

Modeling of Aquifer Recharge Induced by the Senega–Tambo *Amunas*, Lima- Perú

Deyvid Arhon Salazar Chanque¹ ; Marisa Rosana Silva Dávila² 

^{1,2} Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, deyvid.salazar.c@uni.edu.pe, marisi@uni.edu.pe

Abstract– In Peruvian Andes, *amunas* are canals built since pre-Incan times that divert streamflow during the wet season to promote infiltration along hillsides, enhancing groundwater recharge and increasing water availability during the dry season. The objective of this research was to analyze the modeling of aquifer recharge induced by an *amuna* using specific tools within the CUBHIC platform, which enables improved understanding of these ancestral systems. Daily climate series, soil parameters, basin land cover, and aquifer parameters were used in two scenarios (baseline and *amuna*), ensuring temporal and physical consistency in the simulations. Hydrological variables were evaluated, and reported data from the Huamantanga *amuna* were used to calibrate the model, demonstrating the suitability of the methodology. Subsequently, considering its similarity to the Senega-Tambo *amuna*, the corresponding parameters were determined to estimate the induced recharge in this system. Overall, the results confirm that the *amuna* increases effective percolation and extends groundwater availability beyond the rainy season, contributing to the maintenance of baseflow during the dry period. The consistency of the results supports the applicability of CUBHIC for quantify induced recharge and to assist in the design, prioritization, and optimization of *amunas* in high Andean basins. This study demonstrated that ancestral hydraulic knowledge can be leveraged to address the impacts of climate change and, in doing so, help mitigate urban water stress.

Keywords– *amunas*; groundwater recharge; natural infrastructure; NbS; CUBHIC.

Modelamiento para el cálculo de la recarga hídrica del acuífero procedente de las *amunas*, Senega – Tambo, Lima- Perú

Deyvid Arhon Salazar Chanque¹; Marisa Rosana Silva Dávila²

^{1,2} Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, deyvid.salazar.c@uni.edu.pe, marisi@uni.edu.pe

Resumen–En los Andes peruanos, las *amunas* son canales contruidos desde las épocas preincaicas que desvían caudales durante la temporada húmeda para infiltrarlos en laderas, promoviendo la recarga subterránea lo que permite aumentar los caudales disponibles en estiaje. El objetivo de esta investigación fue analizar el modelamiento de la recarga del acuífero inducida por la *amuna* mediante herramientas específicas de CUBHIC, la cual permite mejorar la comprensión de estos sistemas ancestrales. Se trabajó con series climáticas diarias, parámetros de suelo, cobertura de la cuenca y parámetros del acuífero en dos escenarios (línea base y con *amuna*), garantizando coherencia temporal y física en las simulaciones. Se evaluaron las variables hidrológicas y se usó la información reportada de la *amuna* Huamantanga para calibrar el modelo, lo cual permitió demostrar la idoneidad de la metodología. Luego, considerando su similitud con la *amuna* Senega–Tambo, se halló los parámetros correspondientes para determinar la recarga inducida en este sistema. En conjunto, los resultados confirman que la *amuna* incrementa la percolación efectiva y extiende la disponibilidad hídrica subterránea más allá de la temporada de lluvias, contribuyendo al sostén del caudal base en estiaje. La coherencia de los resultados sustenta la pertinencia de CUBHIC para cuantificar la recarga inducida y apoyar el diseño, priorización y optimización de las *amunas* en cuencas altoandinas. Se demuestra que el conocimiento hidráulico ancestral puede ser aprovechado para afrontar las consecuencias del cambio climático y, de esta manera, combatir el estrés hídrico en las ciudades.

Palabras clave– *amunas*; recarga; infraestructura natural; Sbn; CUBHIC.

I. INTRODUCCIÓN

El aumento de la demanda y la variabilidad climática presionan los sistemas de abastecimiento de agua en ciudades costeras como Lima, que dependen de cuencas altoandinas con marcada estacionalidad. En este contexto, las soluciones basadas en la naturaleza y la infraestructura natural buscan complementar la infraestructura gris mediante la regulación hídrica a escala de cuenca. La *amuna* representa un método ancestral de recarga artificial de acuíferos fisurados, implementado en regiones montañosas elevadas. Este sistema facilita una retención superior del agua subterránea, asegurando que las fuentes mantengan caudales estables durante los periodos de sequía, cuando la necesidad de agua alcanza su punto máximo [1].

En la Fig. 1 se identifican los principales componentes del sistema de *amunas*, que comprenden los canales de enrutamiento (1 y 2), los canales de infiltración (3 y 4), las laderas de infiltración (5), los manantiales (6) y las balsas o reservorios superficiales (7). Asimismo, en el esquema se señalan de manera referencial los puntos de inyección de

trazadores (IT) y los puntos de muestreo (MT) utilizados para el análisis del comportamiento hidrológico del sistema [2].

