Engineers. [https://doi.org/10.1061/40685\(2003\)308](https://doi.org/10.1061/40685(2003)308)
- Xue, L., & Yang, G. (2025). Advances in ecohydrology in arid inland river basins. *Water*, 17(15), 2334. <https://doi.org/10.3390/w17152334>