





beneficios hidrológicos de intervenciones en cuencas

## Construcción, Reparación y Mejoramiento de **Amunas**

Cuantificación de mejoras potenciales en el caudal base

Documento metodológico Mayo 2020





**AUTORES:** 

Javier Antiporta, Edwing Arapa y Vivien Bonnesoeur, en base a la metodología elaborada por Kieser & Associates, LLC.

Este documento metodológico es parte de una serie de Metodologías CUBHIC, publicadas por Forest Trends en asociación con Kieser & Associates y nuestros socios implementadores del proyecto Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica, CONDESAN, SPDA, EcoDecisión e Imperial College London. Cada metodología permite la estimación de beneficios hídricos de intervenciones en la infraestructura natural al nivel del sitio de un proyecto, buscando ofrecer una opción práctica de cuantificación del beneficio hídrico de los servicios ecosistémicos. Se puede encontrar otras metodologías CUBHIC en infraestructuranatural.pe.

Este documento proporciona una metodología completa con referencias científicas para la Calculadora de Beneficios CUBHIC (Excel).



## INTERVENCIÓN PROPUESTA: CONSTRUCCIÓN, REPARACIÓN Y MEJORAMIENTO DE AMUNAS

Las amunas (también llamado mamanteo) son una práctica de derivación de agua superficial ubicada a gran altitud en los Andes. Esta práctica existe desde la época preinca y se ha mantenido hasta ahora en algunas cuencas, por ejemplo, en las cuencas de Lima. Consiste principalmente en canales que derivan aguas superficiales de las cabeceras de cuencas hacía áreas de infiltración en las montañas durante la estación lluviosa, para incrementar el rendimiento y duración de manantiales aguas abajo. Se espera que la restauración y mejoramiento o la construcción de sistemas de amunas se traduzca en el aumento de los caudales base asociados con la recarga de agua subterránea. Estos canales de derivación construidos en las laderas transportan con poca pendiente el agua desde una quebrada hacia una zona con un buen potencial de infiltración, por ejemplo sobre rocas fracturadas. Después de un cierto tiempo, el agua infiltrada podría volver a aflorar aguas abajo en micro estanques construidos o en manantiales naturales desde donde podría extraerse para fines de riego agrícola, o podrá seguir su rumbo pendiente hacía un río. Para su buen













funcionamiento, esta infraestructura rústica necesita un mantenimiento cada año al inicio de la época de lluvia, lo que es asociado con fiestas tradicionales.

El objetivo principal de la restauración de las funciones de las amunas es incrementar y ampliar el flujo de los manantiales, y de esta manera, incrementar el agua disponible para su uso en las zonas ubicadas debajo de estas áreas de infiltración durante gran parte del año. La estrategia se inicia con la captación del caudal de los ríos/quebradas en las temporadas de avenida mediante bocatomas de piedra construidas en el lecho del cauce. Las aguas desviadas se transportan a través de canales de derivación construidos hacia áreas de alta infiltración.

En un proyecto piloto de construcción, reparación y mejoramiento de Amunas (metodología Kieser Associates, 2014), el tiempo había incrementado la permeabilidad del canal de transporte (Figura I) por lo que el agua desviada del río volvería a infiltrarse rápidamente cerca de la bocatoma del canal de derivación. El agua reinfiltrada sencillamente volvería a ingresar al río como flujo superficial y, por lo tanto, no suministraría agua a las áreas de infiltración más alejadas. Las reparaciones realizadas, como la impermeabilización en la porción inicial del canal y consolidación de las paredes, en el canal de derivación en este piloto fueron manejables y el incremento del flujo en las cunetas de infiltración pudo contabilizarse fácilmente.

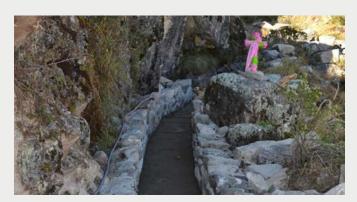


Figura Ia. Canal de derivación (amuna) en funcionamiento en la cuenca alta del río Chillón. (Fotografía cortesía de S. Bleeker, 2012).