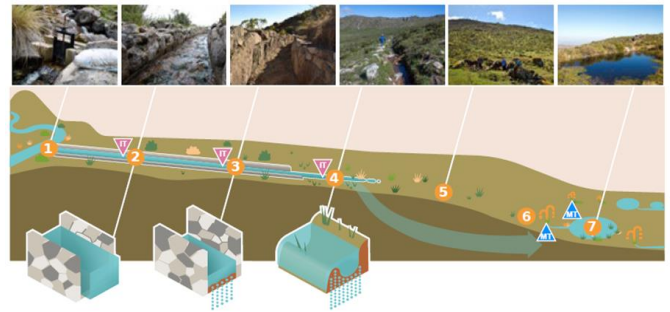


Fig. 1 Principales componentes del sistema de *amunas*. Fuente [2]

Los métodos de modelación de la recarga a los acuíferos son complejos e incluyen los procesos hidrológicos y el transporte de sedimentos, por lo general requieren mediciones de campo, una calibración intensiva del modelo y una extensa experiencia del equipo modelador. Ante esta situación Forest Trends Association elaboró la metodología CUBHIC (Cuantificación de Beneficios Hidrológicos de Intervenciones en Cuencas), que es una innovación del Proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica que ofrece una metodología práctica para producir estimaciones cuantitativas de los beneficios hidrológicos de proyectos de infraestructura natural [3].

El objetivo general de esta investigación es modelar la recarga del acuífero mediante herramientas específicas de CUBHIC [3], mientras los objetivos específicos incluyen explicar los principios de modelación (balance hídrico y humedad del suelo), recolectar datos topográficos e hidrológicos, calibrar el modelo con las observaciones reportadas por Ochoa–Tocachi et al. [3] para la *amuna* Huamantanga (Pacchipucro) y obtener la recarga en la *amuna* Senega–Tambo (tramo Horno–Senega).

II. ÁREA DE ESTUDIO

El estudio se enfoca en las *amunas* Senega–Tambo, ubicado en el distrito de San Pedro de Casta (provincia de Huarochiri) [4], y se contó con información documentada de la *amuna* Huamantanga. Ambas están ubicadas en cabeceras de las cuencas Rímac y Chillón, respectivamente, que contribuyen a la seguridad hídrica de Lima, región más poblada del país, cuya ubicación se muestra en la Fig. 2.



Fig. 2 Mapa de ubicación de las *amunas* estudiadas (Pacchipucro y Senega-Tambo) y sus cuencas asociadas en la región Lima: Cuenca Alto Chillón, Cuenca del río Chillón, Cuenca del río Rímac y Cuenca Santa Eulalia.

La comunidad campesina de Huamantanga, ubicada en la provincia de Canta (región Lima), conserva un sistema ancestral de canales de infiltración (*amunas*), conocido localmente como mamanteo. Este sistema se emplaza entre los 3,300 y 4,200 m.s.n.m., en la cabecera de la cuenca del río Chillón, de la vertiente del Pacífico. El estudio de Huamantanga no constituye el área principal de análisis de la presente investigación; sin embargo, se incluye como caso de referencia el sistema Pacchipucro, debido a que allí se han realizado experimentos hidrológicos y monitoreos que brindan parámetros cuantitativos útiles para la calibración del modelo.

La microcuenca de Huamantanga, donde se ubica la *amuna* Pacchipucro, se encuentra sobre un sistema hidrogeológico compuesto por acuíferos someros y zonas de roca fracturada. Estos acuíferos permiten la infiltración eficiente del agua desviada durante la temporada de lluvias y su almacenamiento temporal en el subsuelo, facilitando el retorno diferido en forma de manantiales o caudal base.

Estudios recientes han permitido caracterizar con mayor precisión los mecanismos de tránsito subterráneo y el balance entre los diferentes tipos de flujo. Según [2], aproximadamente el 50 % del volumen infiltrado puede perderse como evapotranspiración y percolación profunda (0,5 mm/día), quedando fuera del sistema superficial y sin contribuir a caudales base o manantiales. Por otro lado, una fracción significativa del agua infiltrada retorna rápidamente mediante el interflujo (flujo subsuperficial), en un rango que

varía entre 2 semanas y 2 meses, como fue determinado mediante estudios con trazadores.

Complementariamente, se ha documentado un tiempo de retención en el subsuelo de hasta 8 meses, con un valor promedio de 45 días, lo que demuestra la capacidad del sistema para regular y redistribuir el agua a lo largo del año hidrológico [2]. Esta regulación es crítica para sostener la disponibilidad hídrica durante la estación seca.

El área principal de estudio es el sistema amunero Senega-Tambo, ubicado en el distrito de San Pedro de Casta (provincia de Huarochirí) [4], ubicado en la subcuenca Santa Eulalia, afluente río Rímac, de la vertiente del Pacífico. Se analizó el Tramo 1, comprendido entre la bocatoma Horno y la zona de infiltración de Uscupurucocha. Este tramo posee una longitud total de 640 metros, con una altitud inicial de 3 901 m.s.n.m. en la bocatoma y una altitud final de 3 749.25 m.s.n.m. en la zona de descarga, con pendiente media de aproximadamente 0.0238 m/m, adecuada para favorecer la conducción lenta y la infiltración progresiva a lo largo del recorrido.

Se identificó los diferentes tipos de construcción y el estado de conservación del canal, así como los materiales empleados en su estructura (piedra y suelo coluvial compactado). Las variables consideradas incluyeron las dimensiones geométricas del canal amunero, su estado físico, tipo de material de construcción y el comportamiento hidráulico observado en las zonas de filtración lateral.

Durante la visita de campo efectuada en la temporada húmeda se constató que la bocatoma “Horno”, mostrada en la Fig. 3, constituye el punto de inicio operativo de las *amunas* Senega–Tambo. Esta estructura fue diseñada para captar parte del caudal superficial proveniente de la corriente principal, sin interrumpir su flujo natural ni afectar el caudal ecológico aguas abajo.



Fig. 3 Bocatoma Horno

El canal de enrutamiento mostrado en la Fig. 4, ubicado inmediatamente después de la bocatoma, cumple la función de conducir el flujo derivado hacia las estructuras de sedimentación y control inicial del sistema, asegurando que el agua captada no retorne al cauce principal ni se infiltre prematuramente antes de alcanzar las zonas designadas para la recarga. Este canal es comúnmente impermeabilizado, a fin de evitar pérdidas por filtración superficial y garantizar que el volumen derivado llegue de manera controlada al canal amunero. En su recorrido se integra el desarenador, estructura construida en mampostería de piedra y concreto que permite retener sedimentos gruesos y material arrastrado desde la quebrada.

El canal amunero mostrado en la Fig. 5, constituye el tramo principal del sistema de conducción e infiltración del agua derivada desde el canal de enrutamiento. Sigue el contorno natural del terreno, está construido predominantemente en mampostería de piedra y barro, técnica tradicional que utiliza materiales locales y garantiza estabilidad estructural, flexibilidad y una integración armónica con el entorno natural. Los muros laterales, asentados con barro como mortero, permiten una ligera filtración lateral del

agua, favoreciendo la infiltración progresiva hacia los suelos adyacentes. El canal presenta una sección irregular, con ancho promedio de 45 cm y altura útil de 10 cm, extendiéndose a lo largo de 640 metros.



Fig. 4 Canal de enrutamiento

En su tramo final, aproximadamente a los 400 metros desde el inicio, el canal atraviesa una zona de afloramiento rocoso con pendiente pronunciada dispuesta en forma de graderías, donde el flujo se acelera ligeramente antes de distribuirse hacia los sectores inferiores. Este segmento marca la transición hacia la zona de infiltración, donde el canal desemboca finalmente en el reservorio natural de Uscupurucocha, ubicado en el sector Senega, estructura que actúa como balsa terminal y área de recarga directa del acuífero local.



Fig. 5 Canal amunero Senega–Tambo (primer tramo) en el distrito de San Pedro de Casta, provincia de Huarochirí, Lima.

III. METODOLOGÍA

La metodología CUBHIC 2.0 mostrada en la Fig. 6, ofrece una versión simplificada —pero robusta— de modelación para el uso de un público interesado amplio”. Es un modelo hidrológico conceptual de balance hídrico diario, desarrollado en Excel, que estima las salidas del sistema, tanto para una línea base (sin *amuna*) como para un escenario con intervención (con *amuna*). Para el primer escenario estima la

escorrentía, la percolación y el caudal, mientras que para el último escenario estima el caudal desviado por la *amuna* y la percolación. Las entradas incluyen precipitación, temperaturas máxima y mínima o evapotranspiración, características del suelo y los parámetros hidráulicos del canal (geometría, rugosidad).