Figura Ib. Canal de derivación (amuna), en reparacion, en la cuenca alta del río Chillón. (Fotografía cortesía de S. Bleeker, 2012).



Figura 2a. Cuneta de infiltración que recibe agua desde un canal de derivación reparado en la cuenca alta del río Chillón. (Fotografía cortesía de S. Bleeker, 2012).



Figura 2b. Área de infiltración de piedra/roca en la cuenca alta del río Chillón. (Fotografía cortesía de S. Bleeker, 2012).



#### CALCULANDO LOS BENEFICIOS HIDROLÓGICOS

Para calcular los beneficios de la cantidad de agua asociados con la construcción, reparación y mejoramiento de amunas, se propone un enfoque de balance hídrico. Este enfoque de cálculo está diseñado para obtener una estimación razonablemente precisa y minimizar la cantidad de datos insumos necesarios. Es posible que se disponga de otros enfoques de cálculo, pero estos también probablemente requerirán de información de campo adicional para analizar su capacidad de evaluar las mejoras del flujo base, al igual que el método de balance hídrico propuesto.

El enfoque del balance hídrico implica la aplicación de la ecuación del balance hídrico dos veces. Primero para representar las condiciones antes de la intervención y segundo, para representar las condiciones después de la intervención. La diferencia entre estas condiciones refleja el incremento de la infiltración de la precipitación en el suelo y, a su vez, el incremento del flujo base de los ríos locales — el beneficio de la cuenca de interés. El objetivo de la recuperación de la amuna es de aumentar la cantidad de precipitación que llega a los acuíferos mediante la percolación.

Los pasos generalizados se emplearon para estimar los beneficios de la cantidad de agua, usando este enfoque del balance hidrico:

#### I. Recopilación de la información

- a. Información representativa del sitio necesaria:
  - i. Características hidrológicas de la cuenca de aporte.
  - Características hidráulicas de la bocatoma y del canal.
  - iii. Características hidrológicas en el área final de infiltración.
  - iv. Tasa de precipitación diaria durante la época de lluvia.

#### 2. Cálculo de los beneficios de la intervención

- a. Aplicar dos veces la ecuación del balance hídrico simplificado, que representa las condiciones previas y posteriores mediante lo siguiente:
  - i. Volumen captado.
  - ii. Percolación.



#### Ecuación de balance hídrico

Los flujos considerados en este documento son representados en la Figura 1. La ecuación de balance hídrico contempla más flujos que en la metodología previa (Kieser and Associates, 2014).

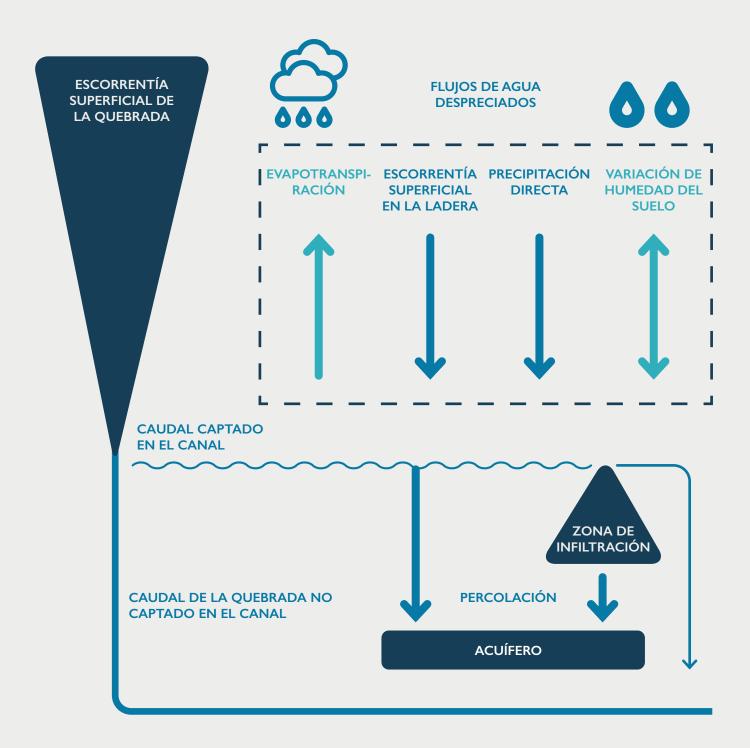


Figura I. Entradas y salidas del balance hídrico del sistema "canal-zona de infiltración" considerado para la recuperación de una amuna.