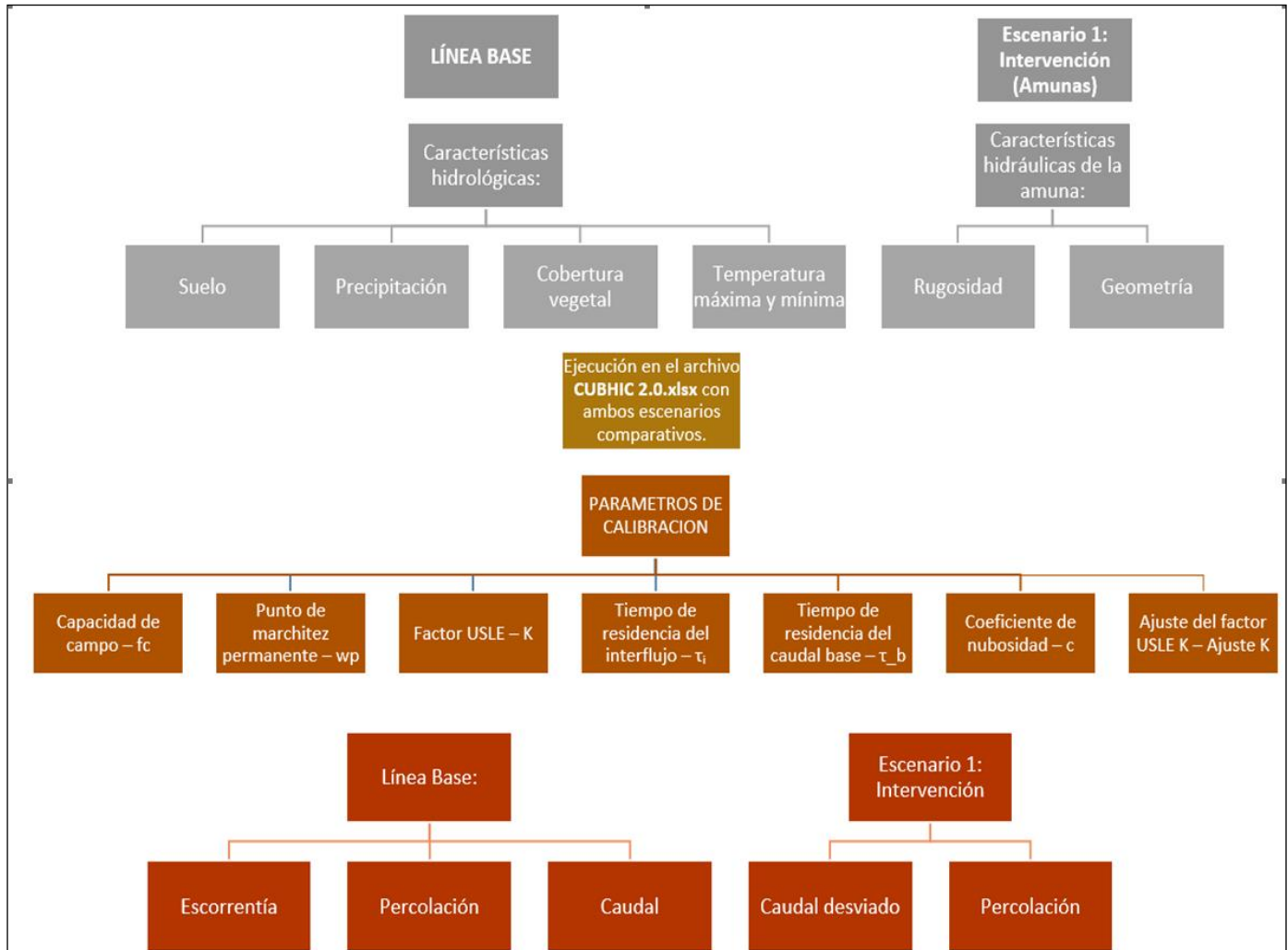


Fig. 6 Esquema general de la metodología CUBHIC aplicada (línea base e intervención con amunas). Adaptado de [5]

Los parámetros de calibración son: capacidad de campo, punto de marchitez permanente, factor de erodabilidad del suelo de la formula universal de pérdida de suelo, tiempo de residencia del interflujo, tiempo de residencia del caudal base, coeficiente de nubosidad y ajuste del factor de erodabilidad del suelo.

El balance hídrico diario se representa mediante un esquema conceptual de reservorios (“modelo de tanques”) que separa la región de contribución y el sistema *amuna* (Fig. 7). En la región de contribución, la precipitación (P) se particiona

entre evapotranspiración (ET) e infiltración; esta última se distribuye en escorrentía superficial (q_o), interflujo (q_i) y percolación hacia el acuífero somero (p), que alimenta el caudal base (q_b). Los aportes de escorrentía, interflujo y caudal base conforman el caudal total simulado en el cauce (Q_{sim}). En el escenario con intervención, una fracción del caudal se desvía hacia la *amuna* (q_{am}), generando un retorno inmediato al cauce (L_{ret}), pérdidas por evapotranspiración en el área de infiltración (L_{ET}) y percolación profunda no recuperable (L_p). El volumen remanente contribuye como percolación

adicional (p_{am}), incrementando el almacenamiento subsuperficial y el caudal base adicional (q_{bam}), con lo que

se cuantifica el beneficio hidrológico asociado a la *amuna*.

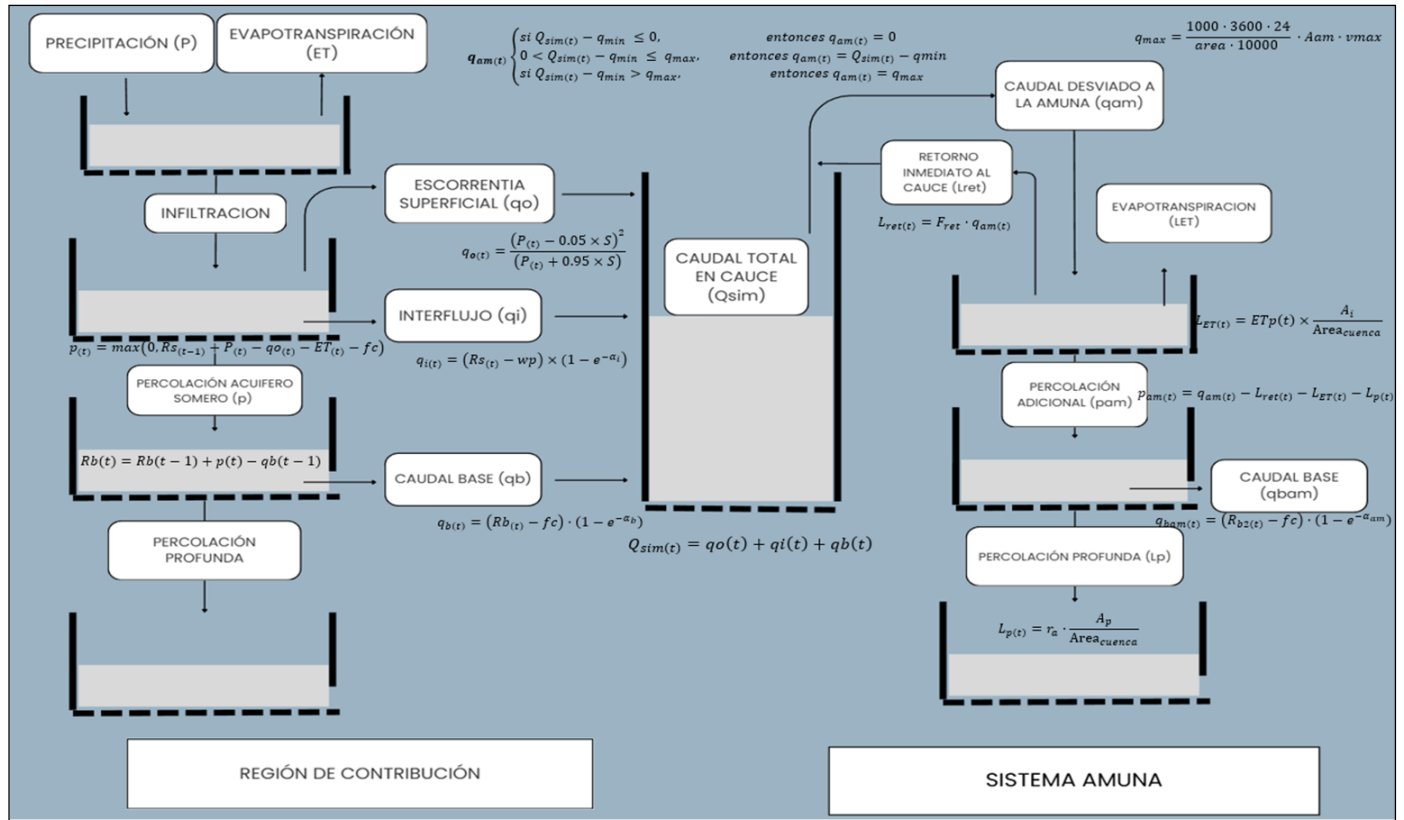


Fig. 7 Esquema conceptual tipo "tanques" del modelo CUBHIC 2.0 para la región de contribución y el sistema *amuna*, con flujos principales del balance hídrico y pérdidas asociadas a la intervención.

IV. CALIBRACIÓN DEL MODELO

La calibración del modelo se realizó tomando como referencia los resultados reportados por Ochoa-Tocachi et al. [2] en la *amuna* de Huamantanga. Se ingresaron los parámetros físicos e hidrológicos del sitio y se procedió al ajuste automático de los parámetros de calibración mediante el complemento Solver de Microsoft Excel. Con el objetivo de optimizar la concordancia entre los caudales simulados (Q_{sim}) y observados (Q_{obs}). Este proceso se sustentó en la evaluación del desempeño del modelo mediante indicadores como la Eficiencia de Nash–Sutcliffe (NSE), la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), la Relación RMSE–desviación estándar (RSR), el Sesgo porcentual (PBIAS) y la Eficiencia de Kling–Gupta (KGE), integrados en una Función Objetivo (OF) cuya minimización permitió obtener el mejor ajuste del modelo.