El balance hídrico para el sistema "canal-zona de infiltración" está representado por la siguiente ecuación:

$$Q_{quebrada} + Q_{ladera} + P = ET + p + Q_{salida} + \Delta R$$

#### Donde:

P = precipitación es la precipitación directa que cae en el sistema "canal-zona de infiltración" (mm)

Q<sub>quebrada</sub> = Escorrentía superficial de la cuenca de aporte, captado en la bocatoma y conducido a la zona de infiltración (mm)

 $Q_{ladera} = Escorrentía superficial de la ladera, captado a lo largo del canal (mm)$ 

ET = evapotranspiración (mm)

p = percolación (mm)

 $Q_{\text{salida}}$  = Caudal superficial del sistema "canal-zona de infiltración" que regresa rápidamente al rio (mm)

 $\Delta R$  = cambio en humedad de suelo del sistema "canal-zona de infiltración" (mm)

A continuación, se explicará cómo son estimados cada uno de los componentes del balance hídrico.

#### Escorrentía superficial

La escorrentía superficial se calcula usando el Método de Número de Curva de *Soil Conservation Service* (SCS). Este método usa "número de curva" que son representativos de la permeabilidad del suelo y asignados a las áreas de acuerdo a su vegetación y suelo. Un número de curva más alto representa superficies más impermeables mientras que los números de curva bajos representan suelos con alta capacidad de infiltración. Una sugestión de números de curva para el caso peruano es propuesta en la hoja de cálculo Excel que acompaña este documento técnico. La ecuación del número de curva es tal como se indica: "

si P<0.05S, entonces 
$$Q_{quebrada}$$
=0  
si P>0.05S, entonces
$$Q_{quebrada} = \frac{(P-0.05S)^2}{(P+0.95S)} \times \frac{10A}{24 \times 3600}$$

donde:

P=precipitación diaria en la cuenca de aporte durante la época de lluvia (mm)

 $Q_{\text{quebrada}}\!=\!$  escorrentía superficial diaria en la quebrada que alimenta el canal de amunas (m³.s-¹)

A=área de la cuenca de aporte (ha)

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

CN = Número de Curva (una función del tipo de suelo y el tipo de vegetación que se selecciona a través de las tablas de búsqueda).

A diferencia de otras metodologías CUBHIC, esta metodología no busca estimar el incremento de percolación de la cuenca de aporte, mediante un cambio en el número de curva de la cuenca.

### Caudal captado en la amuna

Las características de la bocatoma y de la sección del canal a lo largo de su recorrido permiten estimar la capacidad total del canal para conducir el agua hasta la zona de infiltración. En esta metodología, tratamos de capturar todas estas características en un solo parámetro de capacidad máxima de captación ( $Q_{\rm max}$ ) para simplificar la ecuación del caudal captado en la amuna:

Si 
$$Q_{quebrada} > Q_{max}$$
, entonces  $Q_{capt} = Q_{max}$   
Si  $Q_{quebrada} < Q_{max}$ , entonces  $Q_{capt} = Q_{quebrada}$ 

donde:

 $Q_{capt}$ =caudal conducido a través del canal hacia la zona de infiltración ( $m^3.s^{-1}$ )

 $Q_{\mbox{\tiny quebrada}}{=}$  escorrentía superficial diaria en la quebrada que alimenta el canal de amuna  $(m^3.s^{\mbox{\tiny 1}})$ 

 $Q_{max} =$  capacidad máxima de captación del canal y su bocatoma (m³.s $^{-1}$ )