Los principales valores de entrada para Huamantanga incluyen: Numero de curva ($CN = 80$), Índice de área foliar ($LAI = 2.8$), Factor C de USLE ($C = 0.1$), coeficiente de albedo ($\alpha = 0.18$) y coeficiente de evapotranspiración de vegetación ($Kc = 0.8$); geometría e hidráulica del canal: base del canal ($b = 50$ cm), tirante ($y = 30$ cm), coeficiente n de Manning ($n = 0.017$), Altitud inicial ($H_0 = 3950$ m.s.n.m),

Altitud final ($H_f = 3900$ m), Longitud de la *amuna* ($L_{am} = 1000$ m), Caudal ecológico ($Q_{min} = 4$ l/s) y porcentaje de agua que vuelve inmediatamente al cauce ($F_{ret} = 20\%$); condiciones del sitio altitud = 4000 m.s.n.m, latitud = -11.25° , pendiente = 0.05 m/m; profundidad del suelo = 150 mm, capacidad de campo ($fc = 0.33$), punto de marchitez ($wp = 0.05$), factor de erodabilidad del suelo de USLE ($K = 0.5$), tiempo de residencia del interflujo ($\tau_i = 14.81$ día)s, tiempo de residencia del caudal base ($\tau_b = 70.60$ días); y tiempo de residencia medio del agua infiltrada ($\tau_{am} = 45$ días), percolación profunda al acuífero ($r_a = 0.5$ mm/día), área de pampa de infiltración ($A_i = 12$ ha), y área de percolación profunda ($A_p = 30$ ha), además de coeficiente de nubosidad ($c = 0.5$) y Ajuste de factor USLE ($K = 3.79$) [6].

El desempeño de la calibración se evaluó con indicadores estándar: NSE = 0.62 (≥ 0.5 , aceptable), RSR = 0.62 (≤ 0.7 , aceptable), PBIAS = -17% ($\pm 25\%$, aceptable), KGE = 0.59 (≥ 0.5 , aceptable) y función objetivo: OF = 1.10 (aceptable), con un periodo de calentamiento de 60 días; la Raíz del Error Cuadrático Medio: RMSE = 0.70 mm quedó por encima del umbral de referencia (0.4 mm), pero se consideró una calibración válida al cumplir la mayoría de los criterios y mantener un sesgo controlado. La Fig. 8 muestra el ajuste del caudal simulado en línea base (sin *amuna*) frente al caudal

observado (Qobs) para el período comprendido entre el 1 de septiembre de 2014 y el 31 de agosto de 2015; estos valores son replicados automáticamente en un año adicional consecutivo durante los cálculos internos de CUBHIC 2.0 [6]. La serie de precipitación y el caudal observado fueron elaborados a partir de los registros hidrometeorológicos de alta resolución provistos por la red iMHEA [7].

El análisis de sensibilidad muestra que el modelo es principalmente sensible a la precipitación y a parámetros como el número de curva (CN), el índice de área foliar (LAI), la profundidad del suelo, la capacidad de campo (fc) y el punto de marchitez (wp), siendo este último el umbral de mayor sensibilidad. Asimismo, se observa influencia de las características geométricas de la amuna y de las áreas de infiltración y percolación A_i y A_p , incluida la percolación profunda hacia el acuífero (r_a) y los tiempos de residencia del interflujo(τ_i) y caudal base (τ_b).

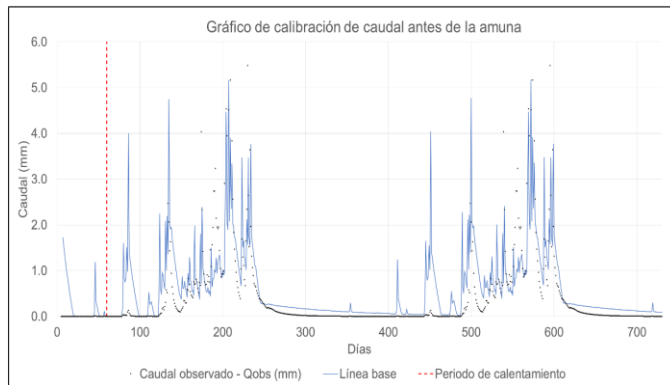


Fig. 8 Gráfico de calibración para los caudales de aporte a la *amuna* Pacchipucro Huamantanga.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Amuna Huamantanga (Pacchipucro)

Como se muestra en la tabla I, en Huamantanga (01/09/2014–31/08/2015), las simulaciones reprodujeron razonablemente la partición hídrica documentada. Frente a los valores reportados por [2] de volumen desviado $134.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{km}^2$, pérdidas por evapotranspiración de $45.1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{km}^2$, pérdidas por percolación profunda $22.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{km}^2$ y recuperación neta 49.6 %, en esta investigación con CUBHIC se estimaron $163.5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{km}^2$ desviados, pérdidas por evapotranspiración de $51.7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{km}^2$ (31.6%), pérdidas por percolación profunda = $26.2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{km}^2$ (16.3%) y percolación adicional efectiva de $97.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{km}^2$ (59.7 % del desvío).

TABLA I
COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA VALIDACIÓN DE LA AMUNA
HUAMANTANGA

Variable	Resultados de (Ochoa-Tocachi et al., 2019) [2]	Simulado con CUBHIC 2.0
Volumen total desviado hacia la <i>amuna</i>	$134.6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{Km}^2$	$163.5 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{Km}^2$
Pérdidas por evapotranspiración (LET)	$45.1 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{Km}^2$ (33.5 %)	$51.7 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{Km}^2$ (31.6 %)
Pérdidas por percolación profunda (L_p)	$22.8 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{Km}^2$ (16.9 %)	$26.2 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{Km}^2$ (16.3 %)
Recuperación neta (caudal base o retorno)	49.6 % del volumen desviado	59.7 % del volumen desviado

El PBIAS = -17% (dentro de $\pm 25 \%$) respalda la capacidad del modelo para estimar recarga efectiva en *amunas* con evidencia empírica previa, como se puede observar en la Fig. 9 que muestra la percolación efectiva diaria, donde los picos principales se concentran alrededor del 20–23 de marzo, y el escenario con *amuna* mantiene valores superiores a la línea base durante los eventos.

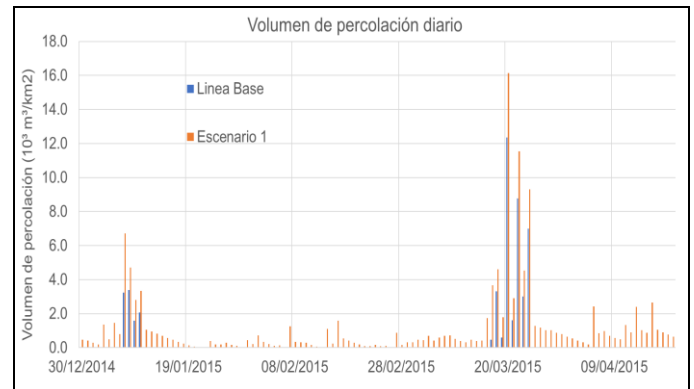


Fig. 9 Resultados de Volumen de percolación diario en la *amuna* Pacchipucro Huamantanga.

B. Amuna Senega–Tambo (San Pedro de Casta)

La aplicación a Senega–Tambo en el periodo 2018–2019; evidenció incrementos sistemáticos de percolación y refuerzo del caudal base en el escenario con *amuna* respecto a la línea base, con persistencia del aporte en la transición a la estación seca. La comparación anual muestra un incremento también significativo de la percolación efectiva total al incorporar la intervención. La percolación efectiva anual pasa de 203.6 a $316.9 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}/\text{km}^2$, equivalentes a $316.9 \text{ mm}/\text{año}$, como se muestra en la Fig. 10, lo que representa una ganancia de $+113.3 \text{ mm}/\text{año}$. En términos relativos, el aumento corresponde a aproximadamente $+56\%$ respecto a la línea base, lo que evidencia un efecto positivo de la *amuna* sobre la recarga potencial del acuífero somero.

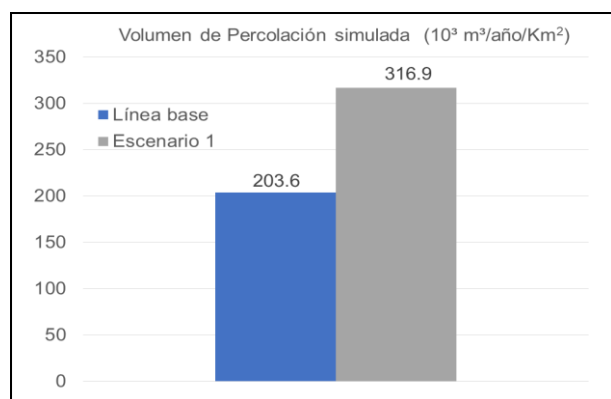


Fig. 10 Resultados de Volumen de percolación anual en la *Amuna* Senega–Tambo (San Pedro de Casta).