Para estimar  $Q_{\text{max}}$ , se necesita estimar el punto con la menor capacidad de conducción del canal o de captación de la bocatoma. Se puede estimar la capacidad de captación de un canal de acuerdo a su sección gracias a la ecuaciones de Manning:

$$Q_{max} = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}} A$$

Donde:

Q<sub>max</sub>: caudal (m³/s)

A: área hidráulica (m²)

n: coeficiente de resistencia de Manning (m<sup>1/6</sup>)

R<sub>h</sub> = radio hidráulico (m)

 $S_0$ =pendiente promedia del fondo del canal (m/m).  $S_0$  se puede aproximar con el desnivel entre el punto de entrada y el punto de salida divido por la longitud del canal

A continuación, se presenta fórmulas para facilitar el cálculo de  $Q_{\max}$  a partir de la geometría del canal (Figura 2) y de los materiales que lo constituyen (Figura 3).

Tipo de selección	Área A (m²)	Perímetro mojado P (m)	Radio Hidráulico Rh (m)	Espejo de agua T (m)
T T T Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y Y	by	b+2y	by b+2y	Ь
$\begin{array}{c c} T & \xrightarrow{T} \\ \uparrow \\ \downarrow \\ Trapezoidal \end{array}$	(b+y)y	b+2y√1+z²	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	b+2zy
T T T T T T T T T T T T T T T T T T T	zy²	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2\sqrt{1+z^2}}$	2zy
D y Circular	<u>Φ-sen ΦD</u> <sup>2</sup>	<u>ΦD</u> 2	$\left(1-\frac{\operatorname{sen}\Phi}{\Phi}\right)\frac{D}{4}$	$\left(\operatorname{sen}\frac{\Phi}{2}\right)D$ $\stackrel{\circ}{\circ}$ $2\sqrt{y(D-y)}$
Parabólica	2/3Ту	$T + \frac{8y^2}{3T}$	$\frac{2T^2y}{3T+8y^2}$	3A 2Y

Figura 2. Secciones de hidráulica de canales



Material de las paredes del canal				
A.	Canales recubiertos artificialmente de	n		
	Vidrio	0.010		
	Cobre	0.011		
	Acero liso	0.012		
	Acero pintado	0.014		
	Acero remachado	0.015		
	Hierro fundido	0.013		
	Concreto acabado	0.012		
	Concreto no acabado	0.014		
	Madera aplanada	0.012		
	Madera no aplanada	0.013		
	Azulejo	0.014		
	Ladrillo	0.015		
	Asfalto	0.016		
	Metal corrugado	0.022		
	Escombro	0.025		

Material de las paredes del canal				
B.	Canales Excavados			
	en tierra	n		
	Limpio	0.022		
	Grava	0.025		
	Con raíces de maleza	0.030		
	Con piedras, adoquines	0.035		
C.	Canales naturales			
	Limpio y recto	0.030		
	De flujo lento con fondo profun-	0.040		
	dos			
	Ríos grandes	0.035		
	Corrientes de montaña	0.050		
D.	Llanuras inundables			
	Pastadero, terreno agrícola	0.035		
	Con poca maleza	0.050		
	Con mucha maleza	0.075		
	Con árboles	0.150		

Fuente: Ven Te Chow: Open Channel Hydraulics (1959).

Figura 3. Coeficientes de resistencia de Manning

En caso que el caudal supera la capacidad de conducción del canal, se produce un rebose y una pérdida lateral de agua que escurre en la ladera. Asumimos que esta agua regresa rápidamente al río y no participa a la regulación hídrica en la cuenca (contribuyendo al  $Q_{\text{salida}}$  de la ecuación I). Además, el caudal conducido en el canal no puede ser superior a la capacidad de captación de la bocatoma.