Ambos casos confirman que las *amunas* favorecen la infiltración que incrementa la percolación efectiva y favorece el sostenimiento del caudal base. Sin embargo, la magnitud relativa del efecto difiere entre los dos sitios: Huamantanga muestra un incremento más pronunciado en términos relativos (3 veces más), mientras que Senega–Tambo presenta un aumento moderado pero robusto (56%). Estas diferencias son esperables dada la influencia de condiciones locales como cobertura, parámetros edáficos, geometría hidráulica y conectividad subsuperficial y áreas de aporte.

Los patrones observados son consistentes con la literatura que reporta el rol de infraestructura preincaica de infiltración en la regulación hídrica y el incremento del caudal en estiaje mediante almacenamiento y liberación retardada. En particular, los aumentos de percolación y la respuesta retardada del caudal base concuerdan con el mecanismo de retención subsuperficial documentado para sistemas de *amunas*, donde una fracción del caudal desviado se traduce en recarga útil y descargas sostenidas aguas abajo.

VI. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que CUBHIC 2.0 [6] permite estimar la recarga inducida por *amunas* en cuencas altoandinas con información limitada, siempre que se disponga de series climáticas diarias representativas y una caracterización edáfica e hidrogeológica básica.

En los dos casos de estudio se observó un aumento de la percolación anual total bajo el escenario con *amunas*, lo que sugiere un potencial aporte a la sostenibilidad de manantiales y caudales base en estiaje.

El análisis de sensibilidad muestra que el modelo es principalmente sensible a la precipitación y a parámetros de la cuenca. Asimismo, se observa influencia de las características geométricas de la *amuna* y de las áreas de infiltración y percolación, incluida la percolación profunda hacia el acuífero y los tiempos de residencia del interflujo y el caudal base.

Se demuestra que el conocimiento hidráulico ancestral puede ser aprovechado para afrontar las consecuencias del cambio climático y, de esta manera, combatir el estrés hídrico en las ciudades. Para lograr esto, es indispensable aplicar metodologías que permitan un mejor entendimiento y la toma de decisiones para lograr la rehabilitación de los sistemas amuneros.

VII. RECOMENDACIONES

El modelo CUBHIC es una herramienta conceptual simplificada especialmente útil en cuencas con información limitada. En este sentido, una posible línea de trabajo futuro podría ser la instrumentación progresiva de la cuenca por ejemplo estaciones para medir la precipitación, caudal y calidad de agua en la zona de San Pedro de Casta, con el fin de contar con series temporales más largas y detalladas.

Realizar investigaciones adicionales sobre la dinámica del acuífero, incluyendo pruebas de bombeo, modelación hidrogeológica detallada e instrumentación de manantiales. Estos estudios permitirán cuantificar con mayor precisión la relación entre la infiltración inducida por las *amunas* y el incremento del caudal base en la estación seca.

Se recomienda incorporar un balance hídrico integral de la cuenca, que incluya la oferta, demanda y déficits, a fin de contextualizar la relevancia de la recarga estimada y su contribución a la seguridad hídrica.

REFERENCIAS

- [1] D. Apaza, R. Arroyo y A. Alencastre, "Las amunas de Huarochiri: Recarga de acuíferos en los Andes", Gestión social del agua y ambiente en cuencas – GSAAC, 2006. [En línea]. Disponible en: <https://hidraulicainca.com/wp-content/uploads/2011/07/libro-amunas-gsaac.pdf>
- [2] B. Ochoa-Tocachi, J. Bardales, J. Antiporta et al., "Potential contributions of pre-Inca infiltration infrastructure to Andean water security," Nature Sustainability, vol. 2, pp. 584–593, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0307-1>
- [3] B. Ochoa-Tocachi, J. Cuadros-Adriazola, and V. Bonnesoeur, "CUBHIC 2.0: Metodología de cuantificación de impactos de construcción y recuperación de amunas," Forest Trends, Lima, Perú, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.forest-trends.org/publications/documento-metodologico-amunas-cubhic-2-0/>
- [4] O. Ricra, P. Quino y G. Vázquez, "Siembra de agua a través de infraestructura natural de recarga hídrica (AMUNA) en la comunidad San Pedro de Casta, Lima, Perú," Idesia, vol. 40, no. 3, pp. 51–57, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000300051>
- [5] B. Cuadros y M. Mercado, "Práctica ancestral de cosecha de agua, para el aprovechamiento y almacenamiento," Tesis de titulación, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/21119>
- [6] B. Ochoa-Tocachi, J. Cuadros-Adriazola, and V. Bonnesoeur, "CUBHIC 2.0: Manual de Uso," Forest Trends, Lima, Perú, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.forest-trends.org/publications/manual-de-uso-cubhic-2-0/>
- [7] B. Ochoa-Tocachi, W. Buytaert, J. Antiporta et al., "High-resolution hydrometeorological data from a network of headwater catchments in the tropical Andes," Scientific Data, vol. 5, Art. no. 180080, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.80>