## Percolación y recarga de acuíferos

Consideramos tanto la percolación en el canal como en la zona de infiltración. La ecuación de la infiltración en el canal es:

Si 
$$Q_{capt} > p_{max_c}$$
, entonces  $p_c = p_{max_c}$   
Si  $Q_{capt} < p_{max_c}$ , entonces  $p_c = Q_{capt}$ 

Donde:

p = flujo de agua que percola en el canal (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)

 $Q_{capt}$  = caudal conducido a través del canal hacia la zona de infiltración (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)

 $p_{max,c}$  = flujo máximo que puede ser infiltrado en el canal (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)

$$p_{max c} = K_{canal}/3600.y.A_{canal}$$

 $K_{\text{\tiny canal}} = \text{conductividad hidráulica saturada promedio en el canal (mm.h-1)}$ 

y= tirante máximo de agua en el canal (mm)

A<sub>canal</sub> = Superficie del canal (m²). Esto se aproxima siendo la longitud del canal multiplicado por el ancho promedio.

En cuanto a la ecuación en la zona de infiltración es:

Si 
$$Q_{capt} - p_c > p_{max}$$
, entonces  $p = p_{max}$   
Si  $Q_{capt} - p_c < p_{max}$ , entonces  $p = Q_{capt} - p_{max\_c}$ 

Donde:

p= flujo de agua que percola en la zona de infiltración (m³/s)

 $Q_{capt}$  = caudal conducido a través del canal hacia la zona de infiltración (m³.s-1)

 $p_{max,c}$  = flujo máximal que puede ser infiltrado en el canal (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>)

 $p_{\mbox{\tiny max}} =$  flujo máximal que puede ser infiltrado en la zona de infiltración (m³.s-¹)

$$p_{max} = K/3600.y.A_{zona\ de\ infiltración}$$

 $K_{zona de infiltración} = conductividad hidráulica saturada promedia en la zona de infiltración (mm.h<sup>-1</sup>)$ 

y= tirante máximo de agua en la zona de infiltración (m)

 $A_{zona\ de\ infiltración}=$  Superficie de la zona de infiltración (m²)

Considerando que la ubicación de las amunas fue elegida estratégicamente por las y los antiguos peruanos basado en su conocimiento empírico del territorio, asumimos que tanto la zona de conducción de la amuna y la zona de infiltración, presentan alta permeabilidad. Esto se visibiliza en los cálculos de la hoja de cálculo adjunta. Sin embargo, los beneficios hídricos estimados son altamente sensibles a parámetros que deben ser medidos en campo<sup>2</sup>: K<sub>zona de infiltración</sub>, A<sub>zona de infiltración</sub>

<sup>2.</sup> Pruebas de infiltración, estudios geofísicos, entre otros.

### Flujos de agua despreciados

En esta metodología, como en todas las metodologías CUBHIC, los autores asumen diferentes hipótesis para simplificar la estimación y enfocar el cálculo en los flujos más críticos, sea por su magnitud o por ser flujos que son sustancialmente modificados por la intervención. En el caso de la recuperación de la práctica de amunas, se despreció los diferentes flujos:

- La precipitación directa en el sistema canal-zona de infiltración.
- La evapotranspiración en el sistema canal-zona de infiltración.
- El escurrimiento directo en la zona de drenaje del canal (ladera aguas arriba del canal).

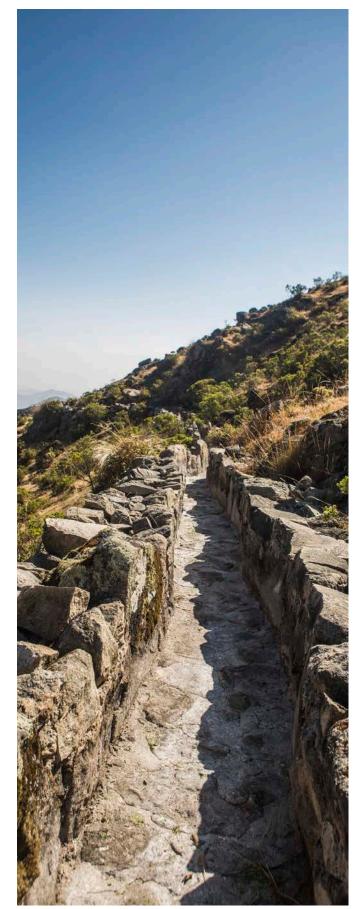
Se asumió que eran flujos sustancialmente menores a los flujos de la cuenca de aporte que son captados en la bocatoma. En efecto, la precipitación directa y la evapotranspiración en el sistema canal-zona de infiltración depende directamente de la superficie del sistema canal-zona de infiltración, que es sustancialmente menos que la superficie de la cuenca de aporte. En el caso de un canal amunero largo, es una buena práctica averiguar que la superficie de la zona de drenaje del canal es también sustancialmente menor que la superficie de la cuenca de aporte. Si no sería el caso, entonces no se podría despreciar el escurrimiento directo en la zona de drenaje del canal.

Se asumió que los cambios en la humedad del suelo eran despreciables dado que consideramos únicamente la época de lluvia durante la cual es razonable pensar que el suelo está siempre húmedo.

Finalmente, se asumió también que la bocatoma solo captaba el escurrimiento superficial de la cuenca de aporte. Sin embargo, la cuenca de aporte produce también caudales más lentos. Estos flujos no son tomados en cuenta, aunque pueden ser importantes incluso en la época de lluvia. Por lo cual, la estimación de beneficios es probablemente conservadora, sobre todo para las cuencas de aporte con buena regulación hídrica.

# ¿Cómo simular la recuperación de la amuna?

La recuperación de la amuna consiste mayormente en la mejora de la capacidad máxima de captación del canal y de su bocatoma ( $Q_{max}$ ), sea mediante la mejora de la bocatoma o la construcción de un canal con de mayor altura y sin "huecos" (que crean pérdidas laterales). Aun si es menos común, es posible buscar zonas de infiltración con mayor capacidad de infiltración, por ejemplo si se ha degradado la zona de infiltración. En este caso, se tiene que ajustar los parámetros  $K_{zona de infiltración}$  y  $A_{zona de infiltración}$ 





El proceso seguido para calcular los valores de escorrentía, percolación y evapotranspiración para cada paso de tiempo según se describe en este documento, se presenta y resume en la Figura 2.

Escorrentía superficial (
$$Q_{quebrada}$$
) Si  $P > 0.05S$ , entonces  $Q_{quebrada} = \frac{(P-0.05S)^2}{P+0.95S} \times \frac{10A}{24 \times 3600}$  Si  $P < 0.05S$ , entonces  $Q_{quebrada} = 0$ 

Caudal Si 
$$Q > Q_{max}$$
, entonces  $Q_{capt} = Q_{max}$  Si  $Q < Q_{max}$ , entonces  $Q_{capt} = Q_{quebrada}$ 

Percolación en el canal (
$$p$$
) Si  $Q_{capt} > p_{max\_c}$ , entonces  $p_c = p_{max}$  Si  $Q_{capt} < p_{max\_c}$ , entonces  $p_c = Q_{capt}$ 

Percolación Si 
$$Q_{capt}$$
 -  $p_c$  >  $p_{max\_c}$ , entonces  $p = p_{max}$  infiltracion (p) Si  $Q_{capt}$  -  $p_c$  <  $p_{max\_c}$ , entonces  $p = Q_{capt}$  -  $p_c$ 

Figura 3. Etapas de cálculos y ecuaciones para el balance hídrico de la recuperación de la de amunas.



La preparación de esta metodología y su documentación no habría sido posible sin los aportes importantes de un equipo amplio y diverso. La metodología ha sido actualizada por Javier Antiporta (CONDESAN), Edwing Arapa (CONDESAN) y Vivien Bonnesoeur (CONDESAN), en base a la metodología elaborada por Kieser & Associates, LLC. La edición de este documento fue realizada por Gena Gammie (Forest Trends) y Sydney Moss (Forest Trends).





Amunas: Construcción, Reparación y Mejoramiento de Amunas

## www.infraestructuranatural.pe

Esta publicación fue posible gracias al apoyo de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional y el Gobierno de Canadá. Las opiniones expresadas en este documento son las del autor y no re lejan necesariamente las opiniones de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional ni del Gobierno de Canadá